

КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

В.Ю. СУХЕНКО

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ
М'ЯСА І СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН**

КИЇВ – 2013

УДК 602.1:621.927

ББК 22.18.36.81

С 91

Рекомендовано вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 10 від 28 травня 2013 р.)

Рецензенти: Лауреат державної премії України, Заслужений діяч науки і техніки України, докт. техн. наук, професор Сукманов В.О. (Донецький національний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського); Лауреат державної премії України, Заслужений працівник освіти України, докт. техн. наук, професор Таран В.М. (Національний університет харчових технологій); докт. техн. наук, професор Фришев С.Г. (Національний університет біоресурсів і природокористування України)

С 91 Сухенко В.Ю. Моделювання процесів подрібнення м'яса і синтез технологічних машин: Монографія / В.Ю. Сухенко – Київ. 2013 – 227 с.

ISBN 978-966-2719-73-4

У книзі приведений аналіз парку м'ясоподрібнювальних машин переробних підприємств АПК. Проаналізовані структурні складові м'ясної сировини, створені їх реологічні моделі, досліджено деформування і руйнування м'ясопродуктів при подрібненні. Проаналізовані енергетичні показники процесів подрібнення і наведена класифікація подрібнювального обладнання за структурою матеріальних потоків та запропонований алгоритм пошуку ефективного способу диспергування, вибору конструктивно-технологічних схем і конструювання обладнання.

Досліджені субмікроструктури різальних інструментів після контактування з сировиною та запропоновані методи і засоби для підвищення зносостійкості інструментів і надійності обладнання.

Монографія буде корисною широкому загалу науковців, технологів, конструкторів, аспірантів і студентів – всім, хто досліджує, експлуатує, конструює і вивчає обладнання для подрібнення матеріалів.

ISBN 978-966-2719-73-4

УДК 602.1:621.927

ББК 22.18.36.81

© Сухенко В.Ю., 2013

© НУБіП України, 2013

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
РОЗДІЛ 1. М'ЯСНА СИРОВИНА ЯК ОБ'ЄКТ ПОДРІБНЕННЯ	11
1.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИРОВИНУ І ТЕХНОЛОГІЮ ВИРОБНИЦТВА М'ЯСНИХ І М'ЯСОМІСКИХ ПРОДУКТІВ	11
1.2. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ М'ЯСА	15
1.3. ВПЛИВ АВТОЛІЗУ НА ВЛАСТИВОСТІ М'ЯСА	17
1.4. АВТОЛІЗ М'ЯСА З РІЗНИМИ ЗНАЧЕННЯМИ ВОДНЕВОГО ПОКАЗНИКА	19
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА, РЕОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІОПОЛІМЕРІВ М'ЯСА	21
2.1. СТРУКТУРА І МОДЕЛІ М'ЯСА ТА М'ЯСОПРОДУКТІВ	21
2.2. ЕЛЕКТРИЧНІ АНАЛОГИ МЕХАНІЧНИХ РЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ М'ЯСНИХ І М'ЯСОМІСКИХ ПРОДУКТІВ	28
2.3. МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІОПОЛІМЕРІВ М'ЯСА	33
РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	45
3.1. ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ.....	45
3.2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І СУЧАСНА КЛАСИФІКАЦІЯ ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ	47
3.3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМІШУВАЛЬНО-ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ У ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ	55
3.4. ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ ПОДРІБНЕННІ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ.....	62
3.5. ОСОБЛИВОСТІ ЕНЕРГЕТИКИ ВІЛЬНОГО РІЗАННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ	78
3.6. ЗБЕРЕЖЕННЯ НАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ М'ЯСА ПРИ СТИСНЕНОМУ РІЗАННІ... ..	85
3.7. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ФАРШУ	91
3.8. ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ М'ЯСОПЕРЕРОБКИ	97
РОЗДІЛ 4. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ	100
4.1. СУТНІСТЬ ПРОБЛЕМИ І МЕТА МОДЕЛЮВАННЯ.....	100
4.2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ	100
4.3. КЛАСИФІКАЦІЙНІ ОЗНАКИ СПОСОБІВ І ЗАСОБІВ ПОДРІБНЕННЯ БІОПОЛІМЕРІВ М'ЯСА	103
4.4. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОДРІБНЮВАЧІВ	112
4.5. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ БІОПОЛІМЕРІВ М'ЯСА	117
4.6. МОДЕЛІ РУЙНУВАННЯ БІОПОЛІМЕРІВ М'ЯСА ПРИ ПОДРІБНЕННІ	123
4.7. АЛГОРИТМ ПОШУКУ ЕФЕКТИВНОГО СПОСОБУ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ.....	128

4.8. Синтез м'ясоподрібнювальних машин	129
РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ НА СПРАЦЮВАННЯ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН	131
5.1. Показники надійності м'ясоподрібнювальних інструментів.....	131
5.2. Обґрунтування основ забезпечення довговічності подрібнювальних машин	132
5.2.1. Методика досліджень, використані матеріали і установки	133
5.2.2. Вплив м'ясних середовищ на дислокаційну структуру твердих тіл	138
5.2.3. Електричне зарядження деталей м'ясоподрібнювальних машин як засіб підвищення опору спрацюванню	150
5.3. Модель корозійно-механічного спрацювання м'ясоподрібнювальних машин	160
5.4. Керування зносостійкістю м'ясоподрібнювальних інструментів	166
5.4.1. Конструктивно-технологічні способи підвищення зносостійкості	167
5.4.2. Застосування вибіркового переносу у вузлах подрібнення м'яса. 170	
5.4.3. Формування сервовитних захисних плівок з використанням плазмового струменя.....	174
5.4.4. Механізм утворення і захисної дії сервовитних плівок.....	177
5.5. Обґрунтування вибору сталей для різальних вузлів шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків)	181
РОЗДІЛ 6. ПРОГНОЗУВАННЯ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ М'ЯСОПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН	189
6.1. Методика прогнозування показників надійності	189
6.2. Ефективні засоби підвищення надійності деталей м'ясоподрібнювальних машин	193
6.3. Захист м'ясоподрібнювального обладнання від дії соляних розчинів	201
ПІСЛЯМОВА	208
ЛІТЕРАТУРА.....	209

ПЕРЕДМОВА

Аналіз сучасного стану парку устаткування харчових підприємств України свідчить про те, що його технічний рівень не можна визнати задовільним. Сьогодні 42 % виробничих фондів підприємств харчової промисловості підлягають заміні, 25 % підлягають модернізації і тільки 19% відповідає світовому рівню. Приблизно 30 % парку машин відпрацювало вже два і більше амортизаційні терміни, а знос основних засобів складає 70 %. Більше 27 % парку технологічного устаткування складає імпортна техніка [1].

Велику частину устаткування для м'ясопереробки в Україні також складає імпортне обладнання, яка не відповідає як фінансовим можливостям виробників м'ясопродуктів, зважаючи на його високу вартість і ціну запасних частин, так і потребам та інтересам України у розвитку власного вітчизняного харчового машинобудування, створенню додаткових робочих місць і забезпеченню продовольчої безпеки країни.

Занепад м'ясної галузі і харчового машинобудування в цілому веде до занепаду економіки України. Вкладення засобів в імпортну сировину і устаткування дає короточасний ефект благополуччя і великої кількості продукції на ринку. Довгострокової перспективи у такого підходу немає.

В регіонах країни, де є потужна машинобудівна база, кваліфіковані кадри і високий науковий потенціал галузевих НДІ, ВНЗ, академічних інститутів спостерігається ввезення імпортного харчового устаткування, власне виготовлення якого не викликає яких-небудь принципових технічних труднощів.

Нові економічні стосунки відкрили вільний доступ на Український ринок м'ясопереробного устаткування з Німеччини, Італії, Іспанії, Фінляндії та ін. країн [2]. Провідне місце у світі по виробництву устаткування для м'ясопереробної промисловості займають німецькі виробники, які експортують близько 80% виготовлених ними машин.

Випуск продукції переробки м'яса у фізіологічно необхідних об'ємах неможливий без розробки і реалізації перспективних технологій і устаткування, що забезпечують ресурсозберігаючу переробку і виготовлення готової продукції високої якості.

У м'ясній галузі при виробництві м'яса, ковбасних виробів і напівфабрикатів широко застосовуються операції різання, які істотним чином впливають на якість сировини і вихід готового продукту. Операції різання і подрібнення м'ясопродуктів дуже різноманітні і енергоємні.

Особливості біологічного походження м'ясопродуктів вимагають поетапного здійснення процесу подрібнення. Тривалість і режими подрібнення м'яса на кожному етапі потребують спеціального теоретичного і експериментального обґрунтування [3].

Ряд конструкцій м'ясоріжучих машин запозичений з інших галузей промисловості і призначених для подрібнення мінеральної сировини. Разом з тим, інтенсивний механічний вплив робочих органів на м'ясо призводить до втрати нативних властивостей сировини і навіть до її фізико-хімічної деструкції. Фарш ковбас, отриманий за допомогою таких машин, має рихлу консистенцію, дає жирно-водяні набряки у батонах при термічній обробці і готовий продукт має незадовільні органолептичні показники. При розробці м'ясоріжучих машин необхідно враховувати, що м'ясо є сировиною біологічного походження та має складний хімічний склад. У зв'язку з цим робочі органи машини повинні мати такі параметри і забезпечувати такі режими подрібнення, щоб вони негативно не впливали на хімічний склад сировини і здійснювали операцію подрібнення високоякісно та з необхідним ступенем подрібнення.

При конструюванні м'ясоріжучих машин часто чисто механічно використовують досягнення в області технології машинобудування та збільшують швидкості руху робочих органів механізмів. Так з'явилися кутера, ножі яких мають лінійну швидкість вище 120 м/с, комбіновані подрібнювачі з робочими органами типу ножів і решіток емульситаторів з частотою обертання ножів вище 6000 об/хв. та ін. Потужність двигуна приводу такого типу промислових машин досягає 200 кВт та більше. Разом з тим, значна частина енергії, яка витрачається на процес подрібнення, дисипується в сировині і перетворюється у тепло. Нагрівання продукту, в такому випадку, носить локальний і об'ємний характер та призводить до небажаних змін нативних властивостей м'ясопродуктів. Білки м'ясного фаршу частинно денатуруються та за певних умов можуть навіть коагулюватись. В кінцевому ж підсумку, поряд з якісною вихідною сировиною, процес приготування фаршу ковбасних виробів прямо впливає на якість готового продукту. Тому розробка м'ясоріжучих машин має проводитись на основі детальних досліджень процесу різання, лабораторних і виробничих випробувань конструкцій і режимів роботи їх ріжучих органів.

Машини і апарати, що переробляють м'ясну сировину, повинні впливати на оброблюваний продукт таким чином, щоб при цьому втрати сировини і готової продукції були б мінімальними. Це викликає необхідність повної відповідності механічних властивостей, конструктивних форм і параметрів виконавчих робочих органів машин структурно-механічним властивостям м'ясної сировини. Якість отриманої готової продукції безпосередньо залежить від того, як вовчок і кутер чи інша машина подрібнить кускове м'ясо.

Поставлена проблема визначила сучасні тенденції конструювання різальних інструментів: оптимізацію профілю і конструктивних елементів,

застосування збірних конструкцій, використання зносостійких матеріалів і покриттів тощо.

Останнім часом сформувалися прогресивні технологічні методи забезпечення надійності і високої подрібнювальної здатності різальних інструментів шляхом використання заготовок і напівфабрикатів з порошкових матеріалів, зміцнення лез методами поверхневої пластичної деформації, хіміко-термічної обробки, лазерної і криогенної дії на інструмент, електроіскрового легування [4].

Не зважаючи на певні недоліки методів і недоробки технологій, заходи, що вживаються, дозволяють збільшити ресурс різального інструменту, уповільнити темп зношування різальної пари. Але значно підвищити ресурс різального інструменту можливо шляхом забезпечення його самозаточування в процесі експлуатації, завдяки зносостійкому покриттю, що дозволяє отримати на лезі ножа шари з різною твердістю.

Підвищення довговічності і надійності роботи сучасних машин і агрегатів неможливе без використання досягнень науки і практики в області тертя та зношування [5].

Важливе значення для розуміння механізму зносу в корозійних середовищах мають роботи, які виконані Аксеновим А.Ф., Васильєвим І.В., Ванцелем С.В., Голего Н.Л., Карпенко Г.В., Лазарєвим Г.Є., Некозом О.І., Портером О.І. Прейсом Г.О., Сологубом М.А., Томашовим М.Д., Трофимовичем О.Н., Шевеля В.В. та ін. Вони відкривають фізичні і механіко-електрохімічні явища на фрикційному контакті при терті в різних умовах, що дозволяє намітити напрями досліджень для знаходження шляхів підвищення довговічності вузлів тертя, які працюють в специфічних умовах м'ясопереробних виробництв.

Нажаль, до цього часу, питаннями зносу деталей обладнання м'ясопереробних виробництв на сучасній науковій основі займалися мало. У вітчизняній і зарубіжній літературі нам вдалось виявити дуже невелику кількість робіт, які присвячені довговічності окремих деталей м'ясопереробного обладнання, але в них не розкривається механізм процесу зношування в специфічних умовах його роботи, а описані лише окремі практичні відомості.

Розвиток та інтенсивність корозійно-механічного зношування обладнання галузі залежить від умов роботи контактуючих деталей і технологічних середовищ. Корозійний фактор в ряді випадків може відігравати переважаючу роль. Це пояснюється специфічними властивостями робочих середовищ, які нагріті і рухаються з великими швидкостями, містять хімічно-активні і поверхнево-активні речовини, в ряді випадків є сильними електролітами, які, потрапляючи на робочу поверхню деталі, приймають безпосередню участь у процесі зношування. При попаданні на металеві деталі робочих середовищ, що є

водними розчинами електролітів, розвиваються електрохімічні корозійні процеси [6].

Вибираючи напрямки боротьби з корозійно-механічним зношування треба враховувати, що вони обмежені вимогами технологічного процесу переробки м'ясної сировини, тобто склад робочих середовищ і температурно-гідрравлічні режими не можуть бути змінені. Це зумовлює необхідність інколи обмежитись дослідженнями можливості використання більш зносостійких матеріалів для виготовлення деталей обладнання, конструктивних і деяких інших шляхів підвищення довговічності.

Відомості про зношування металів в технологічних середовищах харчових виробництв обмежуються монографіями Г.О. Прейса, М.А. Сологуба [7,8], О.І. Некоза, Ю.Г. Сухенка, М.С. Стечишина [119], а також публікаціям Б.І. Зінко [9], П.Л. Смертяка [10], Б.П. Штефана [11, 12, 13]. У зв'язку з відсутністю науково-обґрунтованих рекомендацій вибір матеріалів і методів зміцнюючої обробки при виготовленні і ремонті технологічного устаткування харчових і, зокрема, м'ясопереробних виробництв часто носить випадковий характер.

Корозійно-механічному зношуванню металів присвячена єдина монографія Б.Б.Крумана і В.А.Крупіциної [14]. У ній зроблена спроба вивчити і систематизувати процеси, що відбуваються при терті в нейтральних розчинах солей. Проте, книга у відомій степені застаріла і в ній не висвітлені багато аспектів цієї проблеми.

Відставання наукових розробок від потреб практики пояснюється надзвичайно широким діапазоном властивостей технологічних середовищ, різноманіттям використовуваних металів у вузлах тертя і особливостями умов на фрикційному контакті-температур, швидкостей, тисків. Крім того, дослідження цих процесів пов'язане з певними складнощами через необхідність залучення сучасних знань і методів з різних галузей науки: металознавства, фізики твердого тіла, металофізики, фізико-хімічної механіки матеріалів, електрохімії, трибоніки.

Розв'язок задач оптимізації процесів переробки м'яса для забезпечення якості фаршів, енерго- і ресурсозбереження при розрахунках і конструюванні м'ясоподрібнювального обладнання можна здійснити за допомогою адекватних математичних моделей, які зв'язують всі основні процеси різання і параметри м'ясоподрібнювальних органів з фізико-механічними властивостями сировини. Використання ПЕОМ для розв'язання таких задач можливе за умови застосування побудованого на базі цих моделей і теоретичних положень фізико-хімічної механіки матеріалів математичного забезпечення.

Навіть враховуючи широке коло питань, як фундаментального, так і прикладного характеру, розглянутих дослідниками в області техніки і технології переробки м'яса, комплексні роботи, направлені на використання накопичених знань на загальне моделювання процесів подрібнення для пошуку оптимальних кінематичних і динамічних параметрів різання різноманітної м'ясної сировини, пошук раціональних геометричних параметрів різальних лез і застосування супутніх технічних ефектів при здрібненні не були виконані.

Практично відсутні роботи які б враховували хімічні властивості м'яса та м'ясного соку при конструюванні поверхонь різальних інструментів, виборі сталей і захисних покриттів для їх виготовлення, що унеможлиблює збереження характеристик навіть правильно спрофільованого і виготовленого м'ясоподрібнювального інструменту довгий період. Тому розробки методів керування властивостями лез і робочих поверхонь інструментів за рахунок створення на них композицій, поєднуючи міцність, твердість і пластичність є перспективними.

Таким чином напрям наукових досліджень, викладених у монографії, які направлені на забезпечення ефективності м'ясоподрібнювальних процесів і підвищення довговічності м'ясорізальних машин та інструментів є актуальним для м'ясопереробних підприємств АПК і має важливе наукове, прикладне і народногосподарське значення.

Мета цієї роботи – на основі аналітичних і експериментальних досліджень, з урахуванням реологічних властивостей м'ясопродуктів та з використанням закономірностей кінематики і динаміки різання, останніх досягнень матеріалознавства, фізико-хімічної механіки матеріалів, триботехніки, зокрема досліджень корозійно-механічного зношування матеріалів під впливом хімічно - та поверхнево активних речовин розвинути на підґрунті математичного моделювання теорію процесу подрібнення м'ясної сировини і запропонувати науково-обґрунтовані рекомендації щодо удосконалення способів подрібнення, застосування раціонального складу сталей і захисних покриттів для виготовлення м'ясорізальних інструментів, а також нових засобів для збереження нативних властивостей перероблювальної сировини, отримання належної якості виробленої продукції та забезпечення енерго- і матеріальних ресурсів при створенні і застосуванні подрібнювальних машин для виробництва м'яса і м'ясопродуктів та гарантування належного рівня надійності і довговічності подрібнювального обладнання.

Одержані в роботі наукові результати, які розширюють уявлення про процеси подрібнення м'ясної сировини з різноманітними фізико-хіміко-механічними властивостями, дозволили розробити теоретичні

основи і експериментально обґрунтувати **новий концептуальний підхід** у вирішенні проблеми підвищення ефективності різання м'яса і довговічності обладнання м'ясопереробних виробництв АПК, покладений в основу конструктивних і технологічних рішень при виборі кінематичних і динамічних параметрів різальних пристроїв, сталей і зносостійких покриттів для різальних інструментів, що забезпечують енерго- та матеріалозбереження, високу якість подрібненої продукції та належну надійність обладнання.

Монографія буде корисною для спеціалістів харчової та переробної промисловості, студентам механічних спеціальностей, аспірантам і науковим співробітникам вищих навчальних закладів і науково-дослідних інститутів, що вивчають, досліджують і проектують м'ясоподрібнююче обладнання.

Розділ 1. М'ясна сировина як об'єкт подрібнення

1.1. Загальні відомості про сировину і технологію виробництва м'ясних і м'ясомістких продуктів

М'ясопереробні підприємства АПК України виготовляють понад 700 найменувань ковбас та м'ясомістких продуктів. Ковбасні підприємства АПК України виготовляють понад 500 найменувань ковбас та виробів із соленого м'яса.

Ковбаси виготовляються з подрібненого м'яса зі спеціями в ковбасній оболонці. Для доведення ковбас до готовності їх піддають термічному обробленню або ферментації.

Залежно від способу підготовки фаршу, термічного оброблення та якості ковбаси поділяють на такі основні групи: варені; сосиски і сардельки; напівкопчені; варено-копчені; сирокоччені; сиров'ялені; субпродуктові; інші види ковбас.

Принципова відмінність виробів із соленого м'яса (окости, шинки, рулети, корейки, грудинки, бекон, буженина, карбонат, балик) від ковбас у тому, що їх виготовляють із суцільних шматків м'яса з використанням спеціальних технологій.

Основною сировиною для ковбасного виробництва є м'ясо всіх видів сільськогосподарських тварин і птиці, субпродукти, жирова сировина, яйця та яйцепродукти, рослинні білкові добавки, молочні продукти, крохмаль, борошно та інші продукти.

Допоміжна сировина — кухонна сіль, спеції, овочі, бактеріальні та коптільні препарати, ковбасна оболонка, вода питна, пакувальні, перев'язувальні та паливні матеріали.

Яловичина є основним компонентом фаршу більшості ковбас, яка надає йому необхідну липкість, в'язкість, монолітність, високу вологозв'язуючу здатність і колір.

Свинина має ніжнішу структуру м'язових волокон і більший уміст жиру. Додавання свинини до фаршу ковбас покращує консистенцію, пластичність, надає продукції специфічного запаху і смаку.

Шпик після нарізання на шматки визначеної форми перемішується у мішалці з м'ясом. Додавання шпику покращує малюнок на перерізі і підвищує енергетичну цінність ковбас. Шпик повинен бути свіжим, білого кольору, без забруднень і сторонніх запахів. Перед подрібненням шпик охолоджують до температури нижче -1°C . Для ковбас вищих сортів використовують хребтовий шпик. Під час соління кухонна сіль рівномірно розподіляється по всій масі. За тривалого соління в м'ясі відбуваються складні біохімічні процеси, що надає йому специфічного смаку та аро-

мату. Унаслідок дифузійно-осмотичних процесів м'ясо набуває підвищеної липкості та вологозв'язуючої здатності.

Соління м'яса для виробів із солоного м'яса має свої особливості, головна з яких — триваліший термін соління задля отримання шинкового смаку і аромату.

При виробництві виробів із солоного м'яса використовують три методи соління - мокрий, сухий та комбінований.

При виготовленні ковбас після соління м'ясо подрібнюють на вовчку з діаметром отворів у вихідній решітці 2-3 мм. Для деяких видів ковбас використовують діаметр отворів 6-9 мм.

Під час виготовлення національних або спеціальних ковбас використовують конину та баранину, функціональні властивості яких нагадують яловичину.

Залежно від термічного стану м'ясо поділяють на парне — з температурою 36-38°C не пізніше ніж через 1,5 години після забою; охололе — яке після розбирання туш охололо до температури не вище 12° С; охолоджене — з температурою від 0 до 4° С; підморожене — яке має температуру в товщі від 0 до -2° С; заморожене — м'ясо, яке має температуру в товщі стегна не вище -8° С і розморожене — з температурою в товщі не нижче 1° С.

Незважаючи на великий асортимент м'ясних і м'ясомістких ковбасних виробів, технологічні процеси виготовлення більшості з них мають багато спільного. Але технологія виготовлення кожної групи має свої специфічні особливості.

Ковбаси виготовляють згідно з вимогами діючих ГОСТів, ДСТУ, Технічних умов України та Технологічних інструкцій на кожний вид ковбаси. Залежно від сировини, що використовується, та якості ковбас їх поділяють на вищий, перший, другий та третій ґатунок.

На технологічній схемі (рис. 1.1) виготовлення ковбасних і м'ясомістких виробів наведено основні технологічні операції, які використовують під час виготовлення основних видів ковбас [15].

Для виготовлення кожного виду ковбас використовують спеціальну основну сировину, спеції та допоміжні матеріали, які разом із технологічними прийомами надають ковбасам певних смакових властивостей, зокрема органолептичних, смакових та ароматичних.

Сировина, спеції та допоміжні матеріали повинні задовольняти діючі вимоги стандартів.

Під час виготовлення ковбас знежилване м'ясо піддають солінню для надання йому солоного смаку, липкості, спрямованого розвитку мікрофлори, підвищення вологозв'язуючої здатності та створення умов для формування специфічного смаку і аромату. При солінні м'яса для варених ковбас, сосисок, сардельок та м'ясних хлібів до 100 кг сировини

додають близько 2 кг кухонної солі, для напівкопчених і варено-копчених — 3 кг, для сирокочених і сиров'ялених – 3,5-4 кг. Щоб прискорити процес соління м'ясо попередньо подрібнюють та перемішують у мішалці разом із сіллю. Тривалість засолювання, залежно від ступеня подрібнення, наведена в табл. 1.1.

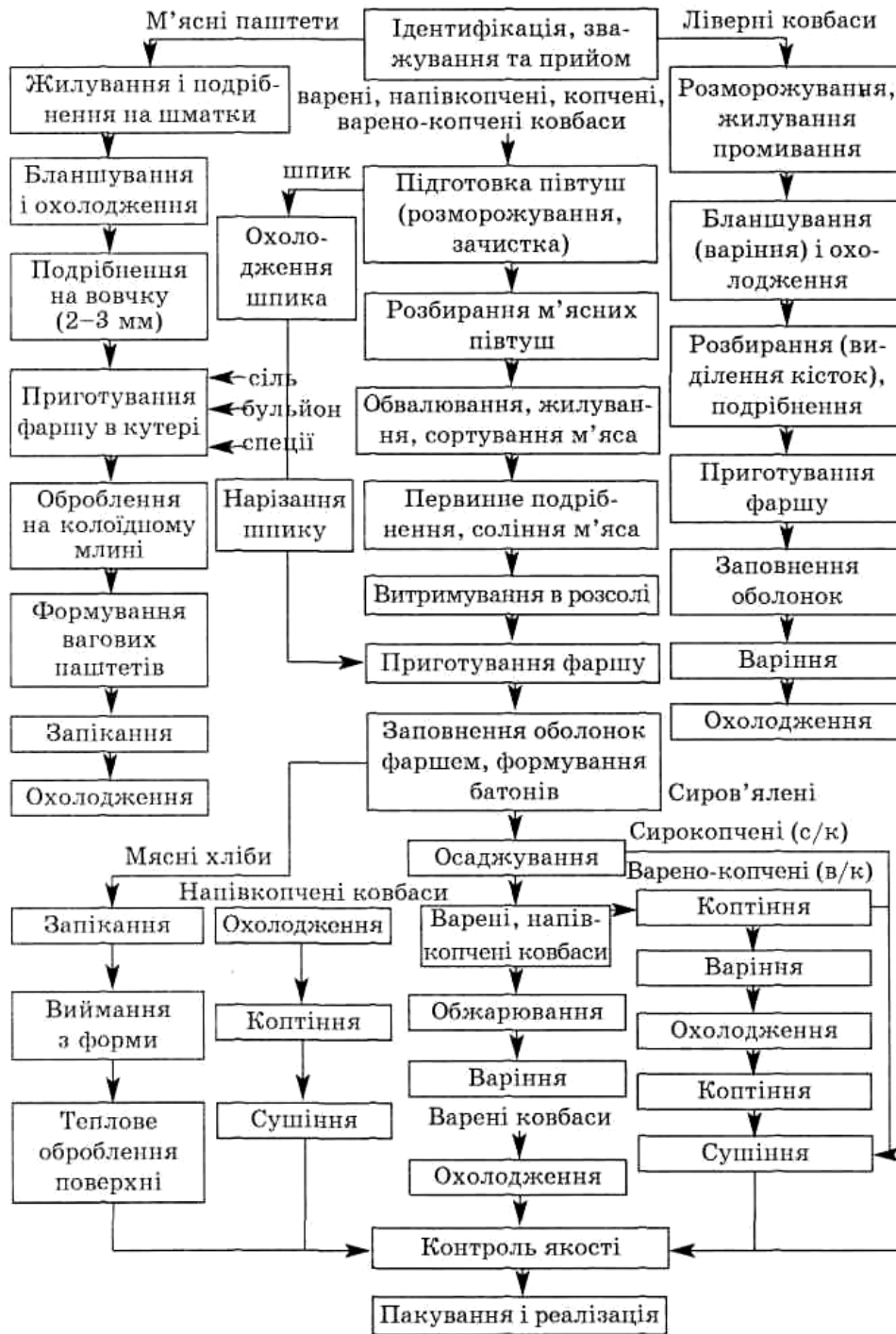


Рис. 1.1 — Принципово-технологічна схема виготовлення ковбасних і м'ясомістких виробів

Таблиця 1.1 — Тривалість засолювання м'яса при виготовленні ковбас

Група ковбас	Ступінь подрібнення, мм (г)	Температура в камері соління, °С	Тривалість засолювання, год
Варені, сосиски і сардельки	2-3 мм	2-6	6-12
	16-25 мм	0-4	24-48
	300-600 г	0-4	48-72
Напівкопчені	16-25 мм	0-4	24-48
	300-600 г	0-4	48-96
Варено-копчені	16-25 мм	0-4	24-48
	300-600 г	0-4	48-96
Сирокопчені, сиров'ялені	300-600 г	0-4	120-168

Для копчених ковбас фарш готують у мішалках. Спочатку закладають нежирну сировину — подрібнену яловичину та нем'ясні компоненти — і перемішують 2-3 хв. Для надання ковбасам специфічного смаку і аромату до фаршу додають спеції, прянощі, розчин нітриту натрію (якщо його не додавали при солінні). Яловичину зі спеціями перемішують 2-3 хв, а потім додають свинину і жирну м'ясну сировину, перемішуючи 2 хв. Наприкінці додають подрібнений шпик. Температура готового фаршу не повинна перевищувати 12° С.

Для сирокопчених і сиров'ялених ковбас готовий фарш перекладають у місткість шаром не більше 25 см і витримують одну добу для дозрівання за температури 2-4° С.

Для варених ковбас яловичину, свинину, баранину, що засолені у шматках або у шроті, подрібнюють на вовчку з діаметром отворів вихідної решітки 2-3 мм. Потім м'ясо подрібнюють і складають фарш у кутері в три стадії: на першій стадії, яка триває 2-3 хв, руйнується первинна структура яловичини або нежирної свинини. Процес відбувається за температури близько 0° С для утворення розчину солерозчинних білків. Для підтримання необхідної температури м'яса до нього періодично додають лід (сніг). На першій стадії до фаршу додають фосфати (за потреби), розчин нітриту натрію, нейтралізовану аскорбінову кислоту або її сіль. На другій стадії до фаршу додають порціями більшу частину води — до 40% , білкові добавки. Наприкінці другої стадії фарш, за рахунок тертя ножів, нагрівається до 8-10° С, після чого в нього додають спеції. Під час другої стадії утворюється водно-білковий розчин. Наприкінці другої стадії додають жировмісну сировину. У цьому разі температура фаршу повинна бути нижча 8° С, що пов'язано з уповільненням емульгування жирів і процесів кольороутворення за низьких температур. За температури від 8 до 14° С м'язові білки адсорбуються на поверхні подрібнених жирових часток, що сприяє

запобіганню утворенню жирових набряків під час термооброблення. Шпик, борошно, крохмаль, згідно з рецептурою, додають наприкінці процесу.

У разі дотримання режимів кутерування вода, яку додають до фаршу варених ковбас у кількості 10-40% , міцно зв'язується з білками, бере участь в емульгуванні жирів і утворенні в'язко-пластичної структури фаршу, надає йому соковитості та забезпечує високий вихід готового продукту.

Фарші ліверних ковбас, паштетів, кров'яних ковбас готують у три основних етапи: варіння або бланшування сировини, розбирання та подрібнення м'ясних компонентів, складання фаршу в мішалках та остаточне подрібнення в машинах тонкого подрібнення (колоїдних млинах тощо).

При подрібненні м'ясної сировини на кутерах спочатку подрібнюють нежирну м'ясну сировину (м'ясо, печінку), додають нем'ясні компоненти (молоко, яйця, борошно тощо). Наприкінці процесу додають жирну м'ясну сировину і кутерують до отримання однорідної маси. Під час приготування фаршу для сальтисонів, зельців та інших ковбас, що мають неоднорідну структуру, шматочки шпику, серця, язика додають за 1-2 хв. до закінчення процесу подрібнення.

Процес формування ковбасних виробів включає підготовку ковбасної оболонки, шприцювання (наповнення) фаршу в оболонку, в'язання з одночасним маркуванням і навішуванням на рами.

Термічне оброблення ковбасних виробів складається з таких технологічних процесів: осаджування, обсмажування, варіння, копчення, охолодження та сушіння.

Вихід варених ковбас становить 102-120% до маси основної сировини, напівкопчених — 75-84%, варено-копчених — 60-70% , сирокопчених та сиров'ялених — 55-60% .

1.2. Теплофізичні та електрофізичні властивості м'яса

Теплофізичні властивості м'яса (теплопровідність, теплоємність і температуропровідність) визначають характер і швидкість перебігу теплових процесів, які застосовують для отримання продуктів з новими якісними показниками. Більшість м'ясопродуктів за нормальних умов класифікують як колоїдні капілярно-пористі тіла [16].

Складна будова, наявність фазових переходів, а також біологічний характер походження роблять визначення теплофізичних і масо-вологообмінних характеристик дуже складним і здебільшого досить наближеним процесом.

Теплопровідність м'яса залежить не тільки від його стану, а й від напрямку теплотоку відносно поздовжньої осі м'язових волокон:

теплопровідність м'язової тканини в напрямку, паралельному волокнам, становить близько 0,88 теплопровідності у напрямку, перпендикулярному до волокон. Коефіцієнт теплопровідності м'язової тканини пісної яловичини дорівнює 0,5 Вт/(м·К), свинини напівжирної — 0,33, курятини — 0,41 Вт/(м·К) [16].

Підвищення вологості зумовлює характерні зміни теплофізичних властивостей не тільки м'яса, а й продуктів його переробки.

М'ясо можна розглядати як двохфазну систему. Одна з фаз — міжклітинна тканина — зображується напівпровідником з переважальними діелектричними властивостями, причому вважають, що ця фаза дуже стійка в живому організмі і мінлива в мертвому. Друга фаза — це внутрішньоклітинна речовина, що є електролітом.

Електрофізичні властивості відображають структурно-механічні й біохімічні зміни в м'ясі. Структурно-механічні характеристики є функцією багатьох факторів, серед яких важливе значення мають вологість і ступінь подрібнення продукту. Ці самі показники впливають і на електрофізичні характеристики. Меншою мірою, проте цілком визначено впливає на електрофізичні властивості зміна стану тканин унаслідок біохімічних процесів. Насправді, якщо розглядати клітини в живому організмі певною мірою електрично ізольованими одна від одної (наприклад, оболонка еритроцита має діелектричну сталу, яка дорівнює 2) можна вважати, що в результаті післязабійних процесів, що відбуваються в м'язовій тканині, діелектричні властивості клітинних оболонок мають порушуватися, а внаслідок деструкції тканин — утворюватися низькомолекулярні речовини, які «згладжуватимуть» ємнісний ефект [17].

Електропровідність клітинних утворень мало впливає на загальну електропровідність системи (всього 2-4 %). Безпосередньо через клітину проходить невеликий струм.

Визначені дані питомої електропровідності для подрібненого м'яса і м'ясного соку, що отримали пресуванням м'яса під тиском $203 \cdot 10^5$ Па, вказують на їх подібність як за абсолютним значенням, так і за температурою (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Питома електропровідність складових м'яса [16]

Температура, °С	Питома електропровідність $z \cdot 10^2$, Ом/см	
	подрібненої яловичини	м'ясного соку
25	0,62	0,65
30	0,65	0,69
35	0,68	0,74
40	0,72	0,77
45	0,75	0,80

Подібна картина спостерігається при вимірюванні електропровідності крові (табл. 1.3). Вона залежить від вмісту води.

Таблиця 1.3 – Електропровідність крові [16]

Вміст води, %	86,6	82,5	78,9	76,3	72,5	70,2	66,6
Електропровідність крові $\cdot 10^2$, Ом/см	0,17	0,28	0,36	0,25	0,41	0,38	0,32

1.3. Вплив автолізу на властивості м'яса

Після забою тварини, через припинення потрапляння кисню, відсутність кислотних перетворень і кровообігу, гальмування синтезу і виробництва енергії, накопичення в тканинах кінцевих продуктів обміну і порушення осмотичного тиску в клітинах у м'ясі відбувається саморозпад захиттєвих систем і самовільний розвиток ферментних процесів, які зберігають свою каталітичну активність тривалий час.

У результаті їх розвитку тканинні компоненти розпадаються, змінюються якісні характеристики м'яса (механічна міцність, рівень водозв'язувальної здатності, смак, колір, аромат) і його стійкість до мікробіологічних процесів.

Властивості м'яса змінюються у певній послідовності відповідно до основних етапів автолізу (парне м'ясо — посмертне задубіння (Rigor mortis) — послаблення посмертного задубіння і визрівання — глибокий автоліз). Його якісні показники при цьому істотно відрізняються. Парне нормальне м'ясо (до 3 год. після забою) має добру консистенцію і високу водозв'язувальну здатність (рис. 1.2) [108].

Упродовж першої доби після забою розвиток автолізу призводить до різкого зниження водозв'язувальної здатності, зростання механічної міцності, зниження рН від 6,5 - 7,0 до 5,5 — 5,6, погіршення смаку і запаху.

Основою автолітичних перетворень м'яса є зміни вуглеводної системи, системи ресинтезу АТФ, стану міофібрилярних білків, що входять у систему скорочення.

Оскільки кисень не потрапляє в організм тварин після забою, ресинтез глікогену в м'ясі відбуватися не може, тому починається його анаеробний розпад, який здійснюється у результаті фосфоролізу і амілолізу з утворенням молочної кислоти і глюкози (рис. 1.3). Швидкість гліколізу можна регулювати: введення хлориду натрію в парне м'ясо пригнічує процес, використання електростимулювання — прискорює. Інтенсивний захиттєвий розпад глікогену може спричинити стресові ситуації у тварин.

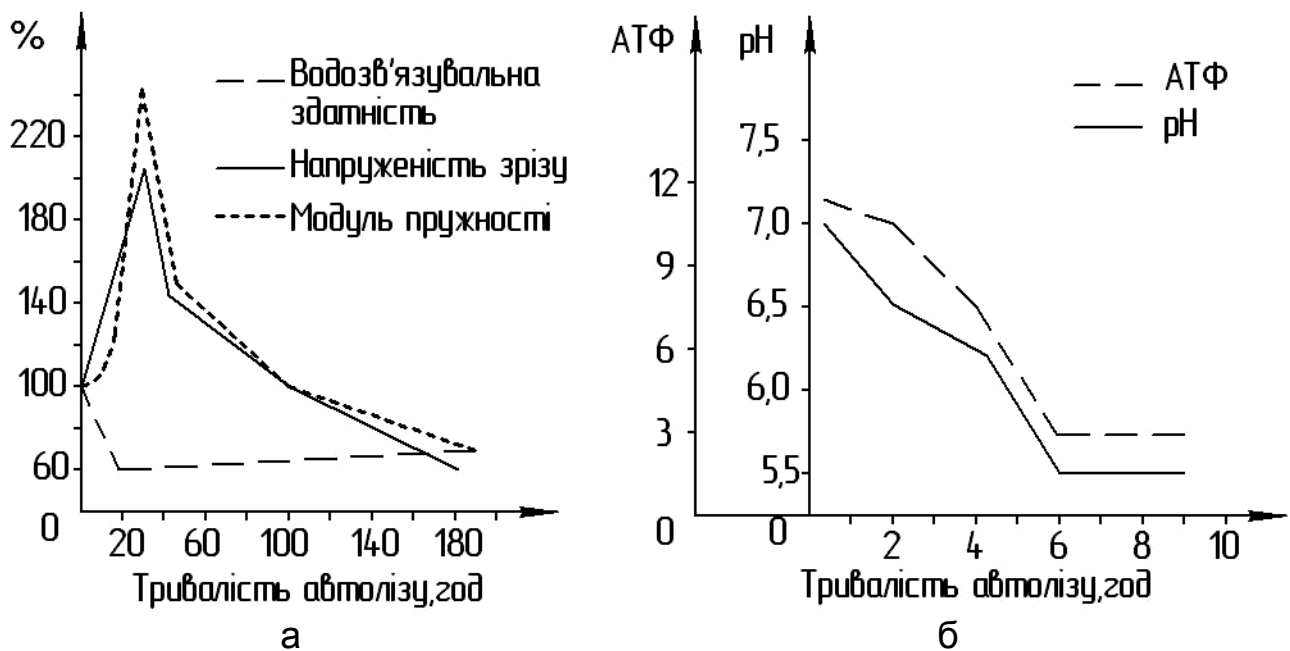


Рис. 1.2 – Зміни функціональних властивостей м'яса під час автолізу: а - водозв'язувальної здатності, напруженості зрізу та модуля пружності під час автолізу; б - активної кислотності pH та вмісту аденозинтрифосфатної кислоти

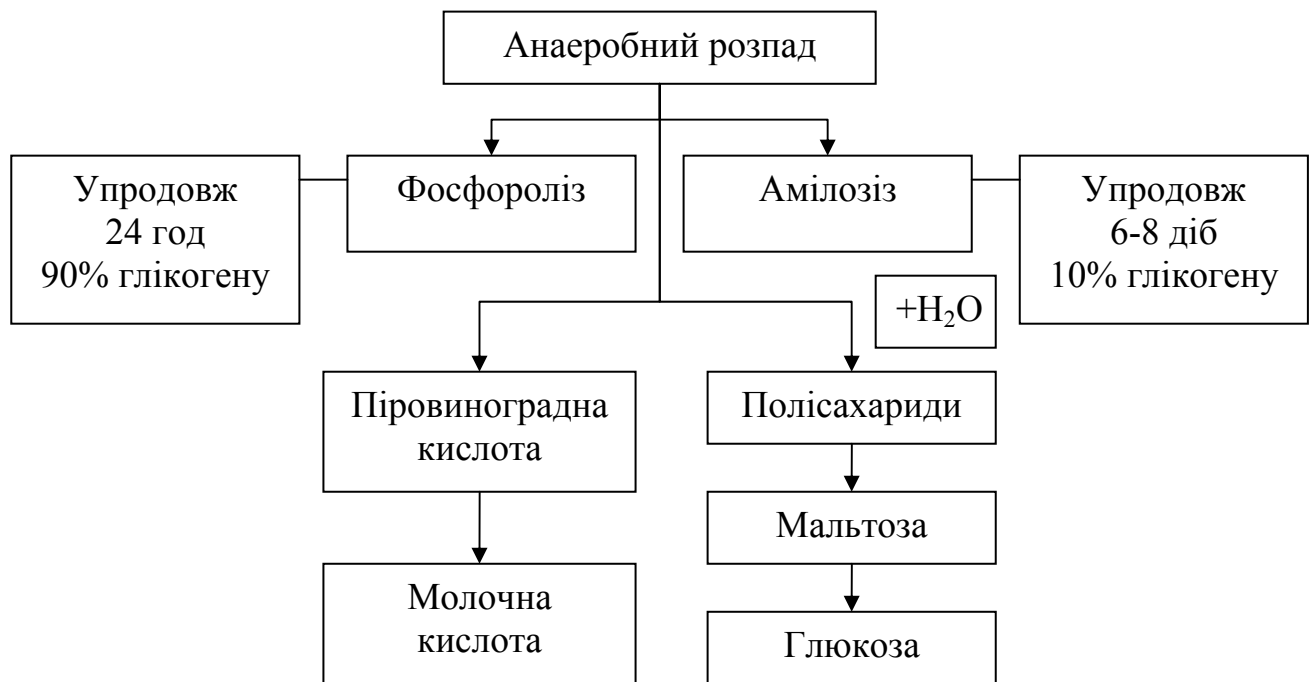


Рис. 1.3 – Скорочена схема анаеробного розпаду глікогену

Через 24 год. гліколіз припиняється внаслідок вичерпання запасів АТФ і накопичення молочної кислоти, яка приглушує фосфороліз.

Ферментативний розпад глікогену є пусковим механізмом для розвитку наступних фізико-хімічних і біохімічних процесів. Накопичення молочної кислоти призводить до зміщення рН у кислий бік від 7,2 - 7,4 до 5,4 - 5,8 (див. рис. 1.2).

Накопичення молочної (і фосфорної) кислоти, як зазначалося, істотно впливає на стан м'язових білків, що, в свою чергу, визначає технологічні властивості м'яса, консистенцію, водозв'язувальну здатність, емульгуючі й адгезійні показники.

1.4. Автоліз м'яса з різними значеннями водневого показника

Нині питання цілеспрямованого використання сировини з урахуванням характеру автолізу набуло особливого значення, оскільки істотно зросла кількість тварин, які потрапляють на переробку після відгодівлі на промислових комплексах. У цих тварин після забою в м'язовій тканині виявляються значні відхилення від звичайного розвитку автолітичних процесів.

У зв'язку з цим розрізняють м'ясо з високим кінцевим значенням рН (DFD) і ексудативне м'ясо (PSE) з низьким значенням рН.

М'ясо з ознаками DFD (темне, тверде, сухе) через 24 год після забою має рівень рН понад 6,3, темне забарвлення, грубу структуру волокон, високу водозв'язувальну здатність, підвищену липкість. Воно характерне для молодняку великої рогатої худоби, який зазнає впливу різних видів тривалого стресу до забою внаслідок зажиттєвого розпаду глікогену. Кількість утвореної після забою молочної кислоти в м'ясі таких тварин невелика, міофібрилярні білки в м'ясі DFD добре розчиняються.

Високе значення рН обмежує тривалість його зберігання, тому м'ясо DFD є непридатним для виробництва сирокочених виробів. Проте, завдяки високій водозв'язувальній здатності, його доцільно використовувати для виробництва емульгованих (варених) ковбас, солених виробів, швидкозаморожених напівфабрикатів.

Ексудативне м'ясо PSE (бліде, м'яке, водянисте) характеризується світлим забарвленням, м'якою пухкою консистенцією, виділенням м'ясного соку внаслідок зниження водозв'язувальної здатності, кислим смаком.

Ознаки PSE найбільше має свинина, яку отримують після забою тварин з інтенсивною відгодівлею і обмеженим рухом при утриманні.

Поява ознак PSE може зумовлюватися генетичними наслідками, впливом короткочасних стресів, надмірною збудженістю тварин.

Найчастіше м'ясо з ознаками PSE отримують у літній період часу. Насамперед ексудативності підлягають найцінніші частини туші: довгастий м'яз і окости.

Після забою таких тварин у м'язовій тканині відбувається інтенсивний розпад глікогену, посмертне задубіння настає швидше.

Упродовж 60 хв значення рН м'яса знижується до 5,2 — 5,5, проте оскільки у цей період температура сировини зберігається на високому рівні, відбувається конформація саркоплазматичних білків і їх взаємодія з білками міофібрил. У результаті цього змінюються стан і властивості м'язових білків, різко знижується водозв'язувальна здатність сировини.

М'ясо з ознаками PSE через низькі значення рН (5,0 - 5,5) і водозв'язувальної здатності є непридатним для виробництва емульгованих (варених) ковбас, варених і сирокочених окостів, що призводить до погіршення органолептичних характеристик готових виробів (світле забарвлення, кислуватий присмак, жорстка консистенція, знижена соковитість), зниження їх виходу.

Однак, у поєднанні з м'ясом нормальної якості або із соєвим ізолятом воно стає придатним для виготовлення емульгованих і сирокочених ковбас, січених і панірованих напівфабрикатів та інших видів м'ясних виробів.

Розділ 2. Структура, реологічні моделі та механічні характеристики біополімерів м'яса

2.1. Структура і моделі м'яса та м'ясопродуктів

Значний об'єм серед готових до споживання м'ясопродуктів займають ковбасні вироби. Під час приготування фаршу для ковбас м'ясо піддають інтенсивному ручному і машинному обробленню. Тому аналіз структурних і механічних властивостей м'яса є важливим елементом для раціонального вибору м'ясоподрібнювальних машин та інструментів у виробництвах м'ясних виробів, фаршу, напівфабрикатів і ковбасних виробів.

Детальне вивчення основних складових сировинної бази м'ясопереробної промисловості сприяло поглибленню знань в області виявлення властивостей біологічної сировини і сприяло більш цілеспрямованій роботі над створенням та удосконаленням м'ясорізальних машин з метою впровадження енергозберігаючих технологій у приготуванні високоякісних м'ясних виробів і напівфабрикатів [17-28].

Важливим є створення математичних моделей м'ясних біополімерів і аналітичної оцінки структурно-механічних властивостей м'яса та шпику, визначення зусиль, необхідних для подрібнення м'язових волокон, та з'єднувальної тканини, що суттєво залежать від фізико-механічних властивостей структурних складових і впливають на енергетичні показники різання, технологічні процеси приготування і способи забезпечення високої якості м'ясопродуктів та напівфабрикатів.

Такі дослідження ґрунтуються на аналітичному узагальненні знань з анатомії тварин, закономірностей фізико-хімічної механіки матеріалів, теорії різання органічних і синтетичних матеріалів для оцінки структури та механічних властивостей м'яса та м'ясопродуктів, побудові їх механічних моделей для забезпечення раціонального проектування м'ясопереробних машин та інструментів.

Загалом м'ясо та м'ясопродукти мають складну внутрішню структуру. До складу м'яса, крім м'язової тканини, входять всі види з'єднувальної тканини, нервова тканина, кровоносні та лімфатичні вузли, кров. При приготуванні фаршу варених ковбасних виробів в якості сировини використовуються, в основному, скелетна м'язова тканина свиней (рис.2.1) [24].

М'язова тканина м'ясопромислових тварин являє собою неоднорідне за складом середовище, основу якого складають не клітини, а якісно нові утворення – сімпласти. Вони мають вигляд циліндрів-волокон діаметром від 10 до 150 мкм і довжиною від декількох міліметрів

до 0,15 м і більше [18,19,20]. Всередині м'язового волокна міститься рідинна фаза (саркоплазма), а також ядра, білкові міофібрили (нитки).

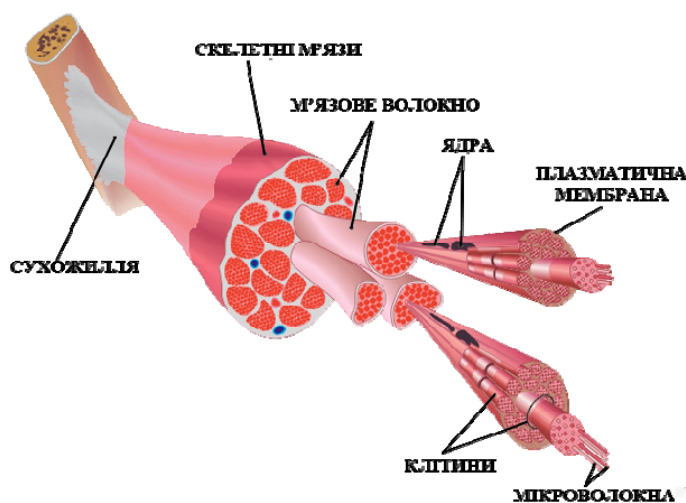


Рис. 2.1 – Структура м'язів

Білкові скорочувальні нитки-актин і міозин (рис. 2.2) можуть взаємодіяти одна з одною за допомогою активних груп і утворювати комплексний білок (актоміозин). Рідка саркоплазма являє собою концентрований золь білків переважно глобулярного типу. Крім того, в ній містяться жири, солі та інші речовини.

М'язові волокна вкриті саркоплазмою, яка складається з двох шарів мембран. Зовні кожне м'язове волокно окутане мережею кровоносних капілярів і дуже тонкими колагеновими волокнами, які вкриті фібрилами і, в свою чергу, утворюють навколо волокна дуже тонку сітчасту з'єднувальну оболонку – ендомізій [18,19]. Вільні кінці колагенових фібрил, розташованих на оболонці волокон, збираючись у пучки, утворюють сухожилльні пучки (волокна) першого порядку. Ендомізій окремих м'язових волокон, зростаючись, об'єднує м'язові волокна в первинні пучки, які вкриті більш щільною з'єднувальною оболонкою – перемізієм. М'язові волокна всередині первинних пучків розташовуються, як правило, в одному напрямі і пов'язані з внутрішньом'язовими з'єднувальними прошарками за допомогою пальцевих виступів і ендомізійу.

Первинні пучки м'язових волокон за допомогою перемізію з'єднують м'язові волокна у вторинні і третинні пучки [19,20]. При цьому з'являється м'язове черевце – основна частина скелетного м'яза.

З'єднувальні прошарки між первинними пучками м'язових волокон пронизані кровоносними і лімфатичними судинами, нервами і жировими клітинами. Зовні м'яз вкритий щільним шаром з'єднувальної тканини – епімізієм. Внутрішні і зовнішні з'єднувальні оболонки, зростаючись,

утворюють з'єднувальний остов м'язів. Він надає м'язам форму і прикріплює їх до кісток скелету.

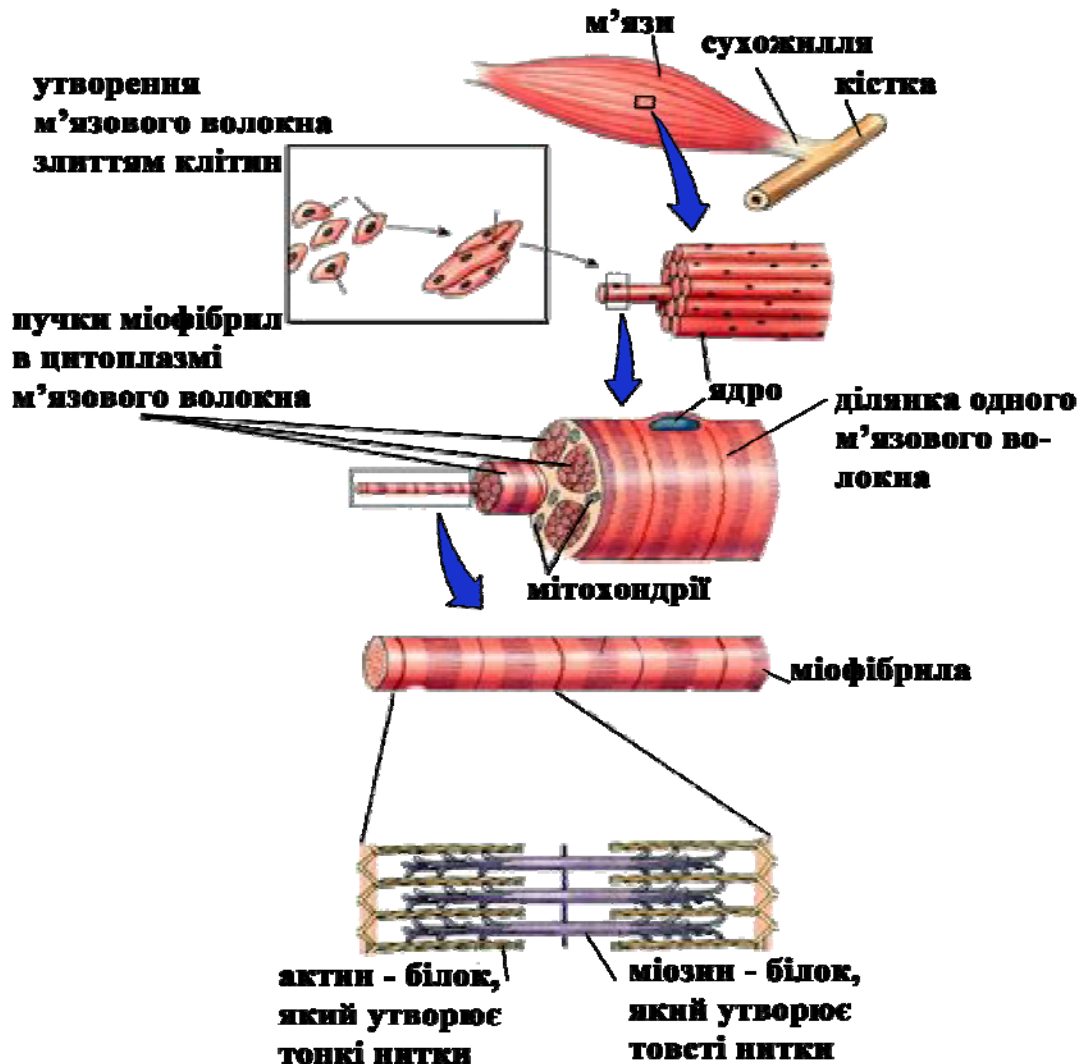


Рис. 2.2 – Будова м'язової тканини м'ясопромислових тварин

Основу з'єднувального остова складають колагенові волокна і, в значній мірі, еластинові і ретикулінові волокна. Колагенові первинні волокна мають діаметр близько декількох десятків мікрометрів і складаються з фібрил діаметром $\sim 0,2$ мкм. Вони мають велику міцність і розриваються при навантаженні, яке інколи становить 600 МПа [19,20,21].

Колагенові фібрили мають складну будову і об'єднують більш тонкі протофібрили. Протофібрили складаються з макромолекул колагену довжиною близько 2800 Å і діаметром близько 14 Å [18,20]. Макромолекули в протофібрилах з'єднуються одна з іншою боковими водневими зв'язками та міжфібрилярною речовиною [19,20,22].

З віком у тварин колагенові волокна товщають, що викликає підвищення міцності м'яса у дорослих тварин у порівнянні з більш молодими.

Еластинові волокна складають незначну частину м'язового з'єднувального каркасу. Їх діаметр складає близько 10 мкм. При розтягуванні вони можуть подовжуватись до 150%, а потім розриватись. Їх міцність на розрив не перевищує $(20\div 30) \cdot 10^5$ Па. Якщо розтягнуте волокно розвантажити, то воно, як пружина, приймає початкову форму [19,20]. Очевидно еластинові волокна являються одними з тих елементів остова, які надають м'ясу пружних властивостей.

Кількість і міцність еластинових і колагенових волокон в з'єднувальному остові м'язів залежить від виду і віку тварин, анатомічного розташування їх м'язів, рівня фізичних навантажень при житті тварини та інших чинників.

Кількість з'єднувальних білків складає, в середньому, для м'яса I гатунку – 3,9%, II гатунку – 5,1%, III гатунку – 11,2% [20,21].

Загалом структурно-механічні властивості м'ясопродуктів визначаються їх структурним складом і фізичним станом. До особливостей скелетних м'язів відноситься також процес зміни їх жорсткості з плином часу після забою тварини. Зміна жорсткості м'яса в процесі автолізу пов'язана не тільки з ферментативною аденозінтрифосфатною активністю білкових фракцій міозину і актину саркоплазми м'язових волокон, але також з біохімічними змінами водневих і білкових компонентів внутрішньом'язової тканини [21]. Тільки після 2÷6 діб автолізу (за температури 0÷4°C) настає зниження жорсткості м'яса і покращення його споживчих показників.

Опір різанню колагенових волокон складає близько 41кН/м, а еластинових близько – 28 кН/м. Звичайно, що він залежить від мікрогеометричних параметрів різальних лез. Зусилля, необхідні для розрізання м'язових волокон, значно менші, ніж для руйнування з'єднувальних тканин. Залежно від рівня фізико-механічних властивостей колагенових і еластинових волокон в м'ясній тканині її опір різанню змінюється для різних м'язів від ~1,5 до ~ 9,0 кН/м [24]. Встановлено, що опір різанню м'яса також залежить від тривалості і умов його зберігання після забою [21,23]. Спроба кількісно пов'язати величину зусиль різання м'яса з кількістю з'єднувальних тканинних білків у ньому [25] не дала досить достовірних результатів через складність визначення кількісного співвідношення з'єднувальних тканинних білків у м'ясі і зміни їх структури і міцності залежно від породи, способів відгодівлі, віку тварин та інших чинників.

Шпик відноситься до жирових тканин, розташованих під шкірою свиней. Він є видозміненою рихлою з'єднувальною тканиною (рис.2.3)

[33], клітини якої заповнені жиром. Жирові клітини шпика мають овальну форму з розмірами близько $(60 \div 150) \cdot 10^{-6}$ м [18,25,27,28] і об'єднані з'єднувальним тканинним каркасом у щільні пакети. Товщина оболонки між клітинами всередині пакета незначна (до 800 ангстрем). Між пакетами розташовані товсті шари сполучної тканини, в яких розподілені великі кровоносні і лімфатичні судини та вузли.

Шпик розділений шаром сполучної тканини, розташованої паралельно до шкірного покриву, поділяється на два різних за анатомічним походженням шари. Поверхневий шар - це елемент шкірної дерми, перетвореної в процесі розвитку тварини в жирову тканину. Цей шар характеризується товщим і щільнішим з'єднувальним тканинним каркасом. Внутрішній шар шпика, розташований з боку туші, є підшкірним шаром, який переродився у жирову тканину. Він містить більш рихлу з'єднувальну тканину і в менших кількостях. Загальна товщина шпика знаходиться в межах від 0,015 до 0,1 м [25, 27].

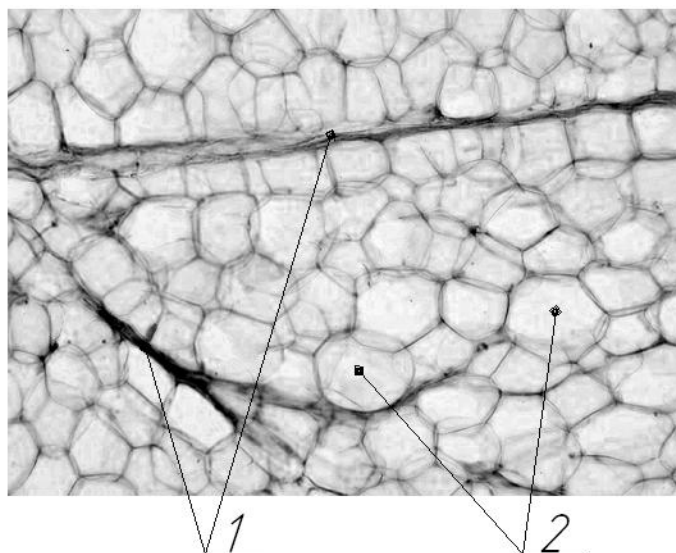


Рис. 2.3 – Зріз жирової тканини: 1- пухка сполучна тканина, по якій проходять судини та нерви; 2- жирова клітина

Хімічний склад і товщина шару шпика залежать від віку і породи тварин, способу відгодівлі та інших чинників. У шпику може міститися від 80 до 94% жирів, 5-10% води, 0,5-5,0% білків, до 0,8% мінеральних речовин і незначна кількість інших речовин [28, 22, 21].

Питоме зусилля різання шпика при температурі від 268 до 293К складає $(0,4 \div 12,8) \cdot 10^4$ Н/м [25,29].

Загалом м'ясо є складним біополімером, деформаційну поведінку якого при різанні можна описати за допомогою загальноприйнятих механічних моделей реологічних тіл (рис. 2.4). Так, для спрощення складання реологічних рівнянь різних біотехнологічних продуктів

застосовують механічні моделі (пружину, пару тертя ковзання, циліндр з рідиною і поршень з отворами), які імітують основні властивості простих ідеальних тіл (пружність, пластичність, в'язкість) [31].

Моделі простих ідеальних тіл можна комбінувати, розташовуючи їх паралельно, послідовно, змішано. В комбінаціях кількість простих елементів може сягати 10-20, але практика показує, що застосування в моделях більше трьох, чотирьох елементів значно ускладнює можливості спостереження за поведінкою тіл при одночасній зміні такої кількості їх властивостей.

Основними складними моделями, що застосовуються для моделювання реальних м'ясних продуктів є моделі пружньо-в'язкого тіла з релаксацією деформацій (тіло Максвелла), в'язко-пружного тіла з релаксацією напружень (тіло Фойгта-Кельвіна), в'язко-пластичного тіла (Шведова-Бінгама) та деякі інші.

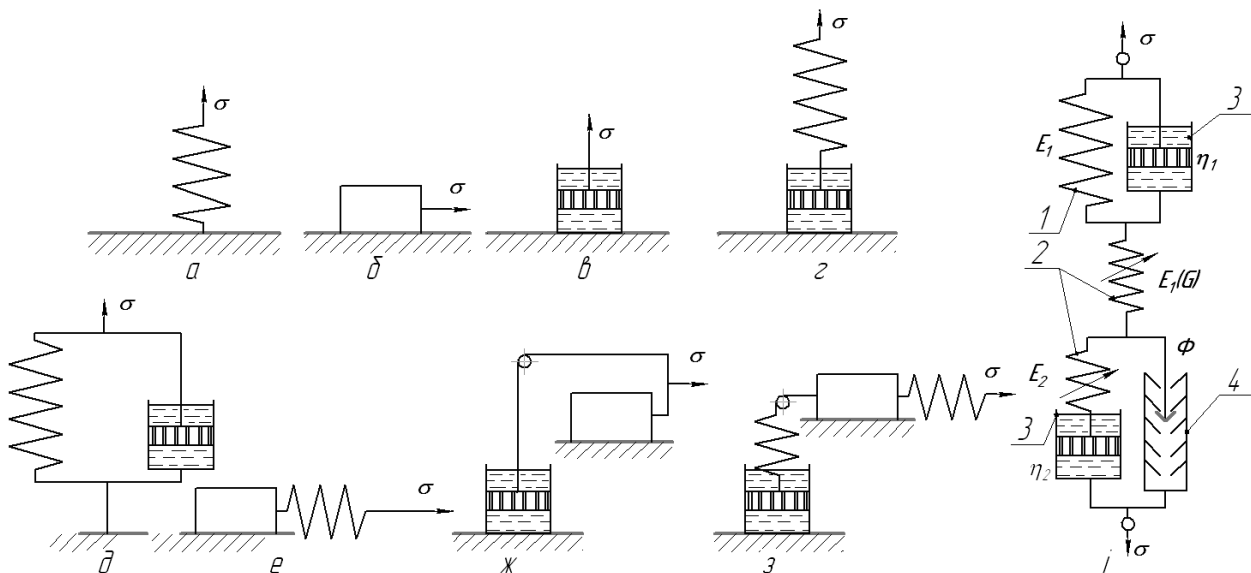


Рис. 2.4 – Механічні моделі реологічних тіл: а – пружнього (пружина); б – пластичного (пара тертя ковзання); в - в'язкого (циліндр і поршень з отворами); г - пружньо-в'язкого з релаксацією деформацій; д - пружньо-в'язкого з релаксацією напружень; е – пружньо-пластичного; ж - пластично-в'язкого; з – пружньо-пластично-в'язкого з релаксацією деформацій; і – механічна модель незруйнованої м'язової тканини м'яса; 1 – лінійно пружній елемент; 2 – нелінійно-пружній елемент; 3 - в'язкий елемент; 4 – елемент, що фіксує визначене значення деформації

Достатню точність і кореляцію з експериментальними результатами дають моделі, що складаються з трьох, або чотирьох елементів простих моделей (рис. 2.4, а-в). Так, наприклад, для опису поведінки м'ясопродуктів, які мають одночасно пружньо-пластично-в'язкі властивості, може бути запропонована механічна модель, що складається з двох пружніх, пластичного і в'язкого тіл (рис. 2.4, з). Така

модель достатньо точно описує поведінку м'ясних фаршів, яким притаманні одночасно три властивості – пружність, пластичність і в'язкість.

Для моделювання реологічної характеристики цільної м'язової тканини може бути запропонована механічна модель подана на рис. 2.4, і. Структура м'язової тканини складається з м'язових волокон, зв'язаних з'єднувальною плівкою. Всі проміжки структури заповнені тканиною. Такі структури мають ряд властивостей твердих тіл, але, в той же час, еластичні і пластичні, що необхідно враховувати при виборі найбільш доцільних способів і режимів подрібнення і подальшої технологічної обробки.

Загальна деформація механічної моделі м'язової тканини (див. рис. 2.4, і) складається з нелінійно-пружної з модулем пружності $E_1(\sigma)$, що забезпечується елементом 2, еластичної з модулем пружності E_1 , в'язкістю η_1 , що забезпечується паралельно з'єднаними елементами 1 і 3 і пластичної з нелінійним модулем пружності $E_2(\sigma)$, в'язкістю η_2 і фіксатором Φ , що забезпечується послідовно з'єднаними елементами 2 і 3 з приєднаним до них елементом-фіксатором 4. Модель математично легко описується нелінійним реологічним диференціальним рівнянням другого порядку [34].

$$t \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d}{dt^2} \left[\frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{d}{dt} \left[\frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{\tau}{\eta} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_2}, \quad (2.1)$$

де $E(\sigma) = E_1(\sigma) \cdot E_2(\sigma) / [E_1(\sigma) + E_2(\sigma)]$ - приведений нелінійний модуль пружності;

$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 / (\eta_1 + \eta_2)$ - приведений коефіцієнт в'язкості;

$\tau = \eta_1 / E_1$ - період релаксації деформації;

ε - деформація тіла;

t - час спостереження повзучості;

σ - прикладене навантаження.

В процесі різання м'ясопродуктів, коли термін взаємодії різальних органів з ними малий і вони не встигають проявити всі особливості високоеластичної деформації, тоді їхні моделі можуть бути подані у вигляді пружних тіл, що мають деяку в'язкість. Крім того, деформація в зоні різання не завжди пропорційна навантаженню, тому що на цей процес впливає внутрішнє тертя в м'ясопродукті, яке виникає внаслідок зміщення окремих волокон на величину пластичної деформації. В момент перерізання волокон деформація дещо зменшується за рахунок часткового втягування їх в основну матрицю. Проте сумарна деформація залишається на досягнутому рівні. Цей вид деформації м'ясопродуктів може бути проілюстрований за допомогою поданої на рис. 2.4, г механічної моделі, яка складається всього з двох елементів – нелінійного

пружного $E^*(\sigma)$ і в'язкого η^* . Тоді величина загальної деформації моделі під дією навантаження σ буде такою:

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_v, \quad \text{або} \quad \varepsilon = \sigma/E^*(\sigma) + \sigma \cdot t/\eta^*, \quad (2.2)$$

де ε_n и ε_v - величина, відповідно, пружної і в'язкої деформацій;

σ - величина діючого навантаження, Н;

t – час дії навантаження, с

$E^*(\sigma)$ та η^* - відповідно, комплексний модуль пружності і в'язкість середовища.

Аналогічно можна скласти механічні моделі і розрахувати біореологічні характеристики будь-якого м'ясопродукту, що є основою для вибору раціонального режиму процесу його подрібнення, оптимізації геометричних параметрів різальних інструментів і підґрунтям для проектування надійних м'ясоподрібнювальних машин з економічним енергоспоживанням.

Таким чином, м'ясо є волокнистою і частково орієнтованою багатофазною системою. Основним компонентом сухої речовини в м'ясі є білки. Окремі структурні елементи м'ясних тканин пов'язані між собою складними і різноманітними за природою мікро- і макрозв'язками.

Структуру таких складних біополімерів з пружньо-пластично-в'язкими властивостями можна моделювати з використанням механічних моделей, що дасть можливість адекватно оцінити силові, деформаційні та енергетичні характеристики процесу різання м'ясопродуктів, раціонально організувати подрібнення, підібрати обладнання і різальний інструмент для виробництва високоякісних ковбасних, м'ясомістких виробів і напівфабрикатів.

2.2. Електричні аналоги механічних реологічних моделей м'ясних і м'ясомістких продуктів

Переважає більшість м'ясомістких середовищ є дисперсними системами, суспензіями, колоїдними розчинами. Тому аналіз структурно-механічних характеристик (СМХ) цих середовищ і їх моделювання є важливим засобом для раціонального вибору м'ясоподрібнювальних машин та інструментів у виробництвах м'ясних виробів, фаршу, напівфабрикатів і ковбасних виробів [35].

Детальне вивчення основних реологічних моделей харчових продуктів, зокрема сировини для м'ясопереробної промисловості, сприяло поглибленню знань в області виявлення властивостей біологічної сировини і сприяло використанню моделювання для дослідження пружно-в'язко-пластичних властивостей м'ясних фаршів [35,36].

Створення електричних реологічних моделей м'ясних біополімерів і доведення можливостей їх застосування для вивчення пружно-в'язко-

пластичних властивостей м'ясопродуктів, необхідних для організації раціональних процесів їх подрібнення має важливе наукове і практичне значення.

Дослідження ґрунтуються на аналітичному узагальненні закономірностей фізико-хімічної механіки біополімерів, теорії різання органічних матеріалів, способах оцінки структури та механічних властивостей м'яса та м'ясопродуктів, узагальненні механічних та застосуванні сучасних методів побудови електричних реологічних моделей харчової сировини та продуктів її переробки.

Раніше відмічалось, що до складу м'яса, крім м'язової тканини, входять всі види з'єднувальної тканини, нервова тканина, кровоносні та лімфатичні вузли, кров. В процесі технологічної обробки один і той же продукт переходить з одного реологічного стану в інший, часто протилежний за властивостями першому. Ці зміни при переробці сировини у готовий продукт відбуваються за рахунок трансформації внутрішньої енергетики матеріалу, а характеризуються роботою, здійсненою за рахунок реалізації різних процесів: грубого і тонкого подрібнення, перемішування і формування готових виробів.

В'язкість неньютонівських матеріалів, до яких належить м'ясний фарш, залежить від швидкості деформації під дією зусиль різання, пов'язаної із його структурою та її зміною при течії. У свою чергу текучість фаршу залежить від його природи і фізико-хімічних властивостей: форми і розташування молекул, концентрації, температури, вологості, міцелоутворення тощо [35]. Додаванням інгредієнтів до фаршу можна збільшити або зменшити його в'язкість і, тим самим, змінити його здатність до деформування і перетікання.

Для описування текучості ковбасного фаршу найбільш прийнятним є рівняння течії бінгамівської рідини:

$$\theta = \theta_0 + \eta_{nl} \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

θ - напруження зсуву;

θ_0 - межа плинності (початкове напруження зсуву);

η_{nl} - пластична в'язкість;

$\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву.

При течії ковбасного фаршу з високими значеннями градієнтів швидкостей їх структура руйнується і значення СМХ знижується. Реологічні характеристики різних видів фаршу істотно відрізняються. До певної міри вони показують якісний стан структури продуктів, тобто склад, ступінь механічної обробки тощо. Течію ковбасного фаршу інколи також можна описати загальним рівнянням Гершеля-Балклі [37].

У табл. 2.1 приведені характеристики граничного напруження зсуву (ГНЗ) і в'язкості різних видів фаршу за температури 10°C. Ці характеристики можуть відрізнятися в залежності від рецептури м'ясних продуктів на різних м'ясопереробних підприємствах досить істотно (до 60%). При розрахунку обладнання для механічної обробки ковбасного фаршу і його робочих органів варто виходити з найбільш вірогідних значень реологічних характеристик продукту, які можуть мати місце на практиці.

Таблиця 2.1 – Характеристики зсуву різних видів фаршу при 10 °С

Фарш	ГНЗ, Па	В'язкість, Па·с
Яловичий (кутерований з водою)	700	18-20
Свинячий (кутерований з водою)	650	19-22
Ковбаси любительської	700	18-28
Ковбаси докторської	540	16-19
Ковбаси чайної	500	-
Ковбаси ліверної	2200	-
Сосисок свинячих	450	9-11

СМХ фаршу залежать від його складу і ряду технологічних чинників (температури, вологоутримання, ступеня подрібнення, тривалості перемішування, тиску тощо).

На основі вивчення механічних моделей Бінгама, Шведова, Шоффільда-Скоттблера, Максвелла, Фойгта-Кельвіна і проведених досліджень [35,38] для опису поведінки ковбасного фаршу при механічній обробці була запропонована механічна модель, яка складається з моделі Бінгама з елементом, що відображає втрату міцності фаршу при різанні (рис. 2.5).

При подрібненні тиск через ніж передається фаршу, який подрібнюється при напруженні, що перевищує граничне напруження різання (θ_r). Час прикладення сили різання настільки малий, що миттєво досягається граничне напруження різання. Подрібнені частки фаршу спочатку в'язко-пружно деформуються ($G, \eta_{пл}$), а потім, при напруженні, що перевищує граничне напруження зсуву (θ_0), фарш пластично деформується і починає текти. При перемішуванні і формуванні фарш поводить себе подібно до тіла Бінгама, що поєднує пружність, в'язкість і пластичність.

Реологічні рівняння механічної моделі ковбасного фаршу можна отримати наступним чином.

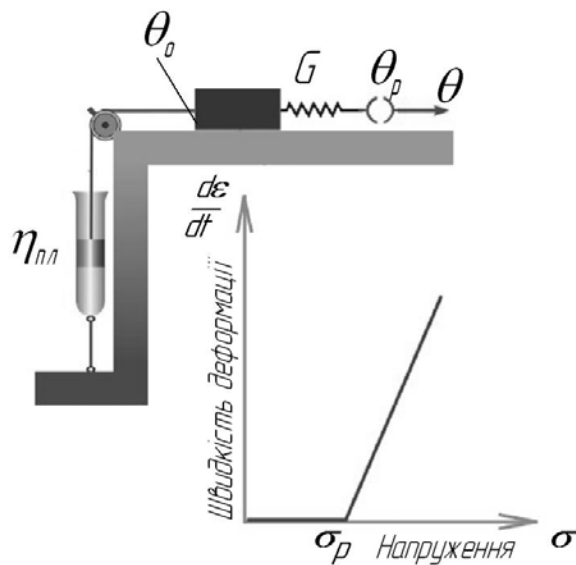


Рис. 2.5 – Механічна реологічна модель ковбасного фаршу при різанні.

Загальна деформація моделі ковбасного фаршу дорівнює сумі деформацій

$$d\gamma = d\gamma_G + d\gamma_H + d\gamma_C + d\gamma_P, \quad (2.4)$$

де $d\gamma_G$, $d\gamma_H$, $d\gamma_C$, $d\gamma_P$ - деформації, відповідно, тіла Гука, Ньютона, Сен-Венана і елемента, що відбиває втрату міцності фаршу при різанні.

Беручи похідну від лівої і правої частин рівняння (2.4), отримаємо:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_G}{dt} + \frac{d\gamma_H + d\gamma_C}{dt} + \frac{d\gamma_P}{dt}. \quad (2.5)$$

Величину $\frac{d\gamma_H + d\gamma_C}{dt}$ визначимо з рівняння реологічної моделі тіла Ньютона з урахуванням умови Сен-Венана:

$$\frac{d\gamma_H + d\gamma_C}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{\theta - \theta_0}{\eta_{nl}} \quad (2.6)$$

Величину $\frac{d\gamma_G}{dt}$ визначимо з рівняння реологічної моделі тіла Гука:

$$\frac{d\gamma_G}{dt} = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\theta}{dt}. \quad (2.7)$$

Величину $\frac{d\gamma_P}{dt}$ визначимо з рівняння реологічної моделі тіла Ньютона:

$$\frac{d\gamma_P}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{\theta_P}{\eta_{nl}}. \quad (2.8)$$

Підставивши рівняння (2.6-2.8) в (2.5), отримаємо рівняння реологічної моделі ковбасного фаршу:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta - \theta_0 - \theta_P}{\eta_{nl}}, \quad (2.9)$$

де θ_p - граничне напруження різання.

Механічна реологічна модель ковбасного фаршу і її математичний опис (2.9) потрібні не лише для об'єктивної оцінки консистенції фаршу, але і для можливості оцінки його поведінки на всіх стадіях комплексної механічної обробки.

Виявилось, що моделювання поведінки пружньо-в'язко-пластичних м'ясних продуктів можна проводити на підґрунті не лише механічних моделей, але і електричних. При цьому механічне напруження можна зіставляти з напругою електричного ланцюга, швидкість деформації – з величиною електричного струму, модуль пружності - із величиною електричної ємності, а в'язкість - з опором електричного ланцюга.

Послідовне з'єднання елементів механічної моделі еквівалентне паралельному з'єднанню елементів електричного ланцюга, а паралельне - послідовному з'єднанню в електричній схемі. Для складання електричної моделі замість реологічних моделей Гука, Ньютона і Сен-Венана можна застосувати моделі Генрі, Ома і Фарадея.

В ідеальному пружному тілі Гука - Фарадея електроенергія, витрачена на зарядження, накопичується і може бути повернена при розрядженні. Ідеально в'язка рідина Ньютона - Генрі характеризується тим, що в ній електрична напруга пропорційна силі струму. Ідеальнопластичне тіло Сен-Венана - Ома може бути змодельоване у вигляді електричного опору. При переміщенні зарядів у в'язко-пластичних матеріалах начеб-то опір протидіє їх руху. На подолання цієї протидії витратиться електроенергія, яка перетвориться в тепло.

Фізична поведінка в'язко-пластичних матеріалів пояснюється характером їх структури, яка протидіє руху при збільшенні напружень, а при їх зменшенні знижує межу текучості.

Електрична аналогія моделі поведінки в'язко-пластичних матеріалів складається з елементів Генрі, Ома і Фарадея. Елементи Ома і Генрі з'єднані послідовно, а разом - паралельно з елементом Фарадея (рис. 2.6).

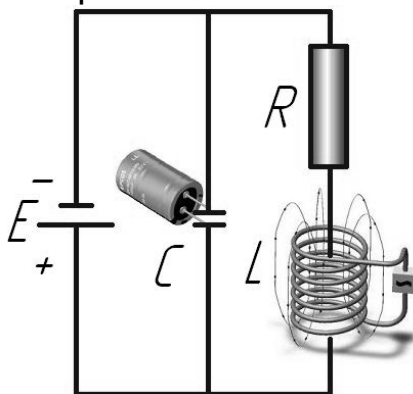


Рис. 2.6 – Електричний аналог механічної реологічної моделі ковбасного фаршу при різанні.

Розглянемо ділянку ланцюга з послідовним з'єднанням елементів R і L. На кожен з елементів подається напруга U_R і U_L .

За другим законом Кірхгофа для миттєвих значень:

$$U = U_R + U_L \quad (2.10)$$

Повний опір ділянки ланцюга буде дорівнювати:

$$Z_1 = R + X_L, \quad (2.11)$$

де R - електричний опір елемента Ома,

X_L - електричний опір елемента Генрі.

Запишемо закон Ома для ділянки ланцюга:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{R + X_L}. \quad (2.12)$$

При паралельному з'єднанні двох розгалужень ланцюга, виходячи з першого закону Кірхгофа, запишемо:

$$I = I_1 + I_2, \quad (2.13)$$

де I_1 , I_2 - струми в паралельних гілках; I - загальний струм.

Повний опір ділянки ланцюга буде дорівнювати:

$$Z_2 = \frac{X_C \cdot Z_1}{X_C + Z_1} = \frac{X_C \cdot (R + X_L)}{X_C + R + X_L}, \quad (2.14)$$

де X_C - електричний опір елемента Фарадея.

Тоді загальний струм ділянки ланцюга:

$$I = \frac{U}{X_C} + \frac{U}{Z_1}. \quad (2.15)$$

Враховуючи, що

$$X_C = \frac{1}{314 \cdot C}.$$

Можна записати рівняння електричної аналогії моделі бінгамівського середовища:

$$I = 314 \cdot U \cdot C + \frac{U}{R + X_L}. \quad (2.16)$$

Застосування електричних моделей може спростує дослідження пружньо-в'язко-пластичних властивостей м'ясопродуктів при їх подрібненні та змішуванні.

Таким чином структуру складних біополімерів м'ясопродуктів з пружньо-пластично-в'язкими властивостями можна моделювати з використанням механічних та електричних моделей, що дозволить адекватно оцінити силові, деформаційні та енергетичні характеристики процесу їх подрібнення.

2.3. Механічні характеристики біополімерів м'яса

При виготовленні основних продуктів переробки м'яса, а саме ковбасних виробів, м'ясо піддають інтенсивному механічному

обробленню. Тому аналіз структури цього природного біополімера і оцінка механічних характеристик м'яса при нормальних і знижених температурах є важливими чинниками, які враховують для раціонального вибору м'ясоподрібнювальних машин та інструментів у виробництвах м'ясних виробів, фаршу, напівфабрикатів і ковбасних виробів.

Структура м'яса представляє систему структурованих білкових волокон, просочених тканинною рідиною, яка є білковим золем, що містить розчинні в ньому органічні і неорганічні речовини. Тканини, з яких складається м'ясо, належать до природних біополімерів, а тому проведення аналітичних досліджень механічних властивостей м'яса в рамках уявлень про механіку полімерів дасть можливість удосконалити подрібнювальні процеси, які застосовують при виробництві м'ясних продуктів. Фундаментальні дослідження процесів деформування м'яса під навантаженням проведені Горбатовим А.В., Пелеєвим О.І., Клименком М.М., Косим В.Д. та іншими дослідниками. Разом з тим у результатах досліджень є ряд протиріч, які не дають можливості провести фізичне і математичне моделювання м'ясоподрібнювальних процесів.

Важливе значення має аналітична оцінка впливу напружено-деформованого стану на м'ясну сировину з метою подальшої розробки методів математичного опису деформаційних властивостей м'яса під дією технологічних навантажень при подрібненні, які суттєво впливають на енергетичні показники різання, довговічність і надійність м'ясоподрібнювальних машин, якість м'ясопродуктів і напівфабрикатів. Для цього необхідно узагальнити знання з анатомії тварин, закономірностей механіки суцільних середовищ, порівняти властивості високомолекулярних природних сполук і штучних полімерів, що є підґрунтям у забезпеченні раціонального проектування м'ясопереробних інструментів і машин.

Відомо, що м'ясопродукти – це складні за структурою і хімічним складом матеріали. Вони мають значну міцність і здатні до дисипації підведеної до них енергії, яка в значній мірі перетворюється в тепло, здатне викликати небажані фізико-хімічні перетворення у біополімерах.

З метою запобігання перегріванню м'яса процес подрібнення здійснюють в декілька стадій. Наприклад, у різальних механізмах вовчків використовують ряд ножів і решіток з отворами, діаметр яких ступінчасто змінюється від початкового розміру 0,06 м до 0,003-0,002 м у вихідних решітках. На якісні показники готової продукції впливають механічні характеристики сировини, спосіб ведення процесу різання [39,40].

При кімнатній температурі м'ясо за структурою молекул і характером їх взаємодії можна віднести до анізотропних орієнтованих, частково кристалізованих, твердоподібних просторових структур [41].

Тканини, з яких складається м'ясо, прийнято класифікувати за їх промисловим значенням. Розрізняють м'язові, жирові, сполучні, хрящові та кісткові тканини. Основними структурними елементами м'язових тканин є м'язові волокна – своєрідні гігантські багатоядерні клітини завтовшки від 10 до 100 мкм і завдовжки 0,12 м і більше [42]. М'язові волокна складаються в первинні м'язові пучки, в яких вони з'єднані найтоншими прошарками сполучної тканини, зв'язаної з волокнами ендомізієм. Ендомізієм утворений тонкими і ніжними колагеновими волокнами, вільний простір між якими заповнений проміжною речовиною. Первинні пучки об'єднуються в пучки вторинні, третинні і так далі. Пучки вищого порядку покриті сполучною оболонкою – перимізієм, і в сукупності, утворюють м'яз. М'яз також покритий оболонкою – епімізієм.

Основу сполучної тканини складають стрічкоподібні колагенові і ниткоподібні еластинові волокна. Вони входять до складу тонких безструктурних перетинок і утворюють разом з ними губчасту структуру, в осередках якої міститься тканинна рідина. Із сполучної тканини побудовані оболонки м'язових пучків і м'язів — ендомізієм, перемізієм, елімізієм і більші та міцніші утворення.

Жирова тканина є різновидом сполучної тканини, клітини якої містять значну кількість нейтрального жиру.

Хрящова тканина побудована з основної щільної речовини, в якій розташовуються клітинні елементи. До складу м'яса також входить жалиновий хрящ, побудований з колагенових волокон і пучків, подібних до сполучної тканини. Колагенові волокна і пучки склеєні аморфною речовиною, що має у своєму складі білкові речовини [41,42,43].

Тканини, з яких складається м'ясо, належать до природних біополімерів. Тому дослідження їх механічних властивостей на сучасному етапі проводиться у рамках уявлень про механіку полімерів.

Деформаційна поведінка полімерів взагалі і біополімерних тканин м'яса зокрема може бути описана сумою трьох складових: пружною деформацією, яка зворотня до напрямку напружень, залишковою деформацією, яка є повністю безповоротною та високоеластичною деформацією, яка є зворотною, але її релаксація проходить із затримкою у часі після зняття напружень [39].

Пружна деформація пов'язується зі зміною міжмолекулярних відстаней, залишкова - з безповоротними переміщеннями молекул на відстані значно більші, ніж молекулярні розміри, а високоеластична - зі змінами конформації біополімерних ланцюгів.

Для характеристики деформованого стану м'яса доцільно використати циклічну діаграму навантаження-розвантаження, яка дозволяє простежити поведінку зразка в замкнутому циклі зміни зовнішнього навантаження.

На рис. 2.7 подані циклічні діаграми, $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$, отримані при стисканні зразків, вирізаних з довгої м'язової тканини яловичої туші, які зберігалися протягом 30 годин при температурі 2-4°C після забою, що характеризують залежність відносної деформації ε від терміну витримки τ зразків під навантаженням при температурі 15°C [43].

Циклічна діаграма отримана за такої послідовності режимів: стискання миттєво прикладеним постійним навантаженням до точки А, витримка в інтервалі АВ при постійному напруженні повзучості $\sigma_{пов}$, швидке розвантаження зі зменшенням напружень до нуля, в точці С, релаксація деформації в інтервалі CD, стабілізація залишкової деформації в інтервалі DD'. Таким чином при розвантаженні зразків м'яса на циклічній діаграмі $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ можна виділити три характерних інтервали. На першому з них деяка частина деформації релаксується майже одночасно з навантаженням з дуже великою швидкістю, на другому, після розвантаження з часом релаксується ще деяка частина деформації, але зі значно меншою швидкістю, а на третьому деформація залишається незмінною, тобто має місце повністю залишкова деформація.

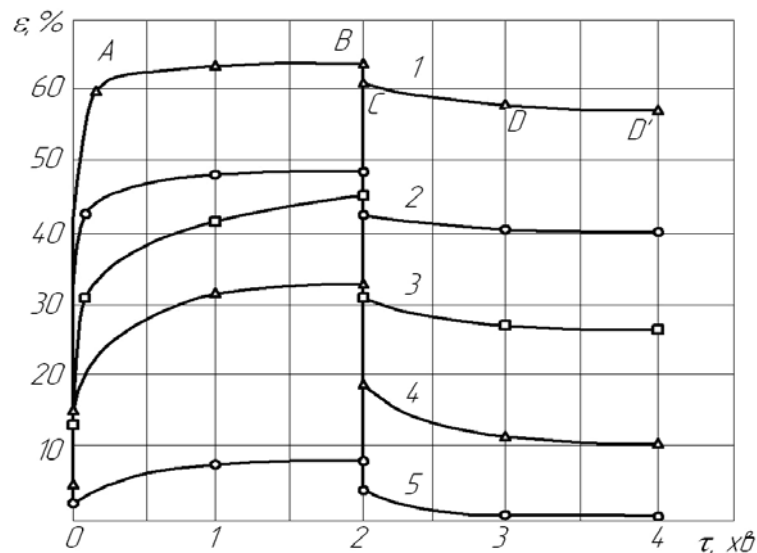


Рис. 2.7 – Деформаційно-часові криві зразків яловичини за температури 15°C при циклічному навантаженні – розвантаженні:

$\sigma = 0,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, 1 – поперек волокон, 2 – уздовж волокон;

$\sigma = 0,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$ 3 – поперек волокон, 4 – уздовж волокон;

$\sigma = 0,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, 5 – уздовж волокон.

На схематичній діаграмі (рис. 2.8) максимальна величина пружної деформації ε_y , досягнута у випробувальному циклі відповідає відрізку BC. Інтервал CD характеризує високо еластичну деформацію ε_β , а інтервал DD' - залишкову ε_ψ .

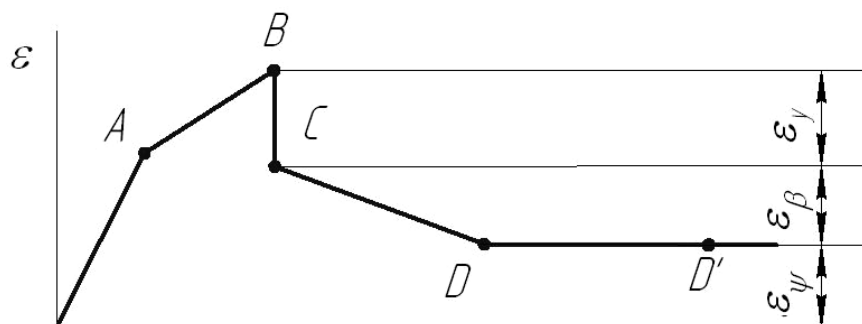


Рис. 2.8 – Типова діаграма деформування м'яса

Таким чином під дією навантажень м'ясо піддається сумарній деформації:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_\beta + \varepsilon_\psi, \quad (2.17)$$

Вид циклічної діаграми залежить від характеру процесу навантаження, величини досягнутих напружень у зразках тривалості періоду повзучості тощо. Разом з тим, величина ε_y при заданій температурі залежить тільки від максимальних напружень в навантажувальному циклі і трохи від швидкості деформування. Незалежно від передісторії розвантаження, найчастіше буде коректним співвідношення виду:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_y \quad (2.18)$$

E - коефіцієнт пропорційності (модуль пружності);

ε_y - максимальна величина пружної деформації у конкретному навантажувальному циклі.

Доцільно відмітити наступні експериментально встановлені характерні риси **пружної деформації** (дільниця BC на рис. 2.8).

1. Пружна деформація м'яса ε_y однозначно пов'язана лінійним законом з напруженням σ . Вона не залежить від умов деформування і є невід'ємною складовою сумарної деформації;

2. Швидкість поширення пружної деформації від точки до точки м'ясного середовища не залежить від напружень і дорівнює швидкості звуку в цьому середовищі;

3. Пружна деформація обумовлена зміною міжатомних відстаней, а тому її величина незначна;

4. Підвищення температури призводить до зниження модуля пружності E .

Аналізуючи численні дані дослідів [44,45,46], відмітимо такі експериментально встановлені характерні риси **залишкової деформації** (дільниця DD' на рис. 2.8):

- Незворотна деформація, що залишається після розвантаження зразка м'яса, не змінюється при нагріванні. Швидкість деформації при напруженні, рівному нулю, тотожно дорівнює нулю;

- В процесі розвантаження зразка зв'язок між напруженням і деформацією близький до лінійного;

- Залишкова деформація є результат безповоротного перегрупування мікрочасток зразка м'яса. Після усунення змін надмолекулярних структур, що часто супроводжують процес деформації, зразки м'яса в початковому стані і трансформованому по механізму залишкової деформації цілком ідентичні. В силу цього об'єм зразків м'яса при залишковій деформації практично не змінюється;

- Незалежно від режиму навантаження швидкість залишкової деформації є однозначною функцією напружень і температури. Ці залежності близькі до експоненційних;

- У залишково деформованому м'ясі при постійній сумарній деформації напруження релаксуються до нуля, тобто деформація з часом повністю переходить у залишкову, але це можна спостерігати на практиці або при дуже великому термін і витримки зразка, або за підвищених температур.

Експериментально встановлені риси **високоеластичної деформації** (дільниця CD на рис. 2.8):

- Високоеластична деформація зразка м'яса практично повністю релаксує після розвантаження, але з часом, який істотно залежить від температури. Нагрівання зразків м'яса значно прискорює релаксацію деформацій.

- В процесі розвантаження зв'язок між напруженнями і деформаціями зразків м'яса тим більше відхиляється від лінійного, чим менша швидкість розвантаження. Лінія розвантаження на діаграмі розтягування - стискання у цьому випадку утворює криву, обернену опуклістю до вісі абсцис.

- Високоеластична деформація є результатом зміни конфігурації високомолекулярних структур.

- Швидкість високоеластичної деформації є функцією напружень і температури.

- Величина високоеластичної деформації м'яса і її доля в сумарній деформації залежить від температури біополімера. У найбільш

чистому вигляді високоеластична деформація проявляється в інтервалі між температурою скловання полімеру і температурою текучості.

При температурі скловання і вищій кожному постійно діючому напруженню відповідає рівноважна високоеластична деформація, що лінійно з ним пов'язана. Коефіцієнт пропорційності для цієї залежності (рівноважний модуль високоеластичності) зростає з підвищенням температури.

За наявності високоеластичної деформації, у разі постійної сумарної деформації, напруження релаксують не до нуля, а до деякого рівноважного значення.

Відомо, що ізотропні полімери можуть бути умовно розділені на три групи, в кожній з яких одна з перерахованих складових деформації за даних умов випробувань є переважаючою [47,48]:

- а) жорсткі полімери, що характеризуються малими деформаціями і мають більш високий модуль пружності, ніж інші полімери;
- б) м'які еластичні полімерні матеріали, що мають здатність до дуже великих (десятки і сотні відсотків) зворотних деформацій;
- г) полімери, що проявляють текучість при дії зовнішніх сил.

Треба мати на увазі, що поділ полімерів на ці групи є дуже умовним, бо, в залежності від режиму навантаження і температури, співвідношення складових загальної деформації в полімері може змінюватись. Все це відноситься також до м'яса, як природного біополімера. Дійсно, м'ясо при звичайних температурах є пластичним тілом, дуже близьким за характеристиками до м'яких полімерів. У міру пониження температури, вода, що міститься в м'ясі, починає вимерзати і при цьому різко змінюються його механічні властивості. Так, за температур нижчих від криогідратних за механічними властивостями м'ясо можна віднести до досить жорстких полімерів [47].

У інтервалі температур між криоскопічною і криогідратною м'ясо одночасно має властивості крихкості і пластичності, тобто в його деформаційній поведінці одночасно присутні особливості усіх трьох розглянутих ізотропних полімерів.

Не викликає сумнівів доцільність встановлення кількісних закономірностей деформаційної поведінки м'яса для забезпечення раціонального конструювання машин для подрібнення, різання і механічної обробки м'яса. Варто особливо підкреслити, що при встановленні кількісних закономірностей деформування м'яса необхідно використати тільки ті експериментальні результати, які отримані коректними методами, що забезпечують однорідність полів деформацій і напружень. Відмітимо, що діаграми розтягування-стискування та інші результати дослідів, які опубліковані в технічній літературі, далеко не

завжди можуть бути використані в описі механіки подрібнення м'яса саме в силу некоректності вживаних методик [48].

Так, у ряді робіт, вимірювання деформацій м'яса проводили по зміні відстаней між затискниками зразків, тобто за цих умов не забезпечувалась однорідність деформацій.

Використовуючи результати експериментальних робіт по дослідженню механічних характеристик м'яса при знижених температурах припускаємо, що м'ясо можна віднести до жорстких (принаймні у напрямі волокон) анізотропних полімерів. У роботі [49] наведені дані результатів випробування м'яса на розтягування в інтервалі температур від -5 до -100 °С. Метою роботи було визначення межі міцності σ_e , ефективних модулів пружності $E_{эф}$ і коефіцієнта Пуассона μ м'яса у двох напрямках, а саме вздовж і поперек волокон у зазначеному інтервалі температур.

Експерименти проводилися на зразках з довжиною і шириною робочої частини, відповідно, 70 і 10 мм. Деформація вимірювалася за допомогою тензOMETричних датчиків так, що була забезпечена коректність вимірів деформацій і зусиль. Хоча вибрана методика проведення експериментів і обробки даних не дозволяє дати повну кількісну оцінку механічних властивостей м'яса, але якісні показники механіки м'яса в деякій мірі можна охарактеризувати.

При температурах -5 і -18 °С у всьому інтервалі навантажень лінійного зв'язку між напруженням і деформаціями не було виявлено. Залишається тільки припустити, що закон Гука все ж має місце при нижчому рівні навантажень, ніж той, що прийнятий за початковий. Відмітимо явно виражену анізотропію м'яса при температурі -5 °С, свідченням чого були дуже високі (близькі до одиниці) значення коефіцієнта Пуассона.

Починаючи з -18 °С і нижче величини коефіцієнтів Пуассона мало змінюються з ростом навантажень і коливаються навколо значень 0,5, що побічно вказує на зменшення ролі анізотропії м'яса зі зниженням його температури. При криогідратній температурі (близько -65 °С) м'ясо поводить себе як жорсткий скляний полімер, показуючи лінійну залежність між напруженням і деформаціями аж до руйнування. Ефективні модулі пружності, визначені на зразках з поздовжнім і поперечним розташуванням волокон, при цій температурі відповідно склали $0,51 \cdot 10^4$ і $0,40 \cdot 10^4$ МПа. Якщо ефективні модулі пружності і коефіцієнти Пуассона відрізняються дуже мало в умовах випробувань, близьких до криогідратних температур, то межі міцності для поздовжніх і поперечних зразків розрізняються суттєво і складають відповідно до 3,95 і 1,9 МПа.

Діаграма розтягування м'язової тканини при кімнатній температурі [50] має монотонний характер аж до руйнування (рис. 2.9,а). Її дещо

незвичайний вигляд, пов'язаний з відсутністю ділянки, де залежність деформації від напружень підкоряється закону Гука, можна пояснити неточністю визначення деформацій в початковий період навантаження.

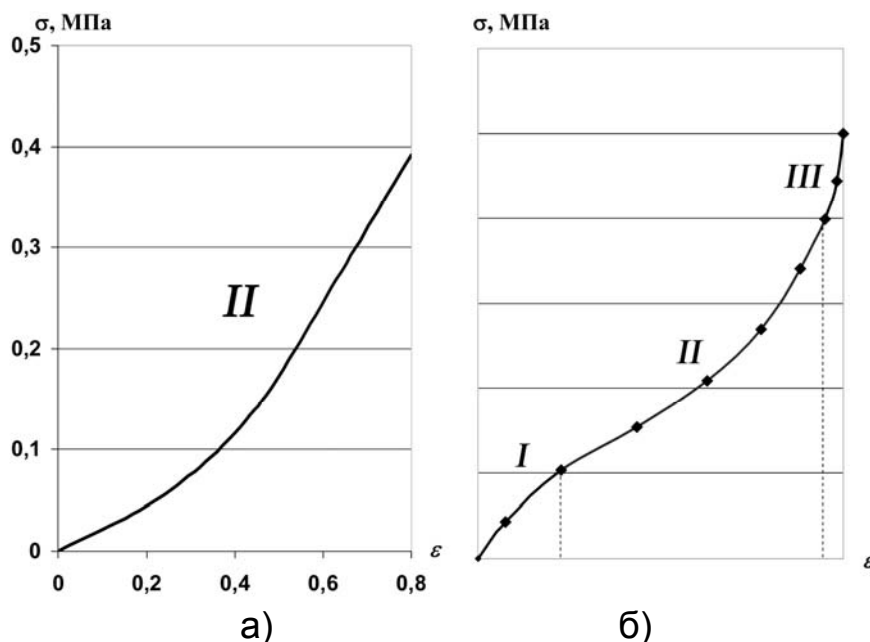


Рис. 2.9 – Діаграма розтягування м'язової тканини яловичини при кімнатній температурі: а – розтягування м'язової тканини уздовж волокон; б – типова схема діаграми

На рис. 2.9,б схематично показаний найбільш вірогідний вид діаграми. Для більшості біополімерних матеріалів характерна саме така залежність деформацій від напружень.

Ділянка I на схематичній кривій (рис. 2.9,б) відповідає пружним деформаціям, що підкоряються закону Гука. Ділянка II ілюструє високо еластичну деформацію, де малим змінам напруження відповідає інтенсивне збільшення деформації. На III ділянці незначній зміні деформації відповідає різке зростання напруження, що обумовлено зміною структури матеріалу (орієнтації макромолекул).

Найбільш характерні особливості механічної поведінки м'яса при **стисканні** виявляються в процесі його навантаження з постійною швидкістю деформації. У цьому режимі при стисканні призматичних зразків відбувається втрата стійкості, викривлення прямолінійної вісі, поява руйнувань. Подібне небажане явище, що веде до порушення однорідності напруженого стану, може бути виключене шляхом відповідного вибору співвідношень розмірів зразка, його гнучкості [48].

Порушення однорідності поля напружень і деформацій можливе ще й у результаті впливу граничних умов, спричинених наявністю сил тертя на опорних поверхнях. Ці зусилля ускладнюють поперечні зміщення точок, розташованих на торцях зразка. В області пружних деформацій

подібні зміщення обумовлені існуванням коефіцієнта Пуассона μ , а в області пластичних деформацій – постійним об'ємом зразка при цих деформаціях. З вказаних причин виникає крайовий ефект, затухаючий лише на деякій відстані від торцевих поверхонь. Величина сил тертя, зона крайового ефекту і характер деформованого стану зразка істотно залежать від фізико-механічних властивостей м'яса і умов тертя на торцях.

Випробування на стискання в силу простоти виготовлення зразків отримали велике розповсюдження при дослідженні механічних властивостей м'яса. Зазвичай зразки виготовлялися кубічної форми з довжиною грані 10 мм [44].

Залежності модулів пружності і меж міцності від температури для м'язових тканин яловичого м'яса приведені на рис. 2.10 і 2.11.

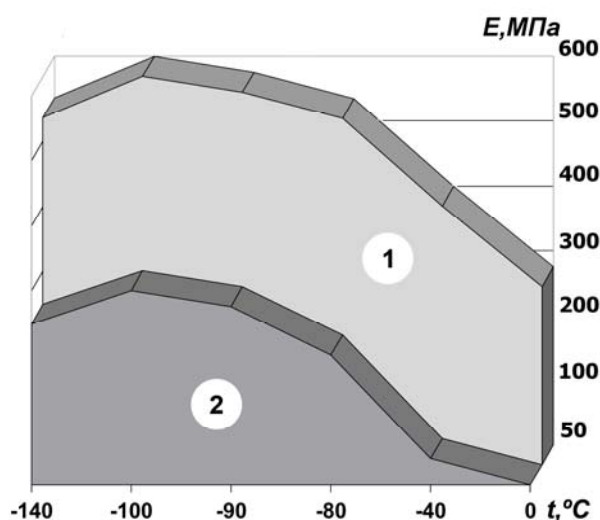


Рис. 2.10 – Залежність модуля пружності E м'язової тканини яловичини від температури при розтягуванні вздовж (1) і поперек (2) волокон

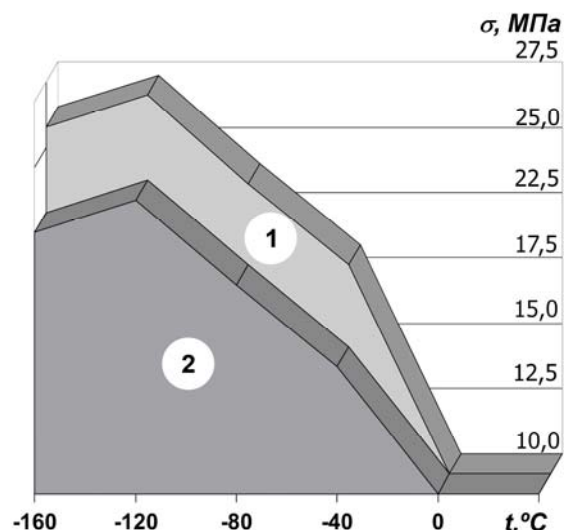


Рис. 2.11 – Залежність межі міцності σ м'язової тканини яловичини від температури при стисканні вздовж (1) і поперек (2) волокон

На рис. 2.10 ілюструються залежності величин модулів пружності м'язової тканини від температури. Позиції 1 і 2 відповідають напрямкам розтягування уздовж і поперек волокон. Очевидно, що залежності, запозичені їх двох різних джерел [44,51], відрізняються одна від одної не лише кількісно, але і якісно. Якщо порівняти модулі пружності у поздовжньому напрямі, визначені при розтягуванні і стисканні зразків м'яса при одній і тій же температурі, то виявиться, що модуль пружності при розтягуванні приблизно на один порядок вищий за відповідний модуль при стисканні.

На рис. 2.11 показані залежності меж міцності м'язової тканини від температури [51]. Крива 1 відноситься до напрямку стискання уздовж волокон, а крива 2 до напрямку стискання поперек волокон. Цікаво порівняти міцнісні характеристики м'яса за однакових температур (-65°C), отримані при проведенні дослідів на розтягування і стискання (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Межа міцності м'яса

Напрямок навантаження	Розтягування, МПа	Стискання, МПа
Уздовж волокон	3,95	17,5
Поперек волокон	1,90	15,0

Можна стверджувати, що м'ясо є тілом, що не однаково чинить опір розтягуванню і стисканню.

Приведемо дані з роботи [44] за результатами досліджень модулів пружності м'яса при стисканні уздовж волокон в інтервалі температур від -20 до +20°C (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Модулі пружності м'яса при стисканні в залежності від температури

Температура, °C	-20	-15	-10	0	4	8	10	20
Модуль пружності, МПа	8,907	5,14	2,33	0,119	0,038	0,015	0,0126	0,0109

Аналіз цих даних вказує на дуже велику залежність модуля пружності м'яса від температури. Такого роду залежності взагалі характерні для полімерних тіл.

Реономні властивості м'яса зручно вивчати за результатами випробувань на повзучість і релаксацію.

Відомо, що випробування на повзучість повинні здійснюватися при постійному напруженні $\sigma = const$ і постійній температурі $t = const$ [39]. Деформація визначається як функція часу $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$. Криві повзучості м'язової тканини при її стисканні з постійними напруженнями в інтервалі навантажень 0,01- 1,0 МПа при кімнатних температурах отримані в роботі [52]. Для порівняно великого напруження, близького до величини межі міцності м'яса, діаграма його повзучості схожа на діаграму повзучості металевих зразків. Спочатку деформація наростає з швидкістю, яка поступово зменшується, а потім – з постійною швидкістю. Для малих напружень крива деформування набуває вигляду кривої насичення і має горизонтальну асимптоту. З часом величина деформації наближається до деякого граничного значення, а швидкість деформації наближається до нуля. Подібна гранична деформація обов'язково

встановлюється лише в тому випадку, коли м'ясо знаходиться у високоеластичному стані і в ньому розвивається рівноважна деформація, що має природу ентропії походження. Високоеластична деформація, що накопичується в процесі повзучості, після розвантаження зразків м'яса з часом зникає. Процес релаксації цієї деформації плине уповільнено.

Аналітичні дослідження інформаційних джерел показали, що об'єм літератури, присвяченої вивченню механічних властивостей м'яса, вкрай обмежений і публікації відносяться, в основному, до останнього десятиліття. Наявних в літературі відомостей недостатньо для розробки методів математичного моделювання деформаційних властивостей м'яса під дією навіть простих (рівномірне розтягування-стискування) видів навантаження.

Результати, які отримані на даний час дослідниками, не можуть бути використані для отримання кількісних оцінок механічних властивостей м'ясних біополімерів через їх наукову суперечливість, недостатню вивіреність і некоректність методик проведення експериментів. Тому дослідження механіки біополімерів м'яса потрібно продовжити, застосовуючи сучасні прилади і методики, апарат теорії ймовірностей та високопродуктивне комп'ютерне обладнання з відповідним програмним забезпеченням.

Розділ 3. Фізико-технічні основи процесів подрібнення харчових продуктів

3.1. Загальні закономірності процесів подрібнення матеріалів

Робота різання складається з [53]: роботи на об'ємні деформації подрібнюваного продукту і роботи на створення нових поверхонь.

Відповідно до теорії подрібнення Кирпичева - Кика [54, 55], розвиненою надалі Стедлером [56], робота пружної деформації об'єму зруйнованого шматка пропорційна зміні об'єму або маси подрібненого шматка. Цією гіпотезою не враховуються витрати енергії, пов'язаної з роботою що витрачається на утворення нових поверхонь. Гіпотеза Риттенгера [57], навпаки, відбиває випадок, коли робота, що витрачається, повністю витрачається на утворення нових поверхонь. Згідно з цією гіпотезою робота подрібнення пропорційна розміру знову утвореної при подрібненні поверхні. Справедливість цього висновку підтверджується даними, представленими в роботах [57, 58, 59, 60, 61]. Як можна бачити обидві ці гіпотези окремо не відбивають повною мірою процеси, що мають місце при подрібненні твердих тіл, тому що робота, що корисно використовується на подрібнення продукту, витрачається і на об'ємну деформацію продукту і на утворення нових поверхонь. Цього висновку дійшли автори робіт [62, 63]. Для випадку, коли необхідно отримати продукт з середньою мірою подрібнення, Бонд [63] запропонував рівняння, згідно з яким робота подрібнення шматка пропорційна середньгеометричному його об'єму і поверхні.

Незважаючи на безліч процесів, що відбувається при різанні (стискання, зминання, зрушення, зріз і так далі), їх сумарна дія спрямована на здійснення процесу подрібнення, під яким розуміється розділення матеріалу на частини під дією зовнішніх механічних сил. Якщо цей процес зменшення розмірів початкової сировини відбувається без надання певної форми готовому продукту, то це подрібнення, інакше - різання.

Різання - це технологічний процес обробки з метою розділення матеріалу на частини (порушенням цілісності), який здійснюється різальним інструментом, причому матеріалу надається певної форми, розміру і якості поверхні. При різанні відбувається відділення однієї частини матеріалу від іншої в результаті руйнування пограничного шару. Руйнуванню в зоні контакту різального інструменту з матеріалом передують пружна і пластична деформації, величина яких залежить від структури матеріалу, швидкості деформації, фізико-механічних властивостей і умов процесу. Руйнування відбувається по лінії найбільших напружень і настає тоді, коли напруження стає рівним

тимчасовому опору (межі міцності) матеріалу. Робота різання витрачається на створення пружної і пластичної деформацій, а також на подолання сил тертя та інерційних сил опору. Специфічність поведінки матеріалів в процесі руйнування зумовила велику кількість класифікаційних ознак цього процесу і навіть виникли відносно чіткі розмежовані самостійні науково-технічні дисципліни: різання металів, деревини, сировини органічного походження та ін. Проте запропонована вже у наш час Желиговским В.А. і розвинена Резником Н.Е. класифікаційна схема якнайповніше відбиває характерні особливості взаємодії інструменту і матеріалу, ефекти, обумовлені специфічними параметрами інструменту. Згідно з цією схемою руйнування розглядається як різання пуансоном (просічення, обрубання, ділення, штампування), різцем (точіння, стругання, фрезерування, пиляння, свердління, довбання, шліфування, шабріння, лущення) і лезом (рис. 3.1).

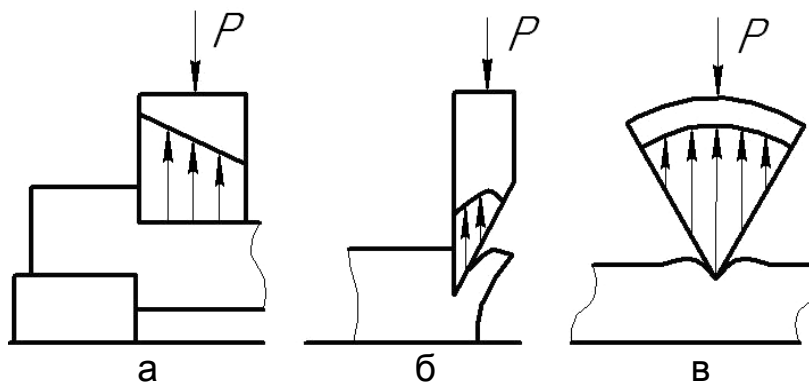


Рис. 3.1 – Види різання : а - пуансоном; б - різцем; в - лезом.

Для різних матеріалів в різному ступені може бути застосований той або інший вид різання. Таким чином, класифікація видів різання за технологічними ознаками припускає ґрунтовне вивчення і оцінку фізико-механічних і, головним чином реологічних властивостей матеріалів, дозволяє розглядати науку про різання що складається з трьох відособлених розділів: різання пуансоном, різання різцем, різання лезом. До кожного з цих розділів відноситься увесь комплекс питань теорії і практики різання будь-яких матеріалів, для яких застосуємо цей вид різання. Наприклад, для процесу різання лезом усі основні закономірності, встановлені для одних матеріалів, мають бути в силі для інших, звичайно, з урахуванням специфіки їх фізико-механічних властивостей. Урахування широкого діапазону властивостей різних матеріалів для окремого виду різання полегшує визначення його універсальних закономірностей.

Важливою класифікаційною ознакою процесу різання є кут ковзання ножів. Основоположник теорії різання академік Горячкин В.Н. виділив два різновиди різання лезом: за допомогою нормального переміщення різального інструменту і за допомогою переміщення його по двох взаємно перпендикулярних напрямках (нормальному і дотичному), які в літературі відзначаються як статичне або нормальне різання (рубка) і ковзаюче різання (різання). При нормальному різанні різальний інструмент спочатку значно ущільнює матеріал, а потім руйнує його, при цьому утворюються нові поверхні зрізу. Спосіб придатний у тому випадку, коли до якості поверхні зрізу не пред'являють високої вимоги, тобто поверхня зрізу виходить рваною. При ковзаючому різанні різальна кромка інструменту створює місцеве ущільнення матеріалу. При цьому утворюється гладша поверхня зрізу.

Що ж стосується значення кута ковзання леза для роботи і, тим більше, питомої роботи різання, то з цього приводу є різні точки зору. В. А. Желиговский [65] дійшов висновку, що найменша питома робота має місце при рубаючій дії леза. За його даними, у міру збільшення кута ковзання питома робота зростає спочатку повільно, а після досягнення 70° все інтенсивніше.

Експериментальні дослідження Н.Е. Резника [66] показали, що збільшення значення кута ковзання леза в певних межах вигідне в енергетичному відношенні. Робота і питома робота різання зі збільшенням кута до 25° падають, а при подальшому збільшенні цього кута - зростають.

За даними Н. В. Саблікова найменшу величину питома робота різання для різних матеріалів має в межах значення кута ковзання леза $\beta=30-50^\circ$, після чого відбувається поступове збільшення питомої роботи.

За даними А.І. Пелеева, при різанні м'яса, значне зменшення енерговитрат спостерігається при куті ковзання леза $\beta=45-60^\circ$.

3.2. Аналітичний огляд і сучасна класифікація подрібнювальних процесів

Розглянемо енергетичний підхід до класифікації процесів подрібнення харчових продуктів.

Руйнування структури матеріалу пов'язане з енергетичною взаємодією джерела енергії і матеріалу, який руйнується. Перенесення енергії можливе або у вигляді імпульсу сили при безпосередньому контакті, або у вигляді кванта випромінювання. Енергетична дія зовнішніх сил на матеріал, який руйнується, може супроводжуватися перенесенням маси, теплоти, емісією електронів та іншими фізико-хімічними ефектами, утворюючи усі різноманітні способи руйнування, які відомі сьогодні. При цьому більшість елементарних процесів перенесення субстанції (імпульсу, тепла, маси) добре вивчені та відома

система класифікації, заснована на вивченні явища подрібнення як феномену, консервативніша і не схильна до таких швидких змін, як класифікація апаратів за технологічними, конструкційними або іншими ознаками. Більшість методів дії на руйнований матеріал запозичений у природі, але далеко не усі природні явища знайшли втілення в техніці. Багато явищ в результаті масштабності чинників або навпаки, дрібності прояву ефектів, не використовуються в промисловій практиці.

Способи передачі енергії руйнованому матеріалу лише супроводжують або передують якому-небудь з вищеперелічених способів силового впливу, наприклад, магнітна обробка суспензій волокнистих матеріалів перед механічним диспергуванням.

Масові. Силу дію формують гравітаційні, відцентрові або інерційні сили.

Хімічні способи диспергування засновані або на об'ємному розширенні продуктів хімічної реакції, наприклад, у разі вибуху, або на втраті енергії зв'язку, хімічної спорідненості частини матеріалу з основним масивом, як у разі окислювальної ерозії. Як проміжний етап руйнування - послаблення енергії хімічної взаємодії структуротворюючих частин матеріалу за рахунок вилуговування, розчинення або дифузії яких-небудь складових частин із скелета матеріалу.

Мікробіологічні способи диспергування засновані на хімічній або ферментативній дії бактерій, плісняви і рослин на матеріал. Біологічні об'єкти споживають складові частини підкладки в їжу, або розкладають матеріал продуктами виділень в процесі життєдіяльності. Причому ці природні процеси все частіше використовують в технології збагачення руд, виділення рідкоземельних металів, очищенні гальванічних стоків і розкладанні відходів різних виробництв.

Гідродинамічні способи, рушійною силою яких є гідродинамічний тиск струменя рідини або газу, або перепад тиску в об'ємі руйнованого тіла.

Як видно з вищеперерахованого, класифікація є узагальненим перерахуванням уже відомих методів впливу на матеріал, який диспергується. Разом з тим, впорядкування цих способів за дрібнішими ознаками і групами дозволяє визначити "осередки", які не заповнені сьогоdnішнім рівнем знань та передбачити нові шляхи інтенсифікації і нові способи диспергування матеріалів шляхом комбінації вже відомих. Розглянемо більш ретельно методи, які викликають плоский або лінійний напружений стан.

На (рис. 3.2) приведені три основні методи силового впливу на матеріал і їх окремі випадки прояву, реалізовані на сьогодні або можливі до реалізації.

Подальший розвиток способів руйнування цієї класифікаційної групи можливий комбінуванням указаних методів, наприклад, струменеве руйнування іонізованим газом або плазмою, механічне руйнування в полі електромагнітного випромінювання (НВЧ) або комбінованою дією механічних і гідродинамічних навантажень.

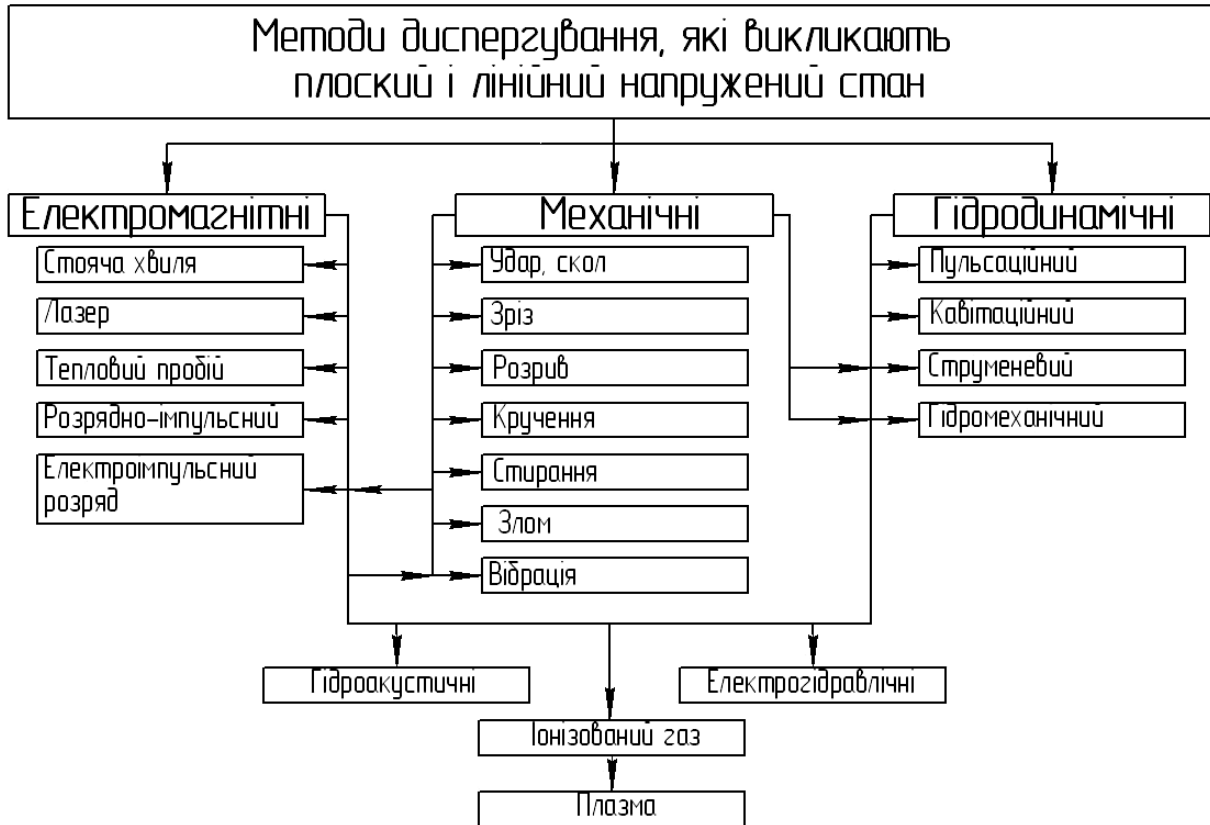


Рис. 3.2 – Класифікація способів диспергування матеріалів за видом напруженого стану і методами зовнішнього впливу

Другу велику групу процесів диспергування складають методи, що викликають об'ємний напружений стан у руйнованому матеріалі (рис. 3.3).

Об'ємний напружений стан може бути викликаний практично будь-якою силовою дією, наприклад, усебічним механічним стисканням або електрогідрравлічним ударом. Тому на (рис. 3.3) деталізовані тільки ті види силової дії, які не призводять до лінійного або плоского напруженого стану.

Як видно зі схеми, багато методів добре відомі і давно застосовуються в промисловості, інші, наприклад, електродіаліз відомі, але для цілей диспергування і руйнування не застосовуються. Хоча, добре відомо, що при набряканні колоїдних і капілярно-пористих структур в результаті осмосу вологи (розчинника) через напівпроникну

мембрану структуротворних клітин розвивається колосальне напруження. При накладенні електромагнітного поля явище осмосу можна значно прискорити - це і є електродіаліз.

Нині реалізовані багато фізичних способів впливу на руйнований матеріал, що приводять до розвитку в його масиві поза межних напружень і розриву суцільності. Проте основним способом обробки матеріалів залишається механічне дроблення і подрібнення.

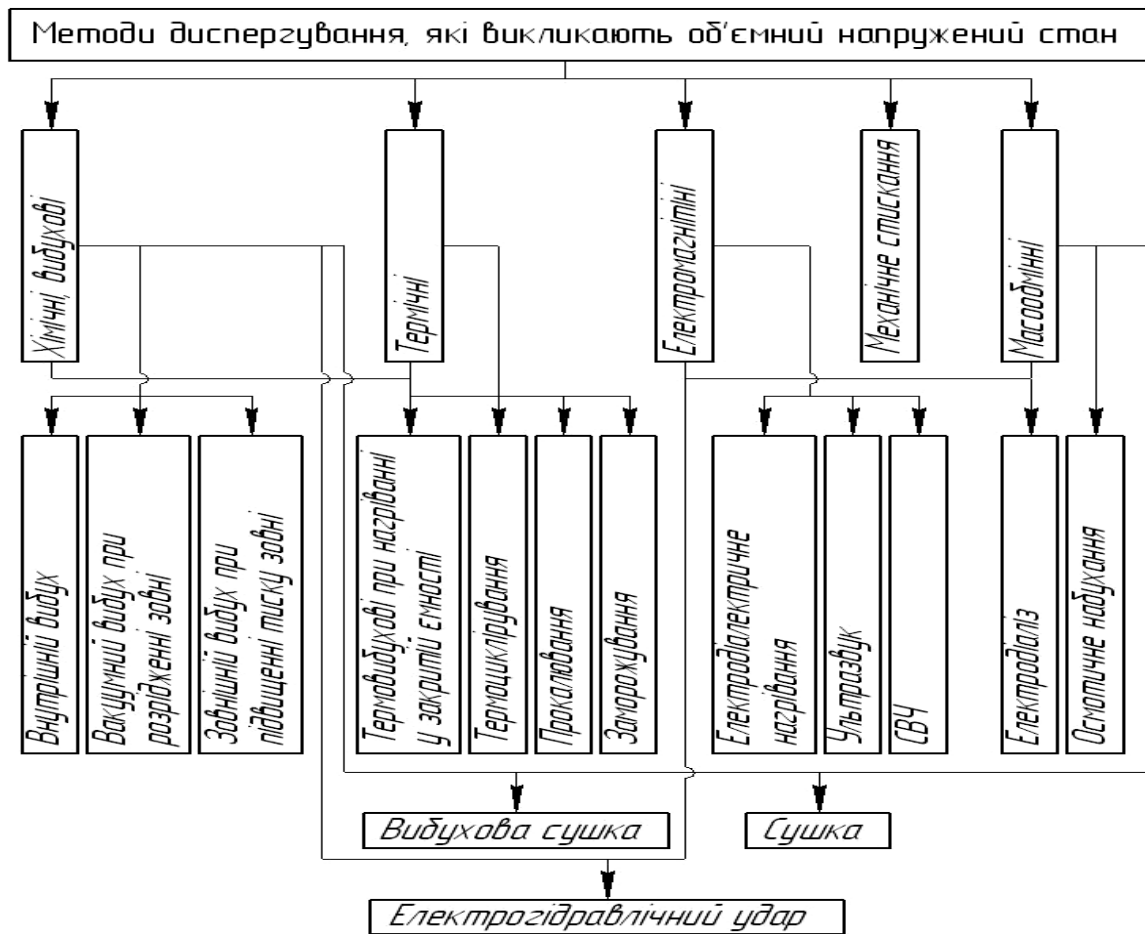


Рис. 3.3 – Класифікація способів диспергування матеріалів за видом напруженого стану і методами зовнішнього впливу

Величезне різноманіття конструктивних рішень подрібнювальних машин однойменного призначення свідчить не лише про творчий пошук їх творців, але і про відсутність єдиного підходу до створення і проектування нового устаткування. На наш погляд, такий підхід може забезпечити проста і наочна класифікація, яка аналізує механізм навантаження одиначної частини руйнованого матеріалу.

До недавнього часу до способів механічного руйнування відносили лише удар, стирання, розчавлювання, розколювання, розпилювання і різні їх видозміни.

При аналізі машин з різною кінематикою найзручніше оперувати не поняттям способу навантаження, наприклад злам, а поняттям механізму напруженого стану - згин. При цьому з'являється можливість абстрагування від окремих проявів конкретного стану і, на основі простих структурних схем, здійснювати моделювання і синтез різних напружених станів.

Оперуючи поняттями опору матеріалів, основними напруженими станами матеріалу можуть бути: стискання (розчавлювання), розтягування (розривання), згин (злам), кручення (скручування), зрушення (зріз, стирання). При такій класифікації залишаються поза нею такі способи руйнування, як удар і розкол. Проте, при силовому аналізі цих способів легко виявити, що від розчавлювання вони відрізняються: вільний удар - замикання силового ланцюга здійснюється інерційними силами самого матеріалу, розкол - вид зосередження стискання.

Напруження, які розвиваються в матеріалі, залежать не лише від виду напруженого стану, але і від характеру зміни зусилля, яке розвивається, в часі. Стискання кускового матеріалу може здійснюватися статично і динамічно. При статичному навантаженні швидкість зміни зусилля в часі надзвичайно мала і прагне до нуля, $dF/d\tau \rightarrow \infty$. При динамічному, $dF/d\tau \rightarrow \infty$. При повільному навантаженні (рис.3.4,а) більшість матеріалів витримують колосальні навантаження до руйнування, що в 10-40 разів перевищують зусилля розривання. Якщо матеріал має пластичність, в об'ємі формуються зони повзучості, які призводять до зміни форми початкового шматка і зменшення внутрішнього напруження.

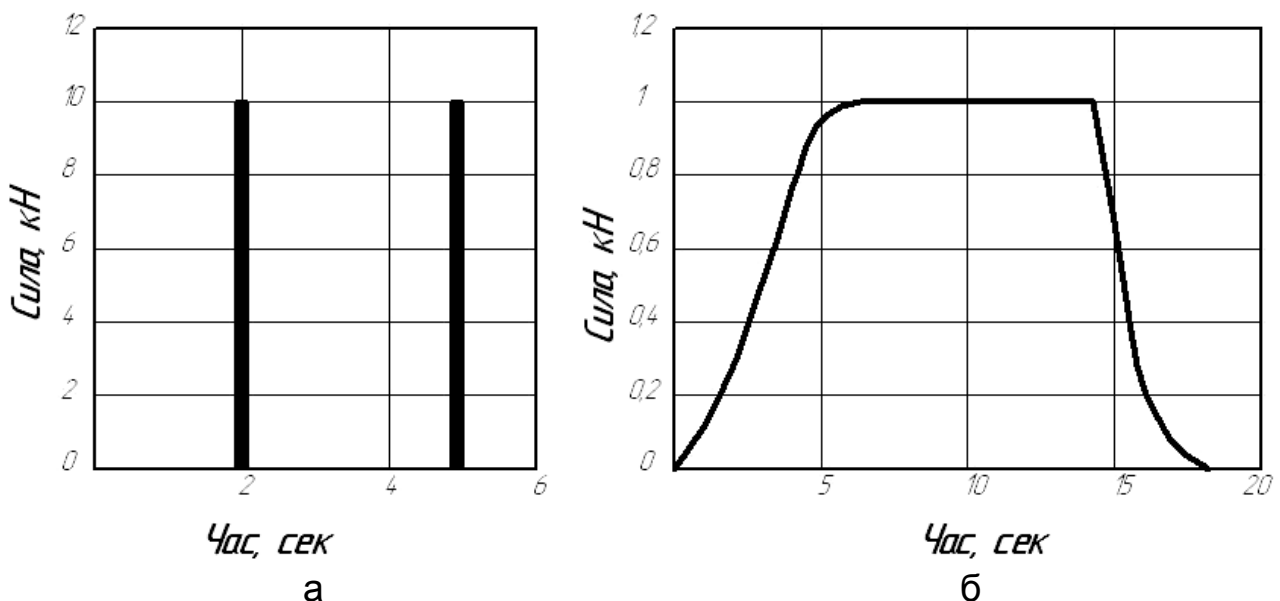


Рис. 3.4 – Характер зміни зусилля стискання при статичному (а) і динамічному (б) навантаженні

Залежно від площі і напрямку прикладання зусилля в матеріалі може виникати плоский або об'ємний напружений стан. Якщо навантаження розподілене по лінії або по вузькому майданчику, то в матеріалі формується плоский напружений стан, який називається розколюванням. Якщо навантаження рівномірно розподілене по усій поверхні (чи по більшій її частині), таке навантаження називають розчавлюванням або всебічне стискання. Якщо уся сила зосереджена в точці або на невеликій її околиці, в тілі формується лінійний напружений стан, а процес руйнування багато в чому аналогічний розколюванню (прокол, пробій, прошивання). У разі, коли лінії діючих на тіло сил значно рознесені в просторі, або діють під кутом одна до одної, в матеріалі формуються напруження згинання, а спосіб руйнування називають розламуванням. Якщо зміщення діючих сил у просторі невелике, або зусилля спрямоване під гострим кутом до поверхні матеріалу, то в матеріалі формуються напруження зрушення, а спосіб руйнування називається різанням (сколювання, розпилювання). Якщо сили спрямовані по одній лінії, але в протилежному напрямі, то в матеріалі можуть виникати напруження розтягування, а руйнування можуть бути назване розриванням. При зміщенні ліній діючих протилежно спрямованих сил в просторі в матеріалі виникають напруження кручення, а руйнування настає в результаті скручування або зрізання.

Високошвидкісне динамічне навантаження (рис.3.4,б) формує в об'ємі матеріалу хвилю стискання, а відбита або зворотна хвиля викликати в матеріалі розтягування. В цьому випадку релаксації (зменшення в часі) напруження не відбувається, і руйнування настає при набагато менших зусиллях. При динамічній дії в матеріалі також можуть формуватися усі види напруженого стану. Це всебічне динамічне стискання (зовнішній об'ємний вибух) або розтягування (внутрішній вибух). Локальне стискання або удар (вільний - в зваженому стані або обмежений - у разі обмеження руху матеріалу). Динамічний згин (ударне навантаження двоопорної балки) або високошвидкісне зрушення (розрубання, розтин тощо). Такі ж напруження зрушення формуються, якщо динамічна сила спрямована по дотичній до поверхні матеріалу, а руйнування називається стиранням.

Динамічне розосереджене стискання в техніці зустрічається в пресах. Технічна реалізація зосередженого стискання або розколювання спостерігається при дії на матеріал в промислових млинах або дробарках ударної дії, де реалізується принцип зосередженого стискання або удару. Це, передусім, молоткові млини, дезінтегратори, роторні і роторно-ланцюгові дробарки. Розколювання формується в щоківих дробарках, гідравлічних і механічних колунах.

Руйнування тертям спостерігається при дії на матеріал будь-яким абразивним інструментом: диском картоплечистки або декою при шліфуванні крупи. У подрібнювальних агрегатах стирання часто виступає як супутній процес разом з ударом або розчавлюванням, наприклад, у барабанних млинах самоподрібнення або багатовалкових терках, роторних терках тощо.

Напружений стан вигинання формується при стисканні або ударі по шматку матеріалу (рис.3.5), встановленого на двох опорах, наприклад, в шокових дробарках зі зміщеними рифлями, або в зубчастих валкових дробарках, якщо зуби розташовані за принципом шпилька-паз. Удар у вільному стані по довгомірному шматку в центрі або двома молотками одночасно по краях, теж формує напруження вигинання.

Кручення, як метод подрібнення, нині практично не використовується, хоча спостерігається в різних деталях машин і в змішувачах. Разом із зрушенням матеріал піддається і крутильному напруженню.

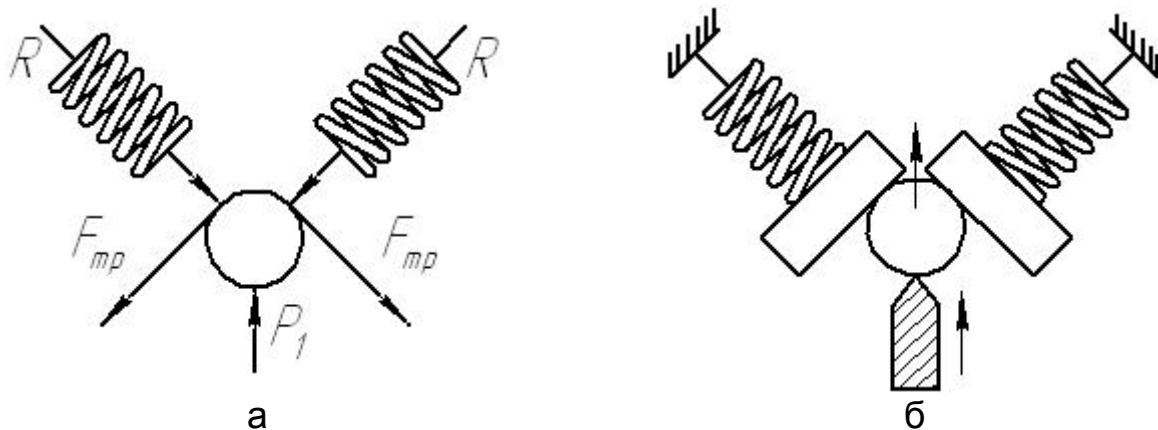


Рис. 3.5 – Схема руху інструменту (а) і схема сил (б) при комбінованому віброзламі із стиранням

Навантаження зсуву формується при дії різальним інструментом: ножом або пилкою.

Особливим видом динамічної силової дії є вібраційне навантаження силою змінної амплітуди (рис.3.6,а) або знакозмінного характеру (рис.3.6,б).

Величина діючої сили в часі t може змінюватися від нуля до деякого максимального значення (Рис.3.6,а)

$$F = F_0 + F_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.1)$$

або мінятися за величиною і напрямом, тобто мати знакозмінний характер (рис. 3.6, б)

$$F = F_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.2)$$

Коливання в реальних динамічних системах, в результаті дії сил опору, носять затухаючий характер і змінюються за складнішим законом

$$F = F_0 \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (3.3)$$

де F_0 - амплітудне значення зусилля, Н; ω - циклічна частота коливань, 1/с; φ - початкова фаза коливань, град; δ - коефіцієнт загасання коливань, 1/с.

Безпосередньо з коефіцієнтом загасання δ пов'язано поняття часу релаксації τ , тобто проміжку часу, впродовж якого амплітуда затухаючих коливань зменшується у e разів

$$\tau = 1/\delta \quad (3.4)$$

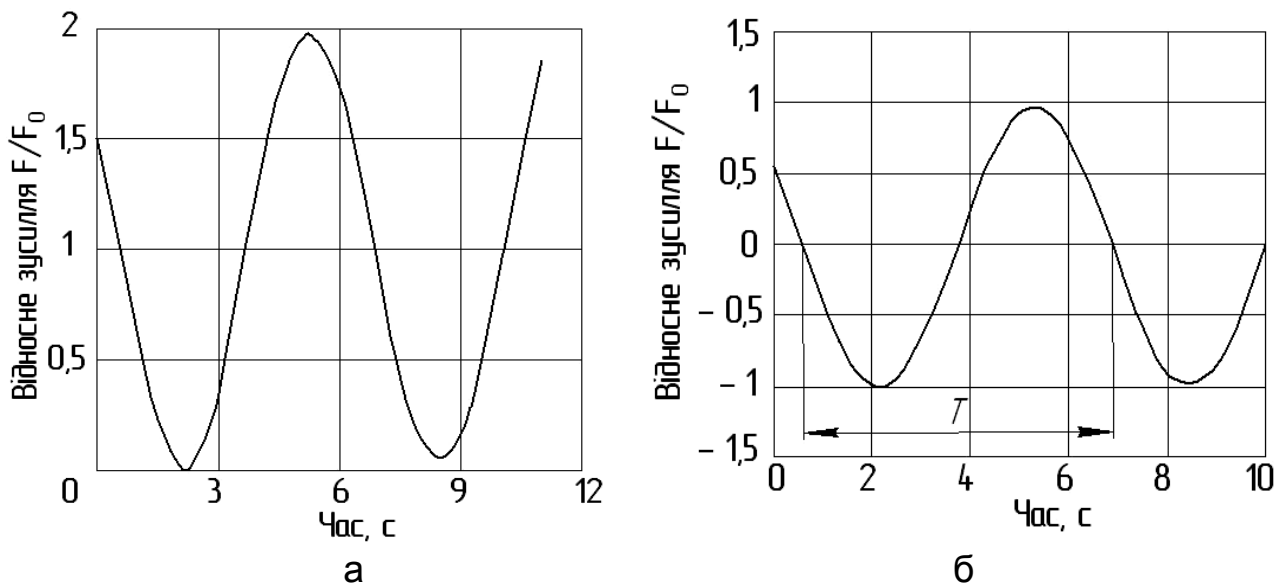


Рис. 3.6 – Характер зміни зусилля при динамічному навантаженні зі змінною (а) і знакозмінною амплітудами (б)

У будь-якому випадку характер напружень, які розвиваються в матеріалі при динамічній знакозмінній дії не порівнянний ні з одним з вищеперерахованих випадків, і може бути визначений як вібронапружений стан. Цей вид напруженого стану відрізняється яскраво вираженим хвилевим характером руху фронтів ущільнення-розтягування. Суперпозиція (накладення) прямих і зворотних хвиль призводить до локального складання або віднімання амплітуд динамічного навантаження, внаслідок чого з кроком, близьким до довжини хвилі λ , виникають зони подвоєного напруження.

$$\lambda = v \cdot T \quad (3.5)$$

де ν - швидкість поширення хвиль в твердому тілі (ця швидкість близька до швидкості поширення звуку в твердому тілі в поздовжньому і поперечному напрямках), м/с;

T - період коливань, с.

Це дозволяє досягати граничного напруження руйнування навіть у разі дії сил удвічі меншої інтенсивності, порівняно із статичним навантаженням.

Найбільшого результату можна добитися при дії сили на руйноване тіло з частотою близькою до частоти власних коливань. У цьому випадку спостерігається явище різкого росту амплітуди вимушених коливань, тобто резонанс. Якщо тіло, має пружні властивості, то власна частота коливань дорівнює

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (3.6)$$

де k - коефіцієнт пружності тіла, Па; m — маса тіла, кг

Для затухаючих коливань резонансна частота зовнішньої сили буде рівна

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \quad (3.7)$$

Вібраційне навантаження можливе практично при всіх видах механічної дії.

Розривне напруження формується також при простому розтягуванні або при руйнуванні вибухом, внутрішнім тиском газів або рідин. У техніці такими напруженням піддаються матеріали, які обробляються в колоїдних млинах під дією кавітації [67]. Детально ефекти кавітації, використовувані для подрібнення, досі недостатньо вивчені.

3.3. Ефективність змішувально-подрібнювальних процесів у харчових технологіях

Для виявлення міри ефективності різних схем подрібнення необхідно відповісти на наступні питання: які завдання процесу подрібнення в період підготовки матеріалу до змішування і безпосередньо в камері технологічного апарату і яким вимогам повинні відповідати оптимальний подрібнювач – змішувач?

При розгляді цих питань основну увагу приділимо проблемам подрібнення і змішування дисперсних середовищ за участю твердої фази.

Усе різноманіття таких завдань можна розбити на два великі класи:

- технологічні завдання (пов'язані з наданням матеріалу необхідних властивостей, зменшенням адгезії до робочих поверхонь, зменшенням відмінностей в дисперсності окремих інгредієнтів тощо);
- споживчі завдання (пов'язані з наданням продукту нових

споживчих властивостей: смаку, запаху, кольору).

При рішенні технологічних завдань змішування можуть виникати наступні цілі:

- отримання принципово нових матеріалів;
- надання матеріалам нових фізико-хімічних властивостей;
- інтенсифікація або уповільнення тепло- і масообмінних, хімічних і біохімічних процесів;
- підвищення безпеки технологічного процесу (вибухобезпечність, пожежобезпечність та ін.).

Споживчі завдання змішування включають наступні цілі:

- створення продуктів харчування з новими властивостями;
- надання нових смакових властивостей відомим продуктам;
- надання привабливому вигляду, бажаній колірній гамі;
- підвищення терміну зберігання продуктів харчування.

При рішенні як технологічних, так і споживчих завдань основною проблемою подрібнення і змішування отримання максимальної кількості суміші в мінімальні терміни при мінімальних витратах енергії. Деяким інтегральним показником ефективності процесу змішування може служити величина [68]

$$\varepsilon = \frac{V \cdot J}{\tau \cdot N}, \quad \text{або} \quad \varepsilon = \frac{Q \cdot J}{N} \quad (3.8)$$

де V – об'єм змішувача, м^3 ;

Q - об'ємна продуктивність змішувача, $\text{м}^3/\text{с}$;

τ - час, с;

N - витрати усіх видів енергії на процес, Вт;

J - критерій якості змішування.

Критерій J може бути визначений по одному з відомих виразів, наприклад [69]

$$J = \frac{\sigma^2}{S_2} \quad (3.9)$$

де σ^2 - генеральна дисперсія розподілу ключового компонента в суміші;

S_2 - дисперсія абсолютно не змішаної системи.

Аналіз якісно-енергетичного показника ефективності змішування ε показує, що його підвищення можливе або шляхом скорочення часу досягнення заданого технологічного результату τ , або зниженням витрат потужності на процес N .

Яким же вимогам повинен відповідати подрібнювач - змішувач оптимальної конструкції для досягнення максимальної ефективності процесу змішування. Такі вимоги мають бути наступними:

- максимальна кількість поверхонь зрушення, що утворюються за одиницю часу;
- максимальна кількість складових рухів робочого органу, корпусу або їх елементів, що дозволяють надавати групам часток поступальне і обертальне переміщення відносно площин зрушення і одній навколо іншого;
- максимальна швидкість поновлення поверхні поділу фаз при не сталому, турбулентному характері їх руху;
- адаптивність елементів поверхні робочого органу, яка забезпечує мінімальний опір його переміщенню в просторі і самовстановлюючий характер миттєвого положення в середовищі під дією зовнішнього опору;
- комбінація різних видів і способів підведення енергії на компенсацію зміни потенційного положення часток, розрив внутрішніх зв'язків і дифузійне перенесення;
- мінімальні витрати на дисипацію енергії в тепло.

При одночасному рішенні завдань подрібнення і диспергування окремих компонентів суміші або агрегатних частинок, додатковими вимогам до змішувача будуть:

- високі локальні градієнти зрушення і тиску;
- безперервність подання частинок в зону подрібнення і відведення з цієї зони.

Як же визначитися з найбільш ефективним подрібнювачем-змішувачем для одночасного виконання вказаних вимог.

Найчастіше для оцінки ефективності роботи подрібнювачів використовується коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{A_{\Pi}}{A_{\Pi} + A_y + A_o}, \quad (3.10)$$

де A_{Π} - робота утворення нової поверхні, Дж;

A_y - робота пружної деформації;

A_o - робота пластичної деформації.

Цей показник фізично цілком обґрунтований, оскільки показує відношення корисних витрат енергії до загальних. Разом з тим практичне застосування критерію ускладнене, оскільки правильно оцінити величину корисних робіт практично неможливо. Для розрахунку A_{Π} у формулі Ребіндера необхідно знати величину коефіцієнта пропорційності K_S , інформація про який також обмежена:

$$A_{\Pi} = K_S \cdot \Delta S, \text{ Дж} \quad (3.11)$$

де A_S - приріст площі нової поверхні, м².

Щоб уникнути труднощів теоретичного розрахунку A_{Π} багато авторів вводять в розгляд непрямі параметри енергетичної

ефективності. Наприклад, при порівнянні молоткових дробарок запропонований показник питомого завантаження ротора P_{II} :

$$P_{II} = \frac{N}{D \cdot L}, \text{ кВт/м}^2 \quad (3.12)$$

де N - споживана потужність, кВт;
 D - діаметр ротора, м;
 L - активна довжина ротора, м.

Фізично цей показник відповідає енергонапруженості одиниці площі діаметрального перерізу дробарки. У такому вигляді цей показник не може бути застосованим до інших видів подрібнювачів.

Для кульових млинів широко використовують показник питомої продуктивності Π_{II} , що є відношенням продуктивності млинів G_M , т/год до об'єму його корпусу V_A , м³.

$$\Pi_{II} = \frac{G_M}{V_A}, \text{ т/м}^3 \quad (3.13)$$

Продуктивність млина або дробарки, виражена в кілограмах в годину або тоннах за годину, ніяк не характеризує ефективність їх роботи. В цьому відношенні більше обґрунтовано виражати продуктивність в абсолютному прирості нової поверхні ΔS м²/год. Проте вимір приросту поверхні ускладнений і тому в практичних розрахунках навряд чи знайде широке застосування. Виразимо приріст поверхні ΔS через характеристики матеріалу і продуктивність млина. Питому поверхню дисперсного матеріалу S_d розраховують за формулою [70]

$$S_d = \frac{S_M}{V_M} = \frac{n6\pi d_{\text{э}}^2}{n\pi d_{\text{э}}^3} = \frac{6}{\psi \cdot d_{\text{э}}}, \text{ м}^2/\text{м}^3 \quad (3.14)$$

де S_M - зміна сумарної площі поверхні часток матеріалу в одиницю часу м²/с;

V_M - об'ємна продуктивність млина, м³/с;

n - рахункова кількість часток;

ψ - чинник форми частки - відношення площі поверхні частинки неправильної форми до площі поверхні еквівалентної за об'ємом сфери діаметром $d_{\text{э}}$;

$d_{\text{э}}$ - середній еквівалентний діаметр частки матеріалу, м.

Визнаючи з формули (3.14) S_M , отримаємо:

$$S_M = \frac{6V_M}{\psi \cdot d_{\text{э}}} \text{ або } S_M = \frac{6G_M}{\psi \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho_M}, \quad (3.15)$$

де ρ_M - істинна щільність матеріалу, кг/м³;

G_M - масова продуктивність млина, кг/с;

V_M - об'ємна продуктивність млина, м³/с.

Тоді приріст площі поверхні за одиницю часу визначиться так:

$$\Delta S = S_{M_2} - S_{M_1} = \frac{6G_M}{\rho_M} \left(\frac{1}{\psi_2 \cdot d_{\mathcal{E}_2}} - \frac{1}{\psi_1 \cdot d_{\mathcal{E}_1}} \right), \text{ м}^2/\text{с} \quad (3.16)$$

Введемо поняття міри подрібнення i :

$$i = \frac{d_{\mathcal{E}_1}}{d_{\mathcal{E}_2}}, \quad (3.17)$$

де $d_{\mathcal{E}_1}, d_{\mathcal{E}_2}$ - відповідно середній початковий і кінцевий розмір часток подрібнюваного матеріалу.

З урахуванням (3.17) формула (3.16) приймає вигляд:

$$\Delta S = \frac{6G_M}{\psi_1 \cdot \rho_M \cdot d_{\mathcal{E}_1}} \left(\frac{\psi_1}{\psi_2} \cdot i - 1 \right) \text{ або } \Delta S = \frac{6G_M}{\psi_2 \cdot \rho_M \cdot d_{\mathcal{E}_2}} \left(\frac{\psi_1}{\psi_2} - \frac{1}{i} \right), \quad (3.18)$$

Як правило, форма часток матеріалу до i після подрібнення різна, але у тих випадках, коли цією зміною можна нехтувати, формула (3.18) значно спрощується:

$$\Delta S = \frac{6G_M}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_{\mathcal{E}}} (i - 1) \quad (3.19)$$

У формулу (3.19) входять найчастіше вживані в промисловій практиці параметри: продуктивність G_M , міра подрібнення i , щільність матеріалу ρ_M , початковий розмір шматків $d_{\mathcal{E}}$, а чинник форми ψ є табличною величиною, відомою для різних класів матеріалів.

З урахуванням наведених вище міркувань сформулюємо визначення параметра енергетичної ефективності.

Параметр енергетичної ефективності - це відношення технологічного результату подрібнення (ΔS), що корисно досягається, до сумарних енергетичних витрат, що досягаються в одиниці робочого об'єму подрібнювача.

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{V_A \cdot N} \quad (3.20)$$

Цей показник має розмірність $1/\text{м} \cdot \text{Дж}$ або $\text{с}/\text{Нм}^2$. Тобто цей параметр показує приріст нової поверхні в одиниці об'єму помольного простору на одиницю витраченої роботи в одиницю часу. З урахуванням формули (3.19)

$$\varepsilon = \frac{6G_M \cdot (i - 1)}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_{\mathcal{E}}}, \text{ м}^2/\text{кг} \quad (3.21)$$

Тоді значення критерію якості I в раніше записаній формулі може бути подано у вигляді

$$I = \frac{6(i - 1)}{\psi \cdot \rho_M \cdot d_{\mathcal{E}}}, \text{ м}^2/\text{кг} \quad (3.22)$$

З урахуванням розмірності критерію якості I , формулу можна привести до безрозмірного виду

$$\varepsilon = \frac{G^3 \cdot I}{\rho_M \cdot V_A \cdot N} \quad (3.23)$$

Запропонований показник може бути використаний для порівняння будь-яких видів подрібнювального устаткування, вживаного для переробки одного і того ж матеріалу. При порівнянні апаратів для подрібнення різних матеріалів у формули (3.22), (3.23) необхідно ввести параметр, який характеризує міцність матеріалу

$$\varepsilon = \frac{\Delta S \cdot \Pi_{PS}}{V_A \cdot N}, 1/\text{м}^3 \quad (3.24)$$

де Π_{PS} - показник міцності матеріалу, Дж/м².

Величина $N/\Delta S$ також побічно характеризує міцність подрібнюваного матеріалу, оскільки за визначенням

$$\Pi_{PS} = \frac{A_S}{S_M}, \quad (3.25)$$

де A_S - робота руйнування, Дж.

Вважаючи, що основну долю в роботу руйнування вносить робота пружної деформації, то для усього об'єму матеріалу V_M можна записати [70]:

$$A_S = \frac{\sigma^2 V_M}{2E}, \quad (3.26)$$

З урахуванням формули (3.26) критерій, що враховує приріст площі поверхні подрібненого матеріалу і його міцнісні властивості прийме вигляд:

$$I = \frac{6(i-1) \cdot \Pi_{PS}}{\rho_M \cdot \psi \cdot d_{\text{э1}}}, \text{Дж/кг} \quad (3.27)$$

з урахуванням формул (3.25) і (3.26)

$$I = \frac{3(i-1) \cdot \sigma^2 \cdot V_M}{\rho_M \cdot \psi \cdot d_{\text{э1}} \cdot S_M \cdot E}, \quad (3.28)$$

а з урахуванням раніше записаного співвідношення

$$I = \frac{(i-1) \cdot \sigma^2}{\rho_M \cdot 2E}, \text{м}^2/\text{с}^2 \quad (3.29)$$

де σ - межа міцності матеріалу, Па;

E - модуль Юнга, Па.

Параметр ε тим вищий, чим більший приріст нової поверхні буде досягнутий для міцніших матеріалів при менших енергетичних витратах і мінімальному об'ємі помольної камери.

Залежність параметра енергетичної ефективності ε від об'ємної продуктивності млина V_M подана на рис.3.7.

Апроксимація залежності параметра енергетичної ефективності ε від продуктивності млина або дробарки по готовому продукту V_M виконана за допомогою електронних таблиць Excel. Залежність апроксимується степенною функцією виду

$$\varepsilon = n \cdot V_M^{-1}, \quad (3.30)$$

де n – чисельний коефіцієнт (змінюється в межах від 1200, для верхньої межі точок, до 1 - нижня межа).

На рис. 3.7 подані порівняння табличних даних і розрахованих за формулами (суцільна лінія) при $n = 15$. Середньоквадратичне відхилення $R^2 = 0,7142$. Об'ємна продуктивність млина або дробарки за готовим продуктом у формулі (3.30) стоїть в чисельнику ($V_M = G_M/\rho$), тому логічно чекати прямої пропорційності ε і V_M , проте вплив інших параметрів, що в свою чергу є функцією потужності, призводить до обернено пропорційної залежності.

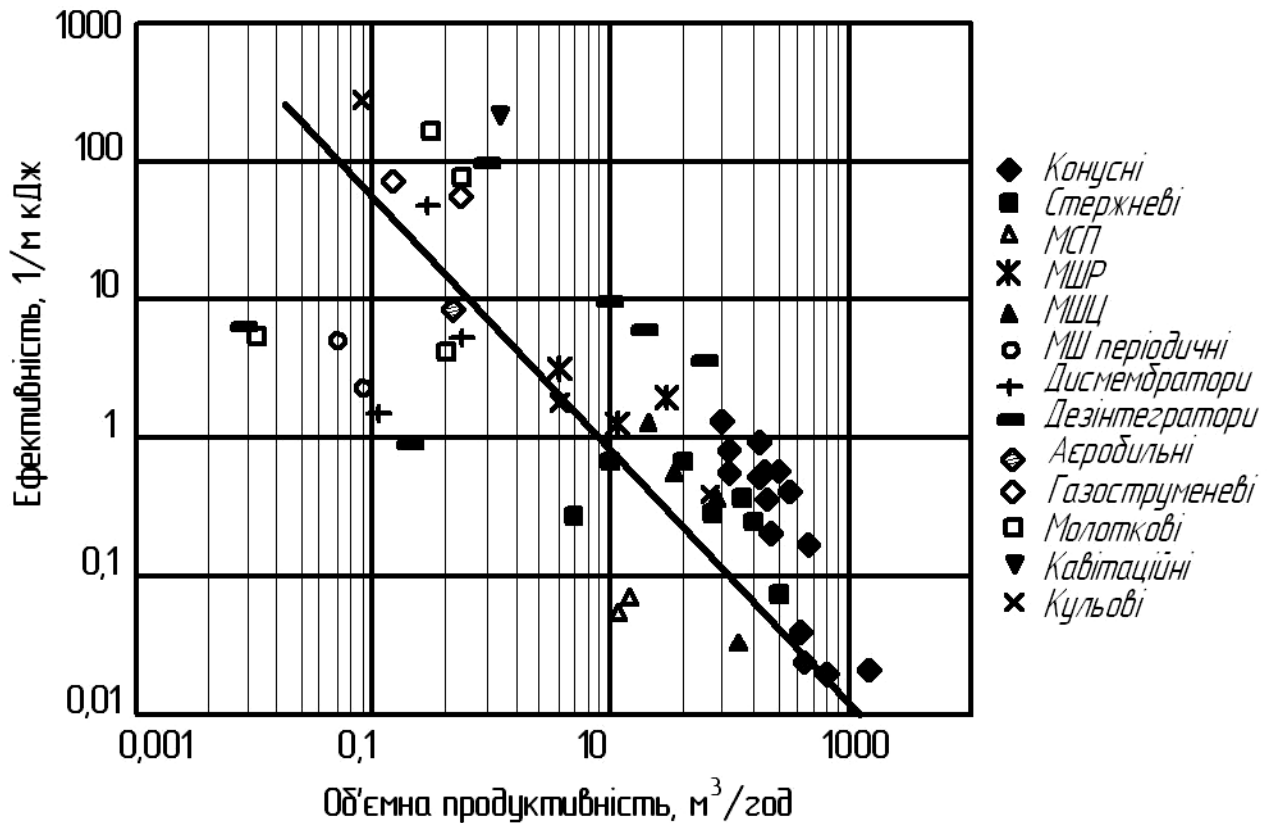


Рис. 3.7 – Порівняння різних дробарок і млинів по параметру енергетичної ефективності

Проведений за допомогою запропонованого параметра аналіз свідчить про те, що найбільш ефективними подрібнювачами-змішувачами є кавітаційні.

3.4. Енергетичні показники і напружено-деформаційні процеси при механічному подрібненні м'ясної сировини

Механічна переробка м'ясопродуктів полягає, в основному, в їх різанні, при якому зменшуються лінійні розміри шматків оброблюваної продукції, пресуванні, дробленні, механізованій обвалці м'яса тощо. В усіх цих випадках матеріал, що переробляється, піддається силовій дії з боку робочого інструменту і, отже, в тій або іншій формі деформаціям [71].

Так, якщо розглядати процеси різання, то, як встановлено академіком Ребіндером, енергетичні витрати на цей процес підкоряються наступному закону:

$$dA = dA_1 + dA_2 + dA_3 \quad (3.31)$$

де dA_1 - енергія, що витрачається на утворення елемента нової поверхні (на подолання молекулярних сил);

dA_2 - енергія, що витрачається на компенсацію втрат, пов'язаних з подоланням сил тертя;

dA_3 - енергія, що витрачається на об'ємні пластичні деформації;

$dA_2 + dA_3$ - безповоротна частина енергії, що переходить в тепло.

Як відмічав академік Кузнєцов, питома вага кожної складової в загальній витраті енергії залежить від механічних властивостей продукту, наприклад, при різанні м'яса при кімнатній або не дуже низьких негативних температурах основна частина енергії витрачається на пластичну деформацію (до 85% усіх витрат) і роль поверхневої енергії другорядна, а при дробленні крихких продуктів (м'ясо при дуже низьких температурах, кістка тощо) роль поверхневої енергії значно зростає [72].

Пресування, як технологічний процес обробки м'ясопродуктів також пов'язаний із створенням об'ємного напружено-деформованого стану матеріалу, що стискається. Таким чином, для того, щоб теоретично досліджувати процеси механічної переробки м'яса необхідно знати параметри напружено-деформованого стану (тобто напруження і деформації) по всьому об'єму сировини, що переробляється. Параметри напружено-деформованого стану - напруження і деформації - дають повну картину внутрішніх сил і геометричної зміни форми в процесі механічної обробки продукту. Зупинимось коротко на визначенні і формулюванні цих основних понять механіки деформованих тіл, необхідних для математичного опису ряду процесів механічної переробки м'ясної сировини.

Теорії напруженого і деформованого стану вірні для будь-яких тіл, оскільки базуються на чисто геометричних і статичних співвідношеннях. Функціональну залежність між напруженнями і деформаціями цілком визначається природою опору тіл деформаціям і, таким чином, має фізичний характер. Сучасний стан науки поки що не дозволяє розкрити

повністю і описати в математичній формі взаємозв'язки між окремими частками тіла при його деформуванні. Доводиться задовольнятися інтегральним ефектом опору тіла деформаціям, що визначається експериментальним шляхом при випробуванні зразків. Феноменологічно зв'язок між напруженням і деформаціями тіл встановлюється на підставі двох гіпотез.

Гіпотеза детермінантності стверджує, що напружений і деформований стан тіл повністю визначається заданням функціоналів [73].

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}(t) &= L_{ij} [\varepsilon_{\min}(\xi), T(\xi), \theta(\xi)]_{\xi=0}^{\xi=t} \\ \varepsilon_{ij}(t) &= N_{ij} [\sigma_{\min}(\xi), T(\xi), \theta(\xi)]_{\xi=0}^{\xi=t} \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

де L і N - деякі оператори, що залежність від фізичної природи тіла; t - час;

T і θ — деякі параметри, наприклад, температура, вологість тощо.

Друга гіпотеза, гіпотеза макровизначеності, по суті вже міститься у першій. Вона стверджує, що на підставі однорідного напруженого стану, який легко реалізується при випробуванні зразків, можна характеризувати неоднорідні напружені стани в тілах, що, як правило, реалізується, на практиці.

Математичні оператори L і N визначаються як фізичною природою тіла, так і його станом (температурою, вологістю, мірою анізотропії тощо).

Таке формулювання завдань теорії деформованих середовищ.

Різання м'ясопродуктів за допомогою різального інструменту може бути здійснене при вільному або обмеженому стані сировини [74]. На практиці чисто вільне різання зустрічається рідко. Звичайне зміщення продукту в процесі різання обмежується хоч би однією, наприклад, горизонтальною площиною. Тому називатимемо вільним процес різання у тому випадку, якщо різання здійснюється однією різальною кромкою і частини продукту, що розділяються ножом, можуть вільно або з невеликим опором зміщуватися в сторони. А при обмеженому різанні продукт перерізується на дрібніші шматки при об'ємному стискуванні подрібнюваного об'єкту [74]. В цьому випадку зміщення відрізаних об'ємів ускладнене.

Аналізуючи дані, приведені в джерелах [75, 76, 77 та ін.], можна зробити висновок, що руйнування твердих тіл під дією зовнішніх сил відбувається, в основному, за наявності в тілі хоч би однієї з трьох умов:

- локальне перенапруження поверхневих мікрооб'ємів при накладанні зовнішніх сил. При цьому в структурі мікрооб'єму спочатку відбуваються розриви зв'язків, а потім утворюється тріщина. Вірогідність розриву

зв'язків в місцях перенапруження значно вища, ніж на інших ділянках тіла, оскільки напружений стан в місцях прикладання навантаження визначається не середнім напруженням в тілі, а локальним перенапруженням у вершині тріщини (місці прикладання сили);

- наявність в структурі тіла дефектних місць (включення неоднорідностей, порожнеч та ін.), які не є концентраторами напружень, але, ще до прикладення навантаження, ослаблюють міжмолекулярні зв'язки і структуру тіла;

- розвиток в тілі великих пружних або пластичних деформацій. При цьому в тілі спостерігається розривання нормально-напружених зв'язків в місцях великих деформацій.

Руйнування твердих тіл є ступінчастим процесом, який починається значно раніше за появу видимих тріщин. Нині немає єдиної теорії руйнування, тому для різних фізичних станів тіл і умов руйнування приймаються різні моделі руйнування. Основними видами руйнування є [78, 75, 76, 79]:

- крихке руйнування без залишкових деформацій упродовж знову отриманих поверхонь. Такий тип руйнування властивий матеріалам у склоподібному стані.

- пластичне руйнування. Воно відбувається при значних пластичних деформаціях в результаті втрати здатності опори пластичної деформації. При зростанні дотичних напружень пластична деформація завершується зрізом, а спільно з нормальними напруженнями - відривом.

- втомне руйнування обумовлене поступовим наростанням мікроушкоджень в структурі тіла при його циклічному навантаженні. Мікроушкодження збільшуються в процесі прикладання змінних напружень і утворюють макроруйнування. В результаті циклічних навантажень межа міцності матеріалів знижується у декілька разів [76, 80]. Руйнування природних композитів, зокрема м'яса, значно відрізняється від руйнування тіл з однорідною структурою. Розривання структурних армуючих волокон, як правило, здійснюється на різних рівнях і заново утворені поверхні не знаходяться в одній площині. Нерівномірність розподілу армуючих волокон по об'єму матриць продуктів, відмінності у міцності волокон і бічних зв'язків уздовж ланцюгових молекул і макромолекул істотно впливають на деформаційну поведінку композитів у зоні руйнування.

Опір руйнуванню м'яса залежить від структури і агрегатного стану компонентів, що входять до нього, умов навантаження та інших чинників. Кількісну оцінку опору матеріалів руйнуванню, визначення коефіцієнтів, що впливають на процес різання, необхідно проводити за результатами

експериментів у різних умовах і режимах ведення процесу різання зразків досліджуваного продукту.

Нині добре вивчені міцнісні характеристики матеріалів при їх одновісному навантаженні. Проте визначення цих показників при складному напруженому стані досить ускладнене. З метою використання міцнісних характеристик, отриманих при одновісному напруженому стані, для визначення характеристик того ж матеріалу при складному напруженому стані введені критерії руйнування - теорії міцності. Реальні матеріали можна умовно розділити за деформаційною поведінкою на групи. На сьогоднішній день розроблена велика кількість критеріїв руйнування відповідно до цих груп. Найбільше поширення серед них отримали: теорія найбільших лінійних деформацій, теорія найбільшої дотичної напруги, теорія повної потенційної енергії, теорія Мора, критерій Давиденкова-Фридмана та ін. [81,76].

Для композитів, у зв'язку з ускладненням процесу їх руйнування, необхідно враховувати також вплив структури на процес.

Механіка руйнувань розглядає різні моделі руйнувань при великих і малих деформаціях, втраті стійкості і теорію тріщин. За допомогою основних закономірностей механіки руйнування можна не лише пояснити різні явища при руйнуванні, але і прогнозувати умови руйнування.

При навантаженні крихкого тіла, що мало деформується, його деформація пропорційна величині напружень аж до межі міцності σ_e , після чого матеріал руйнується. При крихкому руйнуванні матеріал деформується мало і, після руйнування, майже не має залишкових деформацій. Вся енергія, що витрачається на процес руйнування, йде на подолання сил зчеплення атомів, тобто на утворення нових поверхонь [75, 76].

При руйнуванні пластичних матеріалів енергія витрачається не лише на розривання структурних (міжатомних) зв'язків, але і на супроводжуючі процес значні пластичні деформації. При цьому енергія, витрачена на деформацію, перетворюється у тепло. При пластичному руйнуванні зовнішні зусилля викликають у руйнованому матеріалі нормальні і дотичні напруження. Варто зазначити, що крихкість і пластичність (в'язкість) не є незмінними властивостями більшості матеріалів, а визначаються лише їх фізичним станом, в яких матеріал може знаходитися при різних температурах, умовах навантаження тощо.

Енергія, що витрачається на руйнування тіла, визначається площею під кривою деформації (рис. 3.8). Очевидно, що величина витрати енергії для крихкого руйнування матеріалу значно менша, ніж для пластичного руйнування. У зв'язку з цим доцільніше, з метою економії енергії, проводити процес подрібнення матеріалу в крихкому стані [82, 83].

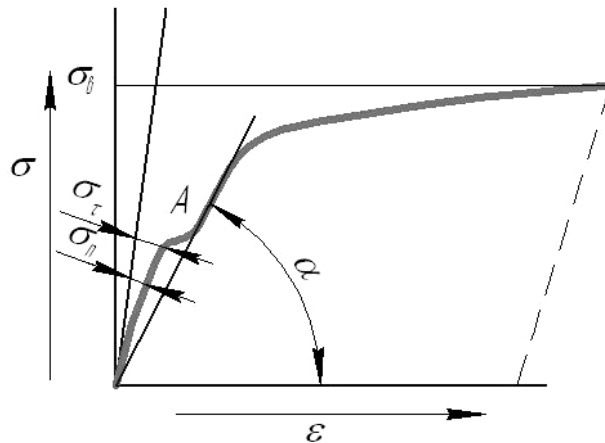


Рис. 3.8 - Діаграма розтягування пластичних матеріалів

Особливе місце в механіці руйнування займає теорія тріщин, оскільки вона формулює умови локального руйнування в даній точці тіла. Встановлено, що утворенню тріщини передує певний період часу накопичення мікродфектів в зоні руйнування [77]. Однією з найважливіших сторін теорії тріщин є використання ефекту нерівномірного розподілу напружень при утворенні тріщин під дією зовнішніх навантажень. Згідно цієї теорії саме у вершині тріщини має місце найбільша концентрація напружень, і, отже, вершина тріщини є найбільш можливим місцем подальшого руйнування тіла [75, 76, 77]. У зв'язку з цим цікавим є питання про напружений стан матеріалу в зоні, безпосередньо прилеглої до місця руйнування. Значний вплив на розподіл напружень у вершинах тріщин має також напрям зміщення знову утворених поверхонь (берегів) тріщини. Загальний вигляд полів деформацій і напружень в околицях вершини тріщини може бути отриманий шляхом поєднання напружень, що має місце при здійсненні трьох різних однонапрямлених зміщень поверхонь тріщин, поданих на рис.3.9 [77].

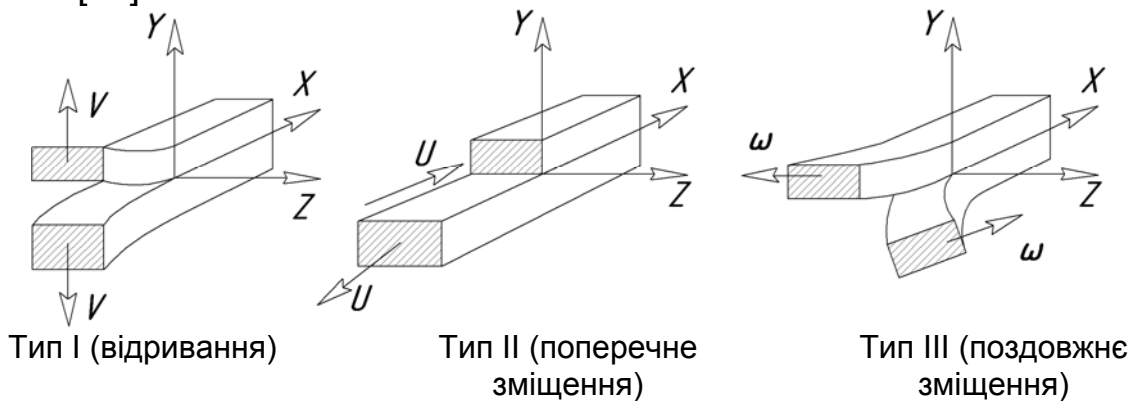


Рис. 3.9 – Три основні типи поверхневих тріщин при руйнуванні матеріалів

Велике практичне значення має зміщення берегів виду 1, що спостерігається при відривному русі берегів тріщин. При цьому виді деформації береги тріщин зміщуються відносно свого початкового положення у площинах, паралельних площинам YX і XZ . При ковзанні берегів тріщини у напрямі осі OX в околицях вершини тріщини виникають поля напружень, відповідні деформації типу II - поперечного зміщення.

При зміщенні берегів тріщини паралельно площини XZ в протилежні напрямки по осі Z (антиплоска деформація) має місце деформація типу III. Таке зміщення називається поздовжнім зміщенням і спостерігається при розрізанні тіл ножицями [77, 79, 77].

Вирази для визначення полів напружень і деформацій поблизу вершини тріщини за різних видів зміщення її берегів описуються за допомогою математичної теорії тріщин, запропонованої Мусхелишвили Н.І. і, надалі, широко використаною для опису напруженого стану і переміщень в області вершини тріщин [84,76,77].

Якщо помістити точку початку полярних координат r і θ у вершині тріщини (рис. 3.10,а) і представити напружений стан елементарного об'єму тіла в області вершини тріщини відповідно до рис. 3.10,б, то напружений стан і переміщення елементарного об'єму в довільній точці M при руйнуванні тіла за типом I (відривне руйнування) описується рівняннями математичної теорії тріщин [85, 76, 77]:

$$\sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.33)$$

$$\sigma_z = \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} ; \tau_{xz} = \tau_{yx} = 0 \quad (3.34)$$

$$U = \frac{K_1}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\mu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (3.35)$$

$$V = \frac{K_1}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\mu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (3.36)$$

де K_1 - коефіцієнт інтенсивності напружень в даній точці об'єму, прилеглому до вершини тріщини;

r - відстань від вершини тріщини до точки M ;

θ - кут між віссю X і радіус-вектором r .

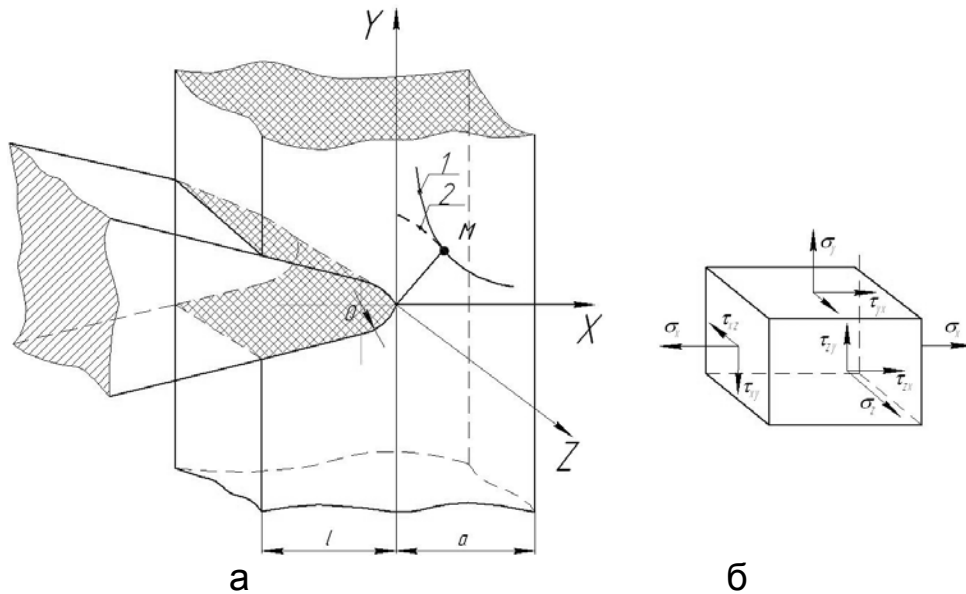


Рис. 3.10 – Схема розподілу напружень вздовж осі X при утворенні крайової тріщини методом відривання.

У разі дії розтягуючих напружень, розподілених уздовж осі X(Y=0), їх величина дорівнює:

$$\sigma_y = K_I / \sqrt{2\pi \cdot X} \quad (3.37)$$

Аналогічні рівняння отримані для визначення напружень і переміщень в об'ємах, прилеглих до тріщин при II і III типах зміщення берегів тріщин.

Для III типу зміщення берегів тріщини ці рівняння мають вигляд [85, 86, 77]:

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z &= 0 \\ \tau_{xz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2}; \quad \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \\ \omega &= \frac{K_{III}}{G} \cdot \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Величини K_{II} , K_{III} - коефіцієнти інтенсивності напружень для II і III типів зміщень берегів тріщин.

Коефіцієнт інтенсивності напружень може бути визначений через коефіцієнт концентрації напружень K в околиці вершини надрізу, якщо радіус округлення ρ вершина надрізу (див. рис. 3.10) наближається до нуля [76, 86, 77]:

$$K_I = 0,5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\rho} = 0,5 \cdot \sqrt{\pi \rho} \cdot K \cdot \sigma_{\text{ном}} \quad (3.39)$$

де σ_{\max} - напруження у вершині надрізу;

$\sigma_{\text{ном}}$ - величина розтягуючих напружень у вершині надрізу.

Рівняння (3.33) має сингулярний член $1/\sqrt{r}$ і при його рішенні отримуємо, що величина розтягуючого (зрушуючого) напруження в області вершини тріщини прагне до нескінченності (крива 1, рис. 3.10, а). Це означає, що руйнування (розрізання) тіла в області, прилеглої до вершини тріщини, настає при будь-якій незначній величині зовнішнього зусилля. Умови мимовільного поширення тріщин характерні для порівняно однорідних за структурою крихких тіл, які мають значну внутрішню енергію, наприклад, пружною деформацією, неурівноваженою внутрішнього напруження та іншими чинниками.

Перерозподіл напружень в області тіла, прилеглої до вершини тріщини, можна охарактеризувати коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I , K_{II} , K_{III} (залежно від характеру навантаження).

У ідеальному твердому і крихкому тілі процес утворення тріщини необхідно розділяти на два абсолютно різних за своєю природою етапи зародження тріщини та її поширення [75, 87, 77].

Значна частина твердих тіл має великий період релаксації. У зв'язку з цим залишкові напруження, що виникають у них при технологічній обробці, не релаксують і тривалий час знаходяться у взаємно урівноваженому стані. Якщо до такого тіла підвести енергію, достатню для руйнування міжмолекулярних зв'язків у поверхневому шарі, наприклад, зробити надріз, то одночасно з утворенням нових, вільних від навантажень поверхонь надрізу, в прилеглих до них об'ємах тіла знижується рівень напружень. Внаслідок цього відбувається виділення пружної енергії з цих об'ємів [88]. Потік цієї енергії спрямований у вершину тріщини і викликає різке збільшення напружень у цій зоні. Інтенсивність пружної енергії, що звільняється, і швидкість її спрямування у вершину тріщини при здійсненні надрізу залежить від рівня внутрішніх напружень (деформацій) в суцільному середовищі, але не перевищує швидкості поширення у цьому середовищі хвиль Рэлея [76, 77]. Для пружних матеріалів з внутрішніми напруженнями і навіть стиглих овочів досить зробити поверхневий надріз, тобто здолати енергетичний бар'єр утворення нових поверхонь, і тріщина починає швидко, поширюватися углиб тіла. Цей ефект пояснюється тим, що потік пружної енергії, що звільняється при зменшенні пружних напружень в областях тіла, прилеглих до знову утвореної поверхні розрізу, стікається у вершину тріщини і його величина значно перевищує енергію розкриття тріщини [76].

Реальні матеріали не мають ідеальних пружних властивостей і залишкові напруження у більшості твердоподібних тіл релаксують в часі. Такі середовища, як м'ясо, при плюсових температурах не здатні тривалий час акумулювати потенційну енергію. Тому енергетичний

бар'єр, що забезпечує існування тіла як єдиного цілого, у більшості реальних тіл перевершує потік вивільненої при утворенні нової поверхні енергії у вершині тріщини.

З досвіду відомо, що просування клина в глибину тіла здійснюється при прикладанні деяких кінцевих за величиною зовнішніх сил, діючих на тіло локально.

Для твердоподібних тіл неможливо здійснювати роботу по розкриттю тріщин наближеною до них силою. При описанні поведінки твердоподібних тіл в зоні розрізу доцільно розглядати їх і як суцільне, і, в той же час, як граничне дискретне середовище з нескінченно малою відстанню між елементами структури. Для цих середовищ правомірне введення рівномірно розподілених сил зчеплення між елементами структури, тобто напружень їх взаємодії в зоні розрізу. Визначаючи величину зв'язків, що розриваються, (граничних напружень), можливо однозначно визначити співвідношення між силовими і енергетичними параметрами механізму руйнування структури незалежно від властивостей руйнованого матеріалу поза зоною розрізу.

Однією з перехідних моделей від ідеального крихкого тіла до реальних є модель, що враховує пластичні деформації середовища у вершині тріщини перед її поширенням.

У пластичній області ріст величини напружень обмежується межею текучості матеріалу і зменшується концентрація напружень. Внаслідок чого напруження у вершині тріщини мають кінцеву величину. Ця модель була запропонована Г. Нейбером [84, 89], Е. Орованом і Дж. Ірвином [76]. Згідно цієї теорії робота на руйнування тіла складається з роботи на утворення нової поверхні і роботи на пластичні деформації при утворенні одиниці нової поверхні.

Ребиндер П. А. запропонував для розрахунку енергії, необхідної для руйнування будь-яких тіл, враховувати не лише роботу на отримання нової поверхні і пластичних деформацій у вершині тріщини, але і роботу на здійснення інших видів деформацій, які супроводять процес руйнування.

У моделі Г.І. Баренблатта [85] передбачається, що у матеріалі є сили зчеплення між структурними елементами середовища. Ці сили обмежують ріст напружень у вершині тріщини при прикладанні зовнішніх сил. Тріщина буде рости, якщо напруження σ_y будуть більші сил порогового значення напружень. Величина порогового значення напружень визначається молекулярними силами зчеплення, діючими між берегами тріщини поблизу її вершини, і є постійною для різних матеріалів. У зв'язку з цим крива 1 (див. рис. 3.10,а), що показує ріст величини σ_y наближається до осі Y не в нескінченності, а згинається і у

вершині тріщини ($X=0$) напруження стають рівними їх пороговому значенню (крива 2).

Обидві моделі мають ряд недоліків. Так, в першій передбачається, що руйнування здійснюється шляхом пластичної течії при утворенні зони пластичності перед вершиною тріщини, що справедливо для однорідних за структурою пружно-пластичних тіл.

У другій моделі руйнування настає, коли напруження у вершині тріщини перевершуватимуть за величиною порогове значення міцності структурних зв'язків. В той же час в таких тілах, як м'ясо, величини структурних зв'язків визначаються не лише силами міжатомної взаємодії, але і силами міжмолекулярних зв'язків.

У зв'язку з цим при різанні м'яса необхідно враховувати одночасно моделі Г. Нейбера, П.А. Ребіндера і Г.І. Баренблатта.

З теорії тріщин при вивченні процесу різання можна використати кінетику процесу руйнування.

Розрахунки процесів різання м'ясопродуктів необхідно робити на основі діаграм деформації м'яса, що отримуються в лабораторних умовах з дослідів на розривання. Відомо, що вивчення механічних властивостей тіл краще всього здійснювати при випробуваннях їх на розривання [80]. Взагалі, жоден з методів випробувань за об'ємом отримуваних відомостей не може конкурувати з простими випробуваннями на розтягування. Разом з тим, цінними з точки зору можливості застосування у розрахунках, ці відомості стають лише тоді, коли вони отримані в умовах, що забезпечують однорідність напруженого і деформованого станів випробовуваного зразка. Це означає, що вимір деформацій повинен робитися не по зміні відстані між затискачами випробувальної машини, а по базі зразка. Робити ж виміри деформацій на базі зразка за допомогою датчиків для таких тіл, як м'ясо, представляє великі технічні труднощі через його дуже малу жорсткість. Авторами робіт [90,91] запропонований метод, що забезпечує достатню міру однорідності напружено-деформованого стану і високу точність вимірювань напружень і деформацій.

Метод ґрунтується на випробуванні зразків у вигляді круглої, тонкої мембрани (рис. 3.11), що навантажується рівномірним тиском.

Під дією рівномірного тиску такі мембрани, як правило, деформуються по сферичній поверхні і, отже, має місце рівність [90,91]:

$$\varepsilon_u^p = \sqrt{2\varepsilon_{ij}^p \cdot \varepsilon_{ij}^p} / 3 \quad (3.40)$$

$$\varepsilon_u = \sqrt{3\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij}} / 2 \quad (3.41)$$

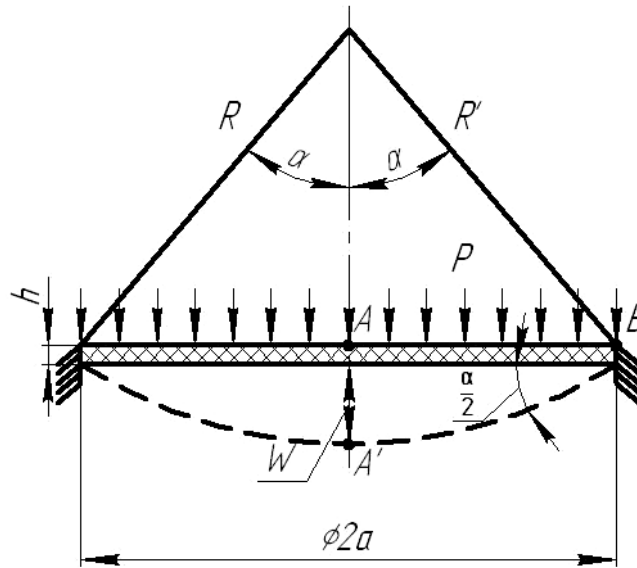


Рис. 3.11 – Схема навантаження круглої плоскої мембрани.

Отже, авторами розглянуті визначальні рівняння, покликані математично описувати реально існуючі у м'яса властивості пружності, в'язкості і пластичності. Очевидно, що в широкому температурному інтервалі, в якому проводяться різні виробничі процеси механічної переробки м'яса, енергетичні витрати на переробку і якість самої переробки істотно залежать від цих властивостей. Тому представляється важливим для інженерних розрахунків механічних процесів і устаткування вивчити температурні інтервали переважної реалізації тієї або іншої з властивостей або їх комбінації.

Як відмічалась раніше, основні технологічні процеси механічної переробки м'яса полягають головним чином в руйнуванні його тканин і структури, а також в інтенсивній деформації. Тому головним завданням механічної переробки м'яса являється зменшення енергетичних витрат на ці процеси. Теоретичний розрахунок енергії руйнування або деформації заданого об'єму м'яса ґрунтується на знанні напружено-деформованого стану в кожній точці, що визначається характером силової дії, геометричними розмірами і властивостями м'яса (пружністю, пластичністю, в'язкопружністю) за заданих умов навколишнього середовища. Іншими словами, усе визначається співвідношеннями, конкретну форму яких можна записати у вигляді :

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta \text{ та } \sigma_r = \sigma_\theta, \quad (3.42)$$

де ε_r і ε_θ ; σ_r і σ_θ - відповідно, деформації і напруження в радіальному і коловому (тангенціальному) напрямках.

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_r = \frac{A'B - AB}{AB} \quad (3.43)$$

$$\text{де } A'B = a/\cos \alpha/2, \quad R = a/\sin \alpha, \quad AB = a$$

Після підставки цих значень отримаємо:

$$\varepsilon = \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \frac{a}{\sin \alpha} - 1 \quad (3.44)$$

Інтенсивність напружень і деформацій, підраховані за формулами (3.40 і 3.41) будуть

$$\begin{aligned} \sigma_u = \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma \\ \varepsilon_u = 2\varepsilon_r = 2\varepsilon_\theta = 2\varepsilon \end{aligned} \quad (3.45)$$

На підставі безмоментної теорії сферичної оболонки, напруження, діючі в радіальному і тангенціальному напрямках визначаються формулою:

$$\sigma_u = \sigma = \sigma_r = \sigma_\theta = \frac{PR}{2h} = \frac{Pa}{2h \cdot \sin \alpha} \quad (3.46)$$

де h - товщина мембрани;

P - тиск.

Стріла прогину мембрани, як це витікає з геометричних міркувань (рис. 3.11) визначається виразом:

$$W = a \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (3.47)$$

Отже, діаграма деформації зразка у вигляді круглої, тонкої мембрани в координатах $\sigma_u - \varepsilon_u$ може бути побудована на підставі формул (3.44, 3.46, 3.47). Порядок побудови наступний. В процесі експерименту вимірюється тиск P і найбільший прогин мембрани W , що відповідає цьому тиску. За формулою (3.47) визначається кут α , відповідно до виразів (3.44) і (3.46) з урахуванням другої рівності (3.45) встановлюється координати діаграми деформації $\sigma_u - \varepsilon_u$.

Таким чином, діаграма деформації будується аж до моменту руйнування. Діаграма деформації може дати дуже важливу інформацію про характер деформації і руйнування тканин м'яса. Так, на підставі цієї діаграми, можуть бути встановлені межі застосовності закону Гуку, зв'язок між напруженням в пластичній області, межі плинності, значення напруження і деформацій у момент руйнування тканин м'яса або його інших структурних елементів, роботу руйнування тощо.

Схема взаємодії елементів каркаса м'яса з лезом подана на рис. 3.12 [72].

Розтин шарів каркаса виконаний в граничних точках ділянок контакту їх з лезом і один з одним. Дії відсічених елементів каркаса позначені $q_{i+k} = q_i$.

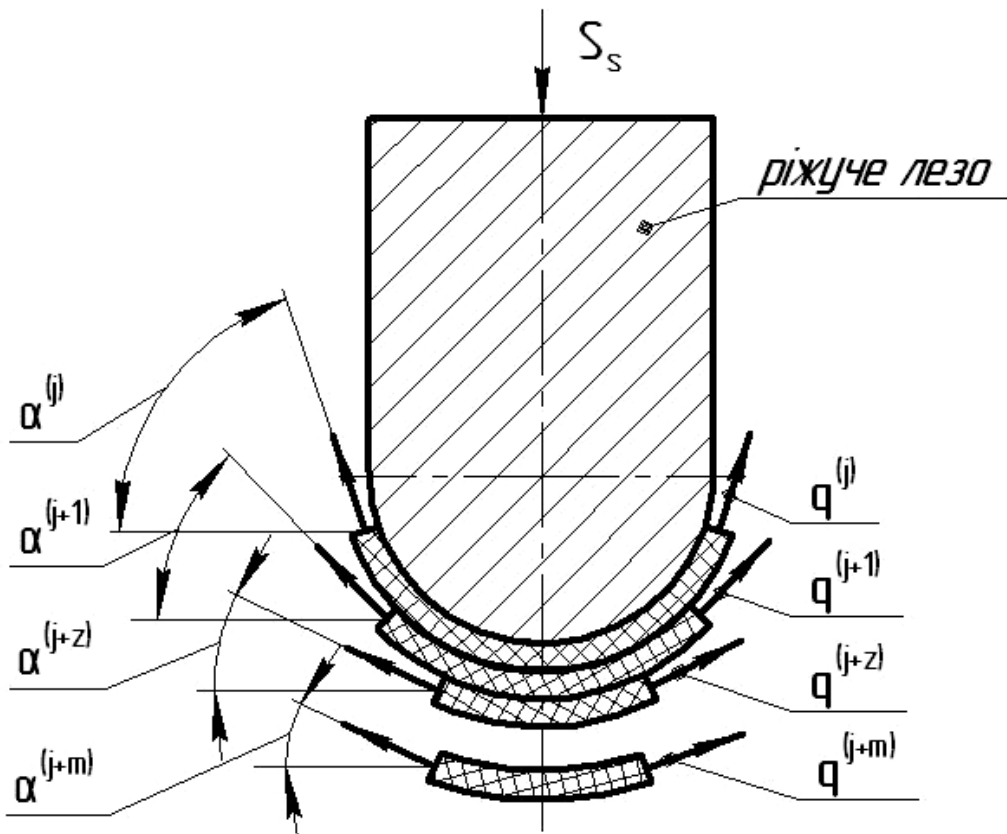


Рис. 3.12 – Схема взаємодії елемента каркаса з лезом

Індексом « j » позначений найменший номер навантаженого (ще не зруйнованого) шару каркаса, а $K = 1, 2, 3 \dots m$, де m — кількість навантажених шарів каркаса. Погонні сили q_i визначаються формулами: $q_i = \sigma_{pi} \cdot \delta$.

Орієнтація погонних сил в системах $y_i O X$ визначаються рівнянням похідної форми « i -того» шару в навантаженому стані. Позначимо погонне навантаження на лезо через S . Рівняння проєкцій погонних сил на вісь ординат будь-якої з системи $Y O X$ матиме вигляд^

$$S(y^*; y'^*) = -2 \sum_j^{j+m} q_1 [y_i(0); y'_i(0)] x \cdot \sin|\alpha_i| \quad (3.48)$$

Проєкція погонної сили, діючої на лезо, на вісь $O X$ дорівнюватиме нулю в силу симетрії даної взаємодії.

Характер зміни величини S_y в залежності від глибини впровадження леза в матеріал при $q_i = \Delta l_{ij} / \alpha$ і величині Δ в якості параметра наводиться на рис. 3.13.

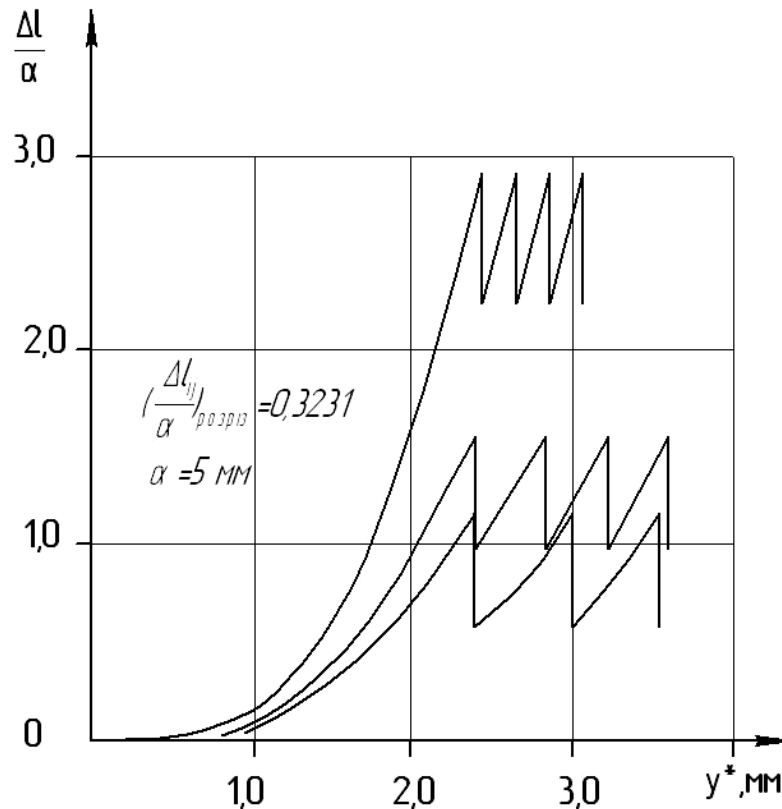


Рис. 3.13 – Залежність погонного навантаження на лезо від глибини його впродовження в матеріал: 1 - $\Delta = 0,6$ мм; 2 - $\Delta = 0,4$ мм; 3 - $\Delta = 0,2$ мм

Розриви першого роду відповідають руйнуванням шарів каркаса при $\Delta l_{ij}/a = 0,32$ (параметр призначений умовно).

Отримані формули дозволяють чисельно отримати зусилля при руйнуванні складної біологічної тканини м'яса лезом. Проте рахунок ускладнений відсутністю точних даних про властивості тканини в цілому і окремих її шарів.

З іншого боку пропонується модель матеріалу і опис способу руйнування його лезом дозволяє визначити умови зняття характеристик зразків матеріалу, що необхідно для збігу розрахункових і дослідних характеристик процесів різання.

Робота зовнішніх сил, витрачена на подрібнення матеріалів, може бути визначена за рівнянням Ребиндера :

$$A = A_1 + A_2 = k \cdot V + \sigma \cdot \Delta F \quad (3.49)$$

де A_1 - робота, витрачена на деформацію подрібнюваного об'єму, Дж A_2 - робота, витрачена на утворення нових поверхонь, Дж k - коефіцієнт пропорційності, рівний роботі деформації одиничного об'єму подрібнюваного тіла; σ - коефіцієнт пропорційності, рівний роботі на утворення нової одиничної поверхні тіла (питома поверхнева енергія); V - об'єм руйнованого тіла, м³; ΔF - площа знову утвореної поверхні, м.

Процес подрібнення характеризується лінійним ступенем подрібнення:

$$i = d_n / d_k \quad (3.50)$$

чи об'ємною [120]:

$$a = i^3 = d_n^3 / d_k^3 \quad (3.51)$$

де d_n , d_k - середні лінійні розміри шматочків подрібнюваного матеріалу до і після подрібнення, мм.

Середні лінійні розміри шматочків матеріалів до подрібнення і після визначаються за формулою [3,93]:

$$d = 3\sqrt{l \cdot b \cdot h} \quad (3.52)$$

де l , b , h - максимальні лінійні розміри шматочка за трьома взаємно перпендикулярними напрямками (довжина, ширина, висота).

Якщо замінити об'єм довільної частки на 1 м^3 рівнозначної величини з визначальним середнім розміром d , то робота, що витрачається на утворення нової поверхні, може бути визначена по формулою Риттингера :

$$A_2 = \sigma \cdot \Delta F = \sigma \cdot d_n^2 = k \left(\frac{1}{d_n} - \frac{1}{d_k} \right) \quad (3.53)$$

де k - постійна величина для кожного матеріалу, що відображає витрати енергії на утворення одиниці нової поверхні.

Ця формула дає добрі результати при дрібному подрібненні крихких матеріалів, коли витратою енергії на деформацію об'ємів можна нехтувати.

Варто зазначити, що для матеріалів в некрихкому (твердоподібному) стані закони перерозподілу енергії при взаємодії робочого органу з тілом відрізняються від відповідних витрат енергії для руйнування крихких тіл.

Робота, необхідна для перерізання рослинних матеріалів, згідно теорії Горячкина В.П. [94], складається з роботи на попереднє стискування шару і корисної роботи різання.

А.И. Пелеєвим було встановлене, що робота на процес різання складається з роботи на утворення нових поверхонь dA_n на подолання сил поверхневого тертя dA_f і на об'ємні пружньо-в'язкопластичні деформації dA_v :

$$dA = dA_1 + dA_2 + dA_3, \quad (3.55)$$

В результаті узагальнень досліджень процесу різання плоскими ножами з двохстороннім лезом ряду матеріалів легкої промисловості, риби, харчових продуктів, проведених Мачихиним Ю.А. і Даурським А.Н.

[38], зусилля різання визначається властивостями матеріалу, що розрізається, параметрами різального інструменту, умовами і режимами різання. Зусилля різання P у загальному випадку залежить від його складових:

$$P = P_1 + 2(P_2 + P_3 + P_4) \quad (3.56)$$

де P_1 - сила, необхідна для руйнування матеріалу, Н;

P_2 - сила лобового опору, Н;

P_3 - сила тертя на гранях леза, Н;

P_4 - сила тертя на бічних поверхнях ножа, Н.

Горячкін В. П. [94] ввів поняття коефіцієнта корисної дії ножа :

$$\eta = \frac{A_1}{A_0} \quad (3.57)$$

де A_1 - корисна робота, витрачена безпосередньо на різання, Дж;
 A_0 - загальна робота, витрачена на процес подрібнення, Дж.

Збільшення величини коефіцієнта корисної дії ножа свідчить про зниження витрат енергії на явища, супутні процесу утворення нових поверхонь подрібнюваного продукту.

Зараз не існує загальної теорії подрібнення харчових продуктів [97].

У більшості випадків дослідники [96, 97, 98, 99] припускають, що м'ясопродукт можна вважати за умовне суцільне середовище. В той же час ряд харчових середовищ з порівняно однорідною структурою (наприклад, цукеркові маси) можна вважати як жорсткопластичні тіла. Якщо зовнішній тиск на такі тіла перевершує їх граничні напруження зміщення, то такі тіла пластично течуть, що і використовується для їх розрізання. Враховуючи, що основна маса харчових продуктів має нестискувану структуру, Мачихин Ю.А. запропонував ряд рівнянь для визначення сил опору перерізанню харчових мас з однорідною структурою [58]. Дослідження процесу різання таких мас ножами із заточуванням і без нього показали, що характер руйнування цих мас однаковий. А зусилля опору впровадженню ножів визначаються, в основному, швидкістю впровадження ножів в матеріал і граничним напруженням зміщення зрізаного матеріалу. Неоднорідна, волокниста структура м'ясопродуктів не дозволяє застосувати цю теорію для визначення сил опору м'ясопродуктів різанню. Фізична картина процесу різання харчових продуктів з міцним структурним каркасом значною мірою відрізняється від характеру руйнування жорсткопластичних тіл.

Енергію на подрібнення харчових продуктів переважно визначають експериментальним шляхом. При цьому основними енергетичними характеристиками процесу подрібнення м'ясопродуктів були питомі витрати енергії на отримання 1 м² поверхні розділення, або на подрібнення одного кілограма продукту [100]. Варто звернути увагу, що

загальні енергетичні характеристики не враховують особливості процесу різання і стану різальних органів, але, в той же час, вони можуть використовуватися для відносно наближених підрахунків енергії на подрібнення. Ці характеристики іноді використовуються в промисловості при виборі електродвигунів за потужністю у приводах вовчків.

Останнім часом в роботах [101, 102, 104, 105] для визначення енергетичних витрат на процес різання сировини рослинного і тваринного походження використовується співвідношення:

$$N = P_1 \cdot \mathcal{G}_1 + P_2 \cdot \mathcal{G}_2 \quad (3.58)$$

де P_1, P_2 – експериментально визначені величини горизонтальної і вертикальної складових сил різання, Н;

$\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$ - горизонтальна і вертикальна складові швидкості різання, м/с.

Співвідношення (3.57) дозволяє точніше визначити енергетичні витрати, вплив геометричних і кінематичних параметрів різального органу на процес різання, хоча визначення складових зусилля різання при динамічних навантаженнях на цьому етапі розвитку вимірювальної техніки викликає труднощі.

Аналізуючи роботи, що проводяться в цьому напрямку [101, 102, 104, 105], можна зробити висновок, що визначення аналітичним шляхом повної роботи і зусиль на процес різання харчових продуктів неможливе через вплив на них великої кількості чинників. До них відносяться: вид і агрегатний стан подрібнювального продукту, геометричні параметри різального органу, режими і вид різання та ін.

Складання конкретної математичної моделі процесу різання можливе лише тільки для певних матеріалів при заданих параметрах різання і за умови усебічного експериментального визначення впливу основних чинників процесу на подрібнення продуктів.

Детальне вивчення впливу режимів різання та інших чинників на процес подрібнення м'яса дозволить оптимізувати конструкційні форми робочих органів машин і режими різання за найбільш вагомими показниками процесу.

3.5. Особливості енергетики вільного різання м'ясної сировини

Значний об'єм серед готових до споживання м'ясопродуктів займають ковбасні вироби. Під час приготування фаршу для ковбас м'ясо піддають інтенсивному ручному і машинному обробленню. Ряд конструкцій м'ясоподрібнюючих машин запозичений з інших галузей промисловості, де необхідне подрібнення, наприклад, мінеральної сировини [106-108].

Інтенсивна механічна дія робочих органів м'ясоподрібнюючих машин на сировину призводить до втрат нативних властивостей м'яса і навіть до його фізико-хімічної деструкції [108,109]. Фарш ковбас, отриманий за допомогою таких машин має рихлу консистенцію, спонукає жирowo-водяні підтікання в батонах при термічній обробці, а готовий продукт має незадовільні органолептичні показники. Тому при конструюванні м'ясоподрібнювальних машин потрібно враховувати біологічне походження м'яса і його складну фізико-хімічну будову. У зв'язку з цим робочі органи м'ясорізальних машин повинні мати геометричні параметри і забезпечувати такі режими подрібнення, які б не впливали на хімічний склад сировини і подрібнювали її високоякісно, з необхідним ступенем дисперсності та з мінімальними затратами енергії.

Значна частина енергії, яка витрачається на процес подрібнення, розсіюється в продукті і перетворюється у теплоту, яка провокує зміни нативних властивостей м'ясопродуктів. Білки м'ясного фаршу частково денатуруються, інколи коагулюються, що негативно впливає на якість готового продукту [108,110]. Тому розробка м'ясоподрібнюючих машин має проводитись на підґрунті детальних досліджень процесів різання м'яса з урахуванням діючих силових та енергетичних показників.

Аналіз досліджень процесів різання м'яса [106,108-111,119,120] показує, що більшість з них направлені на оптимізацію загальних енергетичних показників процесу для конкретних умов роботи м'ясоподрібнюючих інструментів. Разом з тим встановлено [106,108-110], що складний процес різання м'ясопродуктів можна розділити на ряд більш простих: руйнування структури сировини, деформування продукту в зоні різання, тертя інструментів між собою і по сировині та ін. Якраз детальне вивчення основних елементарних складових процесу різання сприятиме поглибленню знань в області подрібнення біологічної сировини і більш цілеспрямованій роботі над створенням та удосконаленням м'ясорізальних машин з метою впровадження енергозберігаючих технологій приготування високоякісних фаршів для ковбас.

Аналітична оцінка енергетичних показників вільного різання м'яса, зокрема в кутерах, і визначення напрямів подальшого удосконалення робочих органів подрібнюючих машин для зменшення енергоспоживання і забезпечення високої якості фаршу у переробці м'ясної сировини має важливе наукове і прикладне значення. Вона потребує узагальнення знань з областей фізики твердого тіла, фізико-хімічної механіки матеріалів, теорії різання матеріалів різної природи для оцінки впливу вагомих чинників на енергетичні показники різання м'ясної сировини.

В процесі різання м'ясопродуктів до різальних органів машини безперервно підводиться енергія від її приводу. Таким чином, у локальну

область взаємодії ножа і продукту підводиться зовнішня сила і таку систему «ніж-продукт» не можна вважати замкнутою. Крім того відбувається значна дисипація енергії в прилеглих до зони різання об'ємах продукту. Це значить, що до відокремленої системи «ніж-продукт» не може бути застосований закон збереження енергії [112]. Разом з тим різання лезом можна подати як процес утворення тріщини, бокові поверхні якої навантажені розподіленим напруженням, яке зумовлене силами, виникаючими при дії клина ножа на продукт. Для такої тріщини можна застосовувати умови класичної рівноваги та рівняння імпульсів [113,114]. Сили, що виникають при контакті клиноподрібною інструменту з продуктом, під час його руху виконують деяку роботу і передають енергію розрізаним частинкам м'яса.

Згідно з теоремою «живих» сил для суцільного середовища повний приток зовнішньої енергії можна подати як суму робіт для виконання елементарних процесів, супроводжуваних подрібнення (розривання структурних зв'язків, деформування, тертя та ін.).

Виходячи з аналізу рівнянь, приведених у монографії Л.С. Мороза [115], що описують подрібнення твердих тіл, а також на підґрунті інших досліджень [106,116] можна зробити висновок, що загальна робота, що витрачається на різання м'яса, є сумою таких складових:

$$\sum_{i=1}^5 dA = dA_1 + dA_2 + dA_3 + dA_4 + dA_5, \quad (3.59)$$

де dA_1 - елементарна робота на переборення сил зчеплення структурних зв'язків продукту;

dA_2 - елементарна робота на в'язкопластичну деформацію продукту, розташованого в зоні радіуса округлення різального леза інструмента перед розрізом;

dA_3 - елементарна робота на зміщення боковин розтину і деформування продукту поблизу цих боковин;

dA_4 - елементарна робота на переборення сил тертя інструмента по боковинах розтину;

dA_5 - елементарна робота на надання кінетичної енергії відрізанам кускам продукту.

Очевидно, що елементарна робота dA_5 виконується лише при різанні твердих м'ясопродуктів (наприклад заморожених), коли подрібненні куски викидаються з зони різання з деякою швидкістю.

Роботу на переборення сил зчеплення структурних зв'язків продукту можна визначити зі співвідношення:

$$A_1 = \sum_{i=1}^n dA_1 = \int_0^l \int_0^{\tau} \sigma_H(l) \cdot dl \cdot V_n \cdot d\tau, \quad (3.60)$$

де $\sigma_H(l)$ - питоме зусилля розривання структурних зв'язків, Н/м;

l – довжина різального леза, м;

V_n – швидкість впровадження різального леза в продукт, м/с;

τ – швидкість впровадження різального леза в продукт, м/с.

За міру величини питомого зусилля руйнування структурних зв'язків прийнята середня інтегральна величина зусилля розривання структурних зв'язків, яка може бути найбільш точно визначена емпіричним шляхом. Але в самій природі його визначення закладено надзвичайно багато чинників (ступінь затуплення різального інструменту, його форма, шорсткість поверхні тощо), які дозволяють провести розрахунки лише для конкретної ситуації і за наявності експериментальних даних.

Швидкість впровадження інструмента в продукт може бути постійною по всій довжині леза і тоді процес схожий на рубання, або змінною при деяких видах ковзного різання.

При ударних режимах взаємодії різального інструмента з продуктом сила в зоні контакту зростає стрибкоподібно (рис. 3.14).

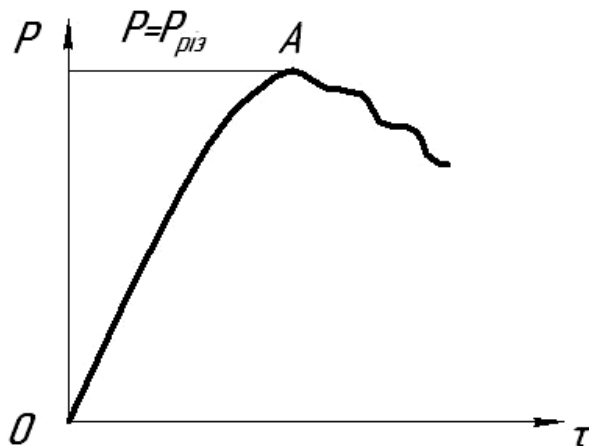


Рис. 3.14 – Зростання зусилля при ударній взаємодії інструмента з продуктом

Для наближеної оцінки зусилля в довільний момент перерізаня продукту дільницю наростання сили OA можна апроксимувати четвертою частиною синусоїди гармонічного закону коливальних процесів [117]:

$$P = P_0 \cdot \sin \omega t \quad (3.61)$$

де $P_0 = \sigma_H(l) \cdot l$, - величина сили різання, Н;

$\sigma_H(l)$ - питоме зусилля різання, Н/м;

l – довжина різального леза, що приймає участь у різанні, м;

ω – поточна величина кутової швидкості, рад/с.

Враховуючи, що девіатор тензора напружень при деформуванні в'яко-пружних тіл пропорційний девіатору тензора переміщень [107,118], будемо вважати, що переміщення таких тіл при деформуванні перед перерізанням також має гармонічний характер, а тому

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (3.62)$$

де x_0 – шлях, який проходить лезо при зануренні його в продукт перед перерізанням;

φ – відставання деформації від фази росту сили.

ω – поточна величина кутової швидкості різального леза, рад/с.

Робота, яку виконує гармонічна сила на малому переміщенні dx дорівнює $P \cdot dx$, або

$$P \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dt.$$

Очевидно, що робота на попередню деформацію продукту перед перерізанням при гармонічному законі зміни сили різання дорівнює:

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot \sin \omega t \cdot x_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot dt = \\ &= P_0 \cdot x_0 \cdot \int_0^{\pi/2} \sin \omega t \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot d(\omega t) = \\ &= \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot x_0 \cdot \sin \omega t \cdot (\cos \omega t \cdot \cos \varphi + \sin \omega t \cdot \sin \varphi) \cdot d(\omega t) \end{aligned} \quad (3.63)$$

Враховуючи, що $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$ та інтегруючи рівняння (3.63)

по частинах отримаємо:
$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot P_0 \cdot x_0 \cdot \sin \varphi. \quad (3.64)$$

Величина φ постійна для заданих режимів різання, але вона залежить від швидкості взаємодії різального леза з продуктом. За допомогою метода накатаних сіток [108] було встановлено, що для статистичних режимів різання $\varphi = 90^\circ$, а зі зменшенням швидкості

різання φ поступово зменшується і при переміщенні гострого леза з швидкістю більшою за 3...5 м/с величина φ наближається до нуля ($\varphi \approx 0$).

Робота по ущільненню продукту перед перерізанням є змінною величиною. Вона найбільша при статичних режимах різання, коли величина деформації сягає найбільшого значення, і зменшується при збільшенні швидкості різання [106,119,120]. Крім того, величина зовнішньої сили достатня для перерізання продукту залежить від ряду чинників, зокрема від радіуса заокруглення різального леза. Експериментально встановлено [106,108], що величина зусилля різання при впровадженні різального леза у продукт поступово збільшується до забезпечення руйнування структурних зв'язків. Робота цієї сили може бути знайдена із співвідношення:

$$A_2 = \sum_{i=1}^n dA_2 = \int_0^{\tau} \sigma_H(\rho, l) \cdot V_n \cdot d\tau \cdot dl, \quad (3.65)$$

де $\sigma_H(\rho, l)$ - питома величина лінійної сили пере різання, Н/м;

τ - термін занурення різального леза до пере різання структурних зв'язків продукту за даних режимів, с

l – довжина різального леза, м;

ρ – радіус заокруглення леза інструменту, м.

Робота на переміщення боковин продукту при перерізання в основному витрачається на деформування прилеглих до зони різання об'ємів. Величина цієї роботи визначається добутком сил, розподілених по робочих гранях клина різального леза, на величину прилеглих до цих граней поверхонь розтину:

$$dA_3 = P_{ij} \cdot V_i \cdot ds \cdot d\tau,$$

$$\text{або } A_3 = \iint_S \overline{P}_n \cdot \overline{V}_i \cdot d\tau \cdot ds = \iint_S P_{ij} \cdot \overline{n}_j \cdot \overline{V}_i \cdot ds \cdot d\tau, \quad (3.66)$$

де $\overline{V}_i \cdot d\tau$ - величина переміщення поверхні розтину;

ds - елементарна площа на робочій грані клина;

$\overline{P}_n = P_{ij} \cdot \overline{n}_j$ - величина напружень вдовж нормалі до бокової грані, викликаючих переміщення поверхні розтину.

Величина роботи на переміщення боковин розтину продукту у загальному випадку дорівнює роботі сил, затрачених на деформування об'єму продукту, що прилягає до зони розтину [112]:

$$A_3 = \iiint_V P_{ij} \cdot \xi_{ij} \cdot d\tau \cdot dV, \quad (3.67)$$

де ξ_{ij} - тензор швидкостей деформацій в об'ємі V ;

$\xi_{ij} \cdot d\tau$ - тензор деформацій в об'ємі V .

Враховуючи, що час релаксації напружень значно більший за час контакту інструмента з продуктом, умовно вважаємо, що сили стиснення м'ясопродукту лезом інструмента залишаються постійними при подальшому (після занурення леза у продукт) русі різального інструмента у в'язко-пластичному середовищі.

Очевидно, що розподілені сили P_{ij} викликають при зміщенні бокових поверхонь різального клина відносно продукту сили тертя, які також виконують деяку роботу:

$$A_4 = A_4' + A_4'', \quad (3.68)$$

де A_4' - робота сил тертя продукту по робочих гранях леза;

A_4'' - робота сил тертя продукту по бокових гранях тіла різального інструмента.

$$\text{Або } A_4 = 2 \left(\iint_{S_1} f \cdot P_{ij} \cdot n_j \cdot V_i \cdot d\tau \cdot dS_1 + \iint_{S_2} f \cdot P_{ij} \cdot n_j \cdot V_i \cdot d\tau \cdot dS_2 \right), \quad (3.69)$$

де S_1, S_2 - площі, відповідно, бокової грані леза і бокової поверхні тіла різального інструмента;

$f \cdot P_{ij} = \sigma_\tau$ - інтенсивність сил тертя ковзання.

Очевидно, що площі S_1 і S_2 залежать від геометричних параметрів інструмента, а довжина $V_i \cdot d\tau$ взаємного контакту різального інструменту і продукту визначається з урахування площі перетину продукту. Величина P_{ij} також може бути визначена експериментально. Сили тертя легко визначаються дослідним ляхом в умовах, що відповідають умовам тертя при різанні.

Робота на надання кінетичної енергії відрізанним шматкам продукту визначається з урахуванням їх маси і швидкості руху:

$$A_5 = \iiint_V dA_5 = \iiint_V m_i \cdot V_i \cdot dV \cdot dV = mV_0^2/2, \quad (3.70)$$

V_0 - швидкість центра маси відрізаного шматочка;

m - маса відрізаного шматочка продукту;

V_i - швидкість руху i -го шматочка;

V - об'єм шматочка.

Треба пам'ятати, що кінетична енергія окремим кусочкам продукту передається при подрібненні крихких тіл, наприклад, замороженого м'яса.

Таким чином при вільному різанні м'ясопродуктів різальний інструмент виконує роботу, пов'язану з попереднім деформуванням сировини, розриванням її структурних зразків, зміщенням поверхні розрізання від площини різання і всі ці елементарні процеси супроводжуються тертям продукту по поверхнях інструментів. Очевидно, що кожний процес впливає не лише на фізико-хімічні властивості продукту, але і на трансформацію геометричних параметрів інструментів та кінетику різання. Причому вплив кожного з цих чинників на всі складові виконуваної роботи далеко неоднозначний.

Тому для оптимізації роботи м'ясорізальних машин, інструменти яких здійснюють вільне різання м'яса, по кількості витраченої на різання енергії необхідно аналізувати вплив кінетичних і геометричних параметрів на кожну складову виконаної інструментом роботи та впровадити оптимізацію процесу за сумарними витратами роботи, або енергії. Не менш важливим показником є якість подрібнення.

3.6. Збереження натуральних властивостей м'яса при стисненому різанні

При переробці м'ясної сировини на підприємствах АПК потрібно забезпечити належну якість напівпродуктів і готової продукції. Тому конструктивні параметри робочих органів переробних машин повинні повністю відповідати фізико-механічним властивостям перероблюваної сировини. Це стосується також одних з основних машин в технологічних лініях переробних комплексів АПК з виробництва фаршів і напівфабрикатів для ковбас – вовчків.

У практиці експлуатації вовчків відмічено, що при зниженні пропускної спроможності різального механізму, або при надмірній подачі м'ясної сировини, металевий шнек починає руйнувати структуру м'яса, перетирати його, вичавлювати сік. При цьому підвищується температура фаршу, що зрештою позначається і на якісних показниках готового продукту.

У зв'язку з цим, необхідно вдосконалити процес продавлювання м'ясної сировини через різальний механізм вовчка і розробити подаючий шнек з еластичним робочим органом, здатним м'яко впливати на харчові продукти, що подрібнюються.

Одним з перших, хто досліджував режими роботи вовчків був А.І. Пелеєв [121]. За цими дослідженнями були визначені залежності

продуктивності, питомих витрат енергії від кількості різальних площин, діаметрів отворів вихідних ґраток та швидкостей обертання ножів.

Автором роботи [122] були отримані залежності тиску витікання м'ясопродуктів для ґраток вовчків з різними діаметрами вихідних отворів.

Для визначення тиску, виникаючого в робочій камері вовчка перед різальним комплектом, автором роботи [123] була проведена серія експериментів, які дозволили визначити, що найбільший боковий тиск у камері стискання вовчка МИМ-105 складає $6 \cdot 10^5$ Па, а осьовий тиск досягає $8 \cdot 10^5$ Па.

Разом з тим, автори робіт [124,125] та ін. відмічають недостатність проведених досліджень і необхідність керування процесом протискування м'яса через ґратки вовчка для забезпечення належного структуроутворення фаршу. Це можна зробити за рахунок застосування шнека, здатного перепускати сировину у зворотньому напрямку при підвищенні тиску у різальному вузлі. Для отримання еластичного покриття на зовнішньому діаметрі шнека варто застосовувати електрофоретичні покриття на основі фторопласту – 4Д, модифікованого графітом для підвищення гнучкості [126,127].

Так можна вважати, що механічна система (рис. 3.15), що складається з шнека, разом з ножом, і продуктом, що знаходиться між поверхнею шнека і внутрішньою поверхнею корпусу, має одну ступінь свободи. Це означає, що кінематичні характеристики шнека, ножа і подрібнюваного продукту, що рухається, повністю визначаються обертальним рухом шнека. Крім того, вважаємо, що процес руху продукту є таким, що встановився, і баланс силових дій на шнек з боку двигуна і продукту призводить до одного рівняння рівноваги, яке записується за допомогою принципу можливих переміщень для системи з одним ступенем свободи:

$$(M_e - M_c) \cdot \delta\varphi - (1 - K) \cdot P_{\text{доп}} \cdot S_2 \cdot \delta S = 0 \quad (3.71)$$

де в рівняннях (3.71 і 3.72) M_e – крутний момент, що передається шнеку з боку двигуна, Нм; M_c – момент сил опору обертанню, обумовлений наявністю тертя продукту по поверхні шнека при його обертальному русі і опором різання, що виникає в парі ґратка-ніж; $P_{\text{доп}}$ – допустимий тиск на продукт перед ґраткою, Па; S_2 – площа перерізу шнека перпендикулярного осі z (вісі шнека), м^2 ; ω – кутова швидкість обертання шнека, с^{-1} ; Q_m – масова витрата продукту, кг/год ; ρ – щільність продукту, кг/м^3 ; h – крок гвинтової лінії на радіусі шнека R_2 , м; d – діаметр отворів ґратки, м; R_2 – радіус шнека, м; α – кут нахилу гвинтової лінії шнека, град; $f(\omega)$ – функція, що зв'язує момент опору зі швидкістю; n – кількість отворів у ґратці; δS – можливе переміщення продукту вздовж корпусу при повній відсутності обертання продукту навколо вісі z , тобто

тільки при його поступальному переміщенні; $\delta\varphi$ - можливе кутове переміщення шнека навколо вісі z ; K - коефіцієнт, що враховує ступінь захоплення продукту в обертальний рух. ($K=0$ - немає обертального руху продукту, а при $K=1$ - повне захоплення продукту в обертальний рух).

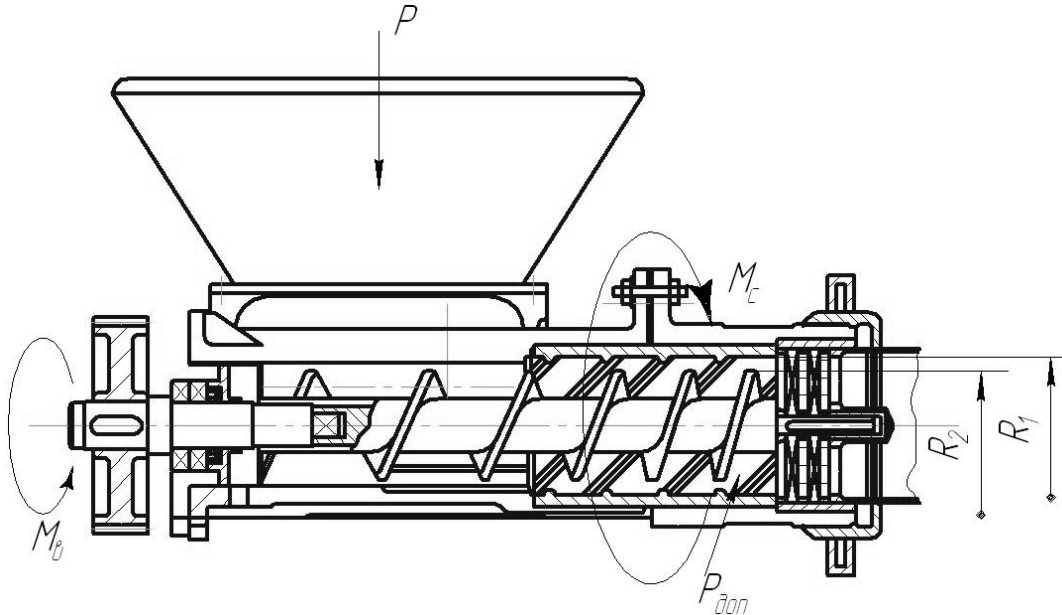


Рис. 3.15 – Механічна система вовчка: P – тиск на вході у вовчок; $P_{доп}$ – допустимий тиск перед ґраткою

Після ряду перетворень знайдемо крутний момент на валу шнека:

$$M_{\text{в}} = \frac{8Q_m}{hd^2n\rho} (f(\omega) + \frac{P_{\text{доп}} R_2^2 h}{2\omega} \cos \alpha), \quad (3.72)$$

У рівнянні (3.72) величина $P_{\text{доп}}$ для різних видів продукту має бути визначена, виходячи з додаткових міркувань, наприклад, шляхом проведення серії експериментальних досліджень для визначення граничних тисків, що не порушують структури продукту.

Рівняння (3.72) зв'язує масову витрату Q_m і крутний момент двигуна $M_{\text{в}}$ прямою пропорційною залежністю, тобто при $Q_m=0$ і $M_{\text{в}}=0$.

Проте, це не зовсім так і рівняння (3.72) треба розуміти в тому сенсі, що при $Q_m=0$ рух продукту в просторі між шнеком і корпусом або перебудовується (з'являється зворотній рух), або продукт залучається тільки до обертального руху. Момент сил опору, що виникає при цьому, значно менший від моменту сил опору за наявності поступального руху продукту. В цьому випадку і крутний момент двигуна буде значно менший, ніж за наявності поступального руху продукту.

В процесі подрібнення м'яса у вовчках найбільший тиск виникає у кінці шнека на внутрішній поверхні ґраток, тому що тут відбувається продавлювання м'яса через різальний механізм. Знаючи величину тиску

витікання м'яса через ґратку, при якому починає відбуватися руйнування структури м'яса, і використовуючи експериментальну залежність між максимальним тиском та величиною зазору між зовнішнім діаметром шнека і корпусом δ , можна так підібрати геометричні і фізичні характеристики шнека, що при гранично допустимому тиску $P_{\text{доп}}$ витки шнека почнуть відгинатися в напрямку, протилежному напрямку переміщення м'яса, утворюючи при цьому зазор, через який частина продукту перетече за виток шнека, а поступове продавлювання м'яса, що залишилося перед ґратками, продовжиться.

Нижче наведені результати експериментальних досліджень з визначення величини тиску, при якому відбувається протискування свинини і яловичини через ґратки вовчка без руйнування структури м'яса, - $P_{\text{доп}}$. Експерименти проводилися на випробувальному стенді на базі гідравлічного преса з манометром. М'ясо протискувалось поршнем через ґратки з різними діаметрами отворів, які були встановлені у гільзі (рис. 3.16).

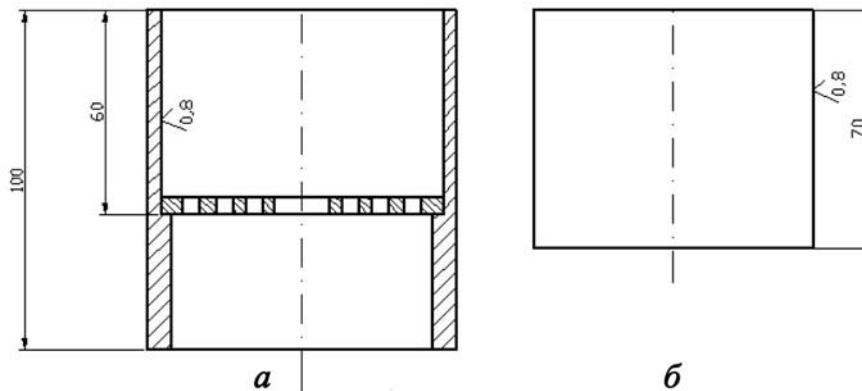


Рис. 3.16 – Деталі випробувального стенду для протискування фаршу через ґратки вовчка: а – гільза з установленою ґраткою; б – поршень.

В результаті обробки експериментальних даних по протискуванню м'яса яловичини і свинини через ґратки з різним діаметром отворів (рис. 3.17) були отримані аналітичні залежності для розрахунку тиску витікання :

для яловичини:

$$P = 13,73 \cdot 10^4 \cdot d_0^{-0,87} \cdot V_n^{0,17} \cdot \varphi_0, \quad (3.73)$$

для свинини:

$$P = 13,3 \cdot 10^4 \cdot d_0^{-0,79} \cdot V_n^{0,25} \cdot \varphi_0, \quad (3.74)$$

де d_0 - діаметр отворів ґратки, м;

V_n - швидкість протискування, м/с;

φ_0 - коефіцієнт ефективності ґраток.

Дослідним шляхом було встановлено, що структура м'яса починає руйнуватися, якщо протискування через ґратки яловичини відбувається

при тиску більшому за 3,7 МПа. При такому тиску ще зберігається цілісність структури м'яса і практично відсутнє руйнування його частинок (рис. 3.18,а,б). Відповідно, при проектуванні еластичного шнека необхідно враховувати, що максимально допустимий тиск на яловичину перед ґратками, який не викликає руйнування його структури, $P_{\text{доп}} = 3,7 \cdot 10^6$ Па.

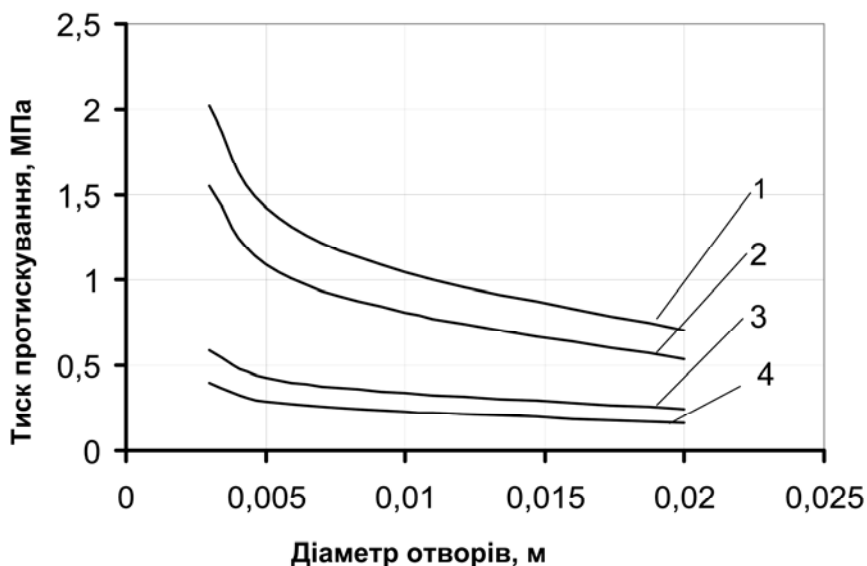


Рис. 3.17 – Залежність тиску протискування від діаметра отворів ґраток для свинини і яловичини: 1 – яловичина ($v = 0,00083$ м/с); 2 – яловичина ($v = 0,00018$ м/с); 3 – свинина ($v = 0,00083$ м/с); 4 – свинина ($v = 0,00018$ м/с)

Дослідним шляхом було встановлено, що структура свинини починає руйнуватися, якщо до неї прикласти тиск більший за 2,5 МПа. При такому тиску ще зберігається цілісність структури м'яса і, практично, немає руйнування сполучної тканини (рис. 3.18, в,г). Відповідно, при проектуванні гнучкого шнека необхідно враховувати, що максимально допустимий тиск на свинину перед ґратками, який не викликає руйнування її структури, $P_{\text{доп}} = 2,5 \cdot 10^6$ Па.

Був виконаний розрахунок вигину витків шнека з еластичною зовнішньою гвинтовою поверхнею методом кінцевих елементів. За допомогою засобів моделювання геометрії в програмі *Nastran* була створена геометрична модель шнека, а методом кінцевих елементів розраховані зміщення його еластичних кінцівок, утворених модифікованими фторопластовими електрофоретичними покриттями (рис.3.19).

На основі математичного моделювання процесу переміщення м'яса еластичним робочим органом і застосування методу кінцевих елементів при розрахунку вигину витків гнучкого шнека, були запропоновані основні геометричні і фізичні параметри для конструювання шнеків цього типу,

які можуть бути використані у вівчках із стандартизованим рядом вживаних вихідних ґраток.

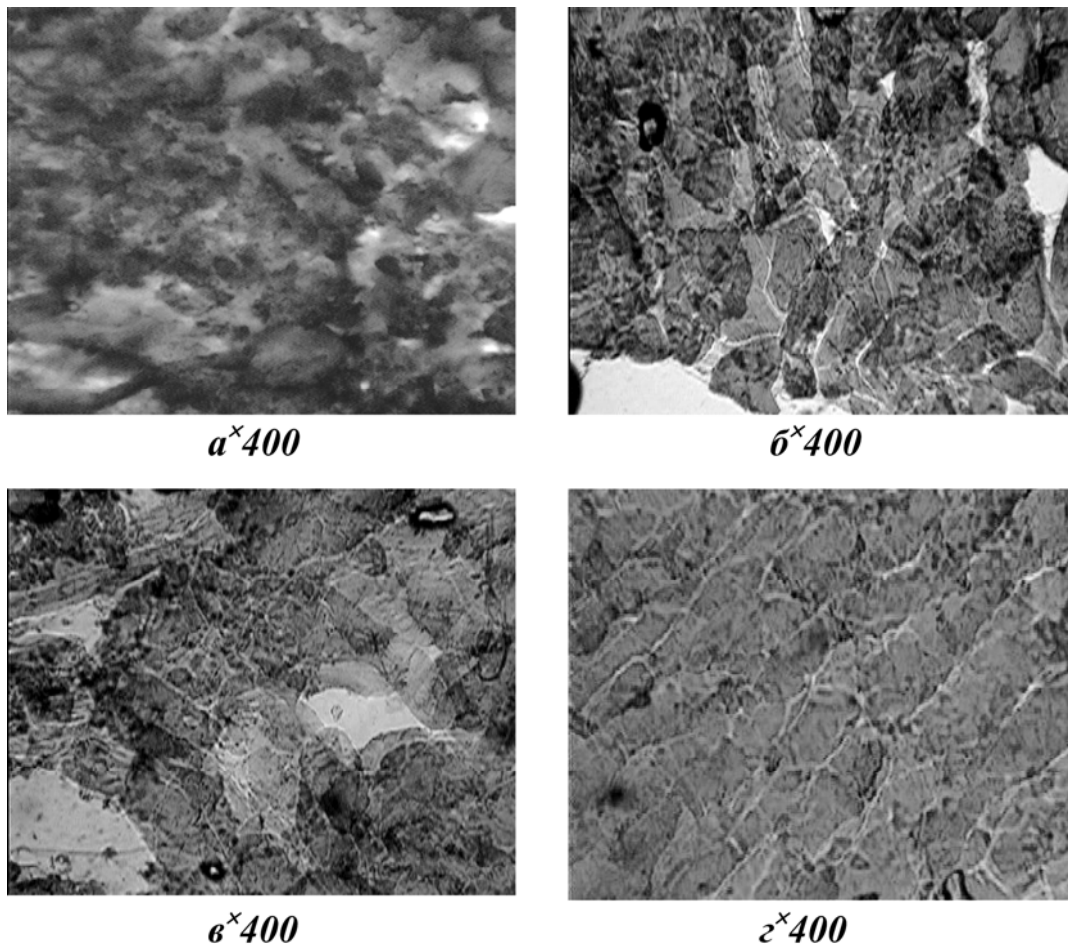


Рис. 3.18 – Зміна структури яловичини (а,б) і свинини (в,з) від тиску: а,в – 5 мПа; б – 3,7 МПа; з – 2,5 МПа

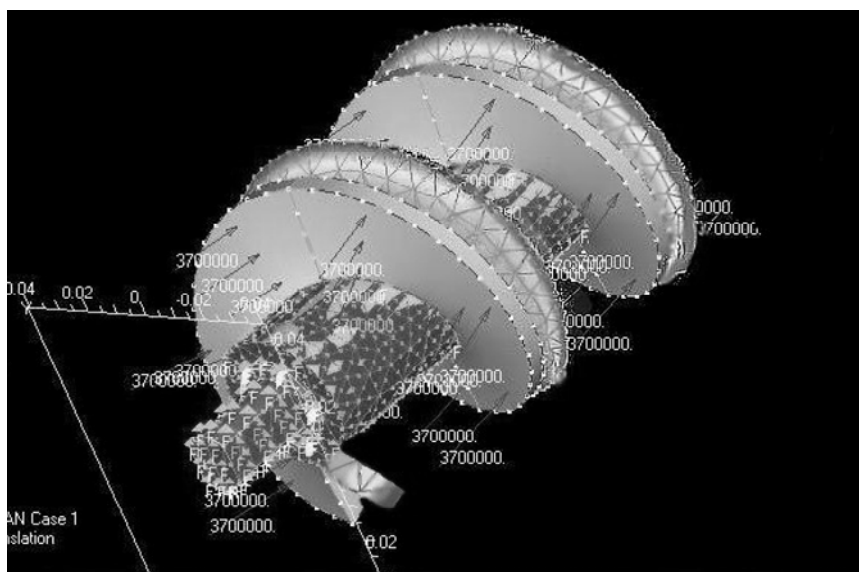


Рис. 3.19 – Відображення результатів розрахунку

Спираючись на результати моделювання і розрахунків та з використанням розробленої методики розрахунку еластичного подаючого шнека був виготовлений експериментальний зразок шнека з електрофоретичним покриттям для вовчка MIM-300.

Покриття осаджували у водяному поліелектроліті, до складу якого входили: емаль – плівкоутворювач ВФЛ-149 «Е», наповнювач – суспензія фторопласту Ф-4ДВ і модифікатор – суспензія графіту [127].

В процесі випробування експериментального зразка на м'ясопереробному підприємстві «Аверс» у м. Києві було вироблено дослідну партію сосисок «Молочних». В якості контролю був вироблений той же сорт сосисок на традиційному обладнанні. Аналіз змін органолептичних показників, а також гістологічний аналіз виробленої продукції показали, що досліджувані зразки, вироблені на вовчку з еластичним шнеком, мають кращі показники якості і відповідають встановленим вимогам до цих м'ясопродуктів. Фарш, отриманий після вироблення на вовчку з еластичним шнеком, мав одноріднішу і щільнішу консистенцію. В ньому були відсутні об'єми з локальним руйнуванням структури м'яса, у порівнянні із структурою фаршу, отриманого на вовчку із звичайним шнеком.

Таким чином, доведена перевага процесу протискування м'ясної сировини через ґратки вовчка з використанням еластичного шнека, тому що він дозволяє отримувати якісну м'ясну сировину без порушеної структури. Розроблена математична модель і методика інженерного розрахунку шнека вовчка з еластичним електрофоретичним покриттям. Досліджений вплив силових чинників на мікроструктуру фаршу та визначені гранично допустимі рівні тиску для переробки сировини різного походження у вовчках, що є підґрунтям для проектування еластичних шнеків.

3.7. Оптимізація процесу отримання фаршу

Загальна енергія, що споживається при подрібненні м'яса у вовчках і кутерах, витрачається на утворення нових поверхонь поділу частинок і на тертя та об'ємні деформації [128]. Тільки перша частина енергії, що витрачається на диспергування продукту є корисною, а її інша частина незворотно втрачається. Співвідношення цих частин енергії залежить від фізико-механічних і, в першу чергу, від структурно-механічних властивостей подрібнюваної м'ясної сировини. Корисна складова енергії при подрібненні м'яса складає, в середньому, всього 20% від загальної затраченої [129]. Тому дослідження процесу подрібнення м'ясної сировини різного виду, ґатунку та хімічного складу дасть можливість розрахувати оптимальні режими роботи обладнання для подрібнення,

контролювати якість фаршу в процесі приготування та автоматизувати процес.

Проблема отримання якісного фаршу присвячені роботи [129-133]. Разом з тим, в цих роботах не повністю досліджений вплив хімічного складу м'ясної сировини на структурно-механічні властивості фаршу, зокрема, для сирокочених ковбас. Відсутні також рекомендації щодо термінів обробки сировини на подрібнювальних машинах різної продуктивності.

Аналізуючи рецептури сирокочених ковбас (Брауншвейзька, Московська, Невська та ін.), які виробляються вітчизняними м'ясопереробними підприємствами, прийшли до висновку, що в них, в основному, використовуються яловичина вищого і першого ґатунку, а також нежирна свинина, які були вибрані за об'єкти досліджень.

Хімічний склад сировини визначали стандартними методами. В кожному зразку визначали кількість вологи W , білку B , жиру φ , золи Z_l і вологовміст U м'ясної сировини (вміст вологи на 1 кг абсолютно сухої речовини). Середні значення цих параметрів подані у табл. 1.

З реологічних характеристик вибрана найбільш чутлива до змін хімічного складу м'ясної сировини – граничне напруження зсуву, яке визначалось з використанням статичного (ПМДП) і динамічного (ППМ-4М) пенетрометрів. Таким чином, статичне граничне напруження зсуву (θ_0) визначали на пенетрометрі ПМДМ, а динамічне ($\theta_{од}$) – на ППМ-4М.

Для пенетрометра ПМДП використовували конічний індикатор з кутом при вершині 60° і константою 2,1 Н/кг, а для ППМ-4М - 30° з константою 5,9 Н/кг.

Статистичний банк усереднених хімічних і реологічних характеристик подрібненої сировини (табл. 3.1) по мірі збільшення вмісту вологи у зразку.

Очевидно (табл. 3.1), що коливання вмісту вологи у яловичині вищого ґатунку складають всього 1,0%, жиру – від 0,8 до 2%; білку - усього 0,5%; золи – від 3,4 до 3,8. Помічено, що зі зменшенням вмісту жиру та зі збільшенням вологості сировини вміст золи в ній збільшується.

У яловичині I ґатунку вологість коливається у більш значних межах (від 72,8 до 75%), жирність змінюється від 2,5 до 4,6%, білок – від 18,2 до 18,8%, а вміст золи – від 3,9 до 4,3%.

У свинини нежирної вологість коливається від 69,8 до 74%, жирність – від 4,0 до 9,3%, білок – від 17,3 до 18,6%, а зола – від 3,6 до 3,9 %.

Колівання вмісту золи у яловичині вищого ґатунку і у свинині нежирній лежать в одних межах (від 3,4 до 3,9%). В середньому її вміст складає 3,7%. У яловичині I ґатунку вміст золи дещо вищий, ніж у яловичині вищого ґатунку та свинині нежирній за рахунок більшої кількості з'єднувальної тканини і, в середньому, складає 4,1%. Загалом

для розглянутої м'ясної сировини вміст золи можна прийняти в межах 3,8÷3,9%.

Таблиця 3.1 – Характеристика дозрілої м'ясної сировини, подрібненої у вовчку з діаметрами отворів у ґратці 3 мм

	Вид сировини	Характеристика фаршу													
		W, %	U, кг/кг	φ, %	Б, %	Зл, %	K _x	h·10 ⁻³ , м	θ ^е ₀ , Па	θ ^р _{од} , Па	Δ, %	h·10 ⁻³ , м	θ ^е ₀ , Па	θ ^р _{од} , Па	Δ, %
1	Яловичина в/г	75,2	3,03	2,0	19,4	3,4	3,0	217	1699	1711	0,7	375	2098	2050	2,3
2		75,4	3,07	1,8	19,3	3,5	3,5	217	1699	1683	1,0	384	2000	2014	0,7
3		75,6	3,10	1,4	19,5	3,5	4,5	221	1638	1644	0,4	389	1949	1967	0,9
4		75,8	3,13	1,5	19,1	3,6	4,07	219	1668	1658	0,6	384	2000	1984	0,8
5		76,0	3,17	1,3	19,0	3,7	4,6	221	1638	1641	0,2	389	1949	1963	0,7
6		76,0	3,17	1,0	19,2	3,8	6,1	222	1623	1609	0,9	394	1900	1923	1,2
7		76,2	3,2	0,8	19,2	3,8	7,5	224	1594	1590	0,3	399	1853	1900	2,5
1	Яловичина 1г	72,8	2,68	4,6	18,4	4,2	1,49	205	1904	1915	0,6	358	2302	2303	0,0
2		73,2	2,73	4,0	18,7	4,1	1,71	208	1849	1863	0,8	366	2200	2238	1,7
3		73,8	2,82	3,6	18,5	4,1	1,60	205	1904	1888	0,9	362	2250	2269	0,8
4		74,2	2,88	3,0	18,8	4,0	2,18	211	1797	1791	0,4	370	2150	2144	0,3
5		74,8	2,97	2,6	18,7	3,9	2,42	214	1747	1760	0,8	375	2098	2110	0,6
6		75,0	3,00	2,5	18,2	4,3	2,43	214	1747	1758	0,6	375	2098	2108	0,5
1	Свинина н/ж	69,8	2,31	9,3	17,3	3,6	0,81	191	2193	2256	2,9	330	2709	2726	0,6
2		71,5	2,51	6,1	18,6	3,8	1,21	200	2000	2009	0,5	350	2408	2420	0,5
3		70,5	2,39	8,5	17,3	3,7	0,85	191	2193	2220	1,3	330	2709	2682	1,0
4		72,5	2,64	5,9	17,9	3,7	1,15	200	2000	2035	1,8	347	2450	2452	0,1
5		73,2	2,73	5,6	17,4	3,8	1,14	198	2040	2040	0,0	347	2450	2458	0,3
6		74,0	2,85	4,0	18,1	3,9	1,59	205	1904	1890	0,8	358	2302	2272	1,3

Прийнявши у яловичині вищого ґатунку за середнє значення вміст жиру рівний 1,4% (0,8÷2,0), білку 19,24% (19,0÷19,5) і золи 3,6% (3,4÷3,8), розглянемо зміну статичного θ_0 і динамічного $\theta_{од}$ граничного напруження зсуву фаршу, подрібненого на вовчку з діаметром отворів у ґратці 3 мм, в залежності від вологості. Ці ж параметри розглянемо для яловичини 1 ґатунку і свинини нежирної (рис. 3.20,а).

Очевидний взаємозв'язок між граничним напруженням зсуву (ГНЗ) і вологістю сировини, який не залежить від її виду і ґатунку та може бути апроксимований прямою:

$$\theta_0^e \text{ чи } \theta_{од}^e = A(1 - a \cdot w), \quad (3.75)$$

де A і a - емпіричні коефіцієнти, w - вологість сировини в долях одиниць.

Величина ГНЗ дорівнює нулю при

$$a \cdot W_{кр} = 1, \quad (3.76)$$

де a - коефіцієнт, який побічно характеризує темп зменшення величини ГНЗ від збільшення вологості, причому $a \cdot A$ - істинне значенням темпу зміни, що дорівнює тангенсу кута нахилу прямої (1)

Для статичного ГНЗ: $A = 9500$; $a = 1,08$

Для динамічного ГНЗ: $A = 11800$; $a = 1,1$, тоді:

$$\theta_o^e = 9150(1 - 1,08 \cdot W); W_{кр} = 0,926 \quad (3.77)$$

$$\theta_{oo}^e = 11800(1 - 1,1 \cdot W); W_{кр} = 0,926 \quad (3.78)$$

Структурно-механічні характеристики сировини залежать від хімічного складу, зокрема від вмісту білку, жиру, води. Для того щоб комплексно урахувати увесь хімічний склад м'ясної сировини скористаємось критерієм хімічного складу, запропонованим Сюткіним С.В. [134]:

$$K_x = B/\varphi \cdot U, \quad (3.79)$$

де B і φ - вміст відповідно білку і жиру в 1 кг сировини, дол.од.

U - вологовміст сировини (кількість води, що приходить на 1 кг абсолютно сухої речовини, яка включає в себе і золу), дол.од.

Графічна залежність зміни статичного і динамічного ГНЗ сировини від критерію хімічного складу K_x подана на рис.3.20,б.

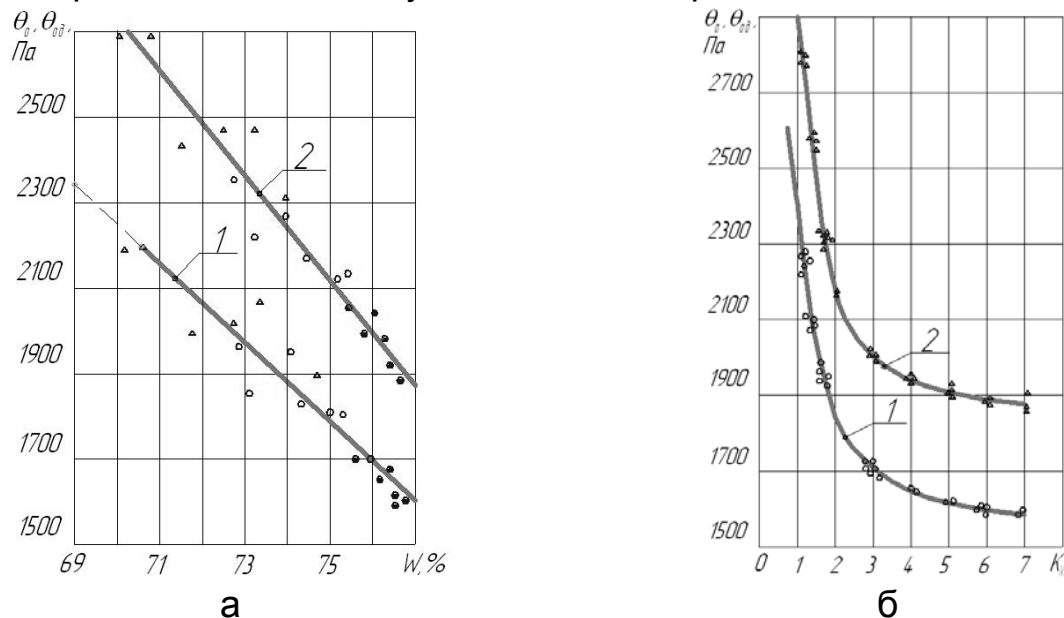


Рис. 3.20 – Залежності статичного θ_0 (1) і динамічного θ_{oo} (2) граничного напруження зсуву фаршу, подрібненого у вовчку з діаметром отворів у ґратці $d_{отв}=3$ мм, від його вологості W (а) і критерію хімічного складу K_x (б): • - яловичина в/г; о - яловичина 1 г; Δ - нежирна свинина

Математична обробка цієї залежності дозволила отримати наступне рівняння:

$$\theta_0^e \text{ чи } \theta_0^e = A(a + K_X^{-1}), \quad (3.80)$$

де A і a - емпіричні коефіцієнти.

Для статичного ГНЗ: $A = 604$; $a = 2,5$

Для динамічного ГНЗ: $A = 750$; $a = 2,4$

$$\text{Тоді} \quad \theta_o^e = 604(2,5 - K_X^{-1}), \text{ Па} \quad (3.81)$$

$$\theta_{o\partial}^e = 750(2,4 - K_X^{-1}), \text{ Па} \quad (3.82)$$

Похибка у розрахунках за цими залежностями не перевищує $\pm 2,5\%$.

Глибина технологічної обробки м'ясної сировини характеризується ступенем її подрібнення, а значить і формою зв'язку вологи, що впливає на структурно-механічні властивості фаршу. Готова сирокочена ковбаса повинна мати максимальну стандартизовану вологість при заданій консистенції (жорсткості), яка оцінюється органолептично або інструментально за реологічними характеристиками.

Термін подрібнення фаршу, безумовно, буде залежати від виду і сорту м'ясної сировини при використанні конкретної машини для тонкого подрібнення.

Кінетика зміни статичного (рис.3.21,а) і динамічного (рис.3.21,б) ГНЗ дисперсійного середовища фаршу для різних видів ковбас («Фантазія», «Московська», «Любительська», «Советская», «Свинна») від терміну подрібнення на кутері з об'ємом чаші 8 л., частотою обертання ножів $n_n = 1200 \text{ хв}^{-1}$ і чаші $n_{\text{ч}} = 8 \text{ хв}^{-1}$ дозволяє заключити, що характер зміни статичного θ_0 і динамічного $\theta_{o\partial}$ ГНЗ для різних за рецептурою сирокочених ковбас аналогічний.

Екстремальна точка на графіках характеризує кінець утворення первинної структури з мінімальною вологозв'язуючою здатністю і відповідає оптимальним значенням θ_o^{onm} і $\theta_{o\partial}^{onm}$, визначаючим термін подрібнення фаршу з сировини відповідного виду, ґатунку і хімічного складу.

Для аналітичного узагальнення функції $\theta_0 = f(\tau_k)$ можна запропонувати наступний вид рівняння:

$$\theta_o = A(1 - \tau_k / \tau_k^{onm})^2 + \theta_o^{onm} \quad (3.83)$$

$$\theta_{o\partial} = A_1(1 - \tau_k / \tau_k^{onm})^2 + \theta_{o\partial}^{onm} \quad (3.84)$$

де θ_o, θ_{od} - значення, відповідно, статичного і динамічного ГНЗ дисперсійного середовища сирокочених ковбас при терміні кутерування τ_{ki} , с;

A - емпіричний коефіцієнт, що залежить від рецептури ковбаси, Па;

τ_k - заданий термін подрібнення, с

τ_k^{opt} - оптимальний термін подрібнення, що відповідає оптимальному мінімальному значенню ГНЗ (θ_{od}^{opt} , Па).

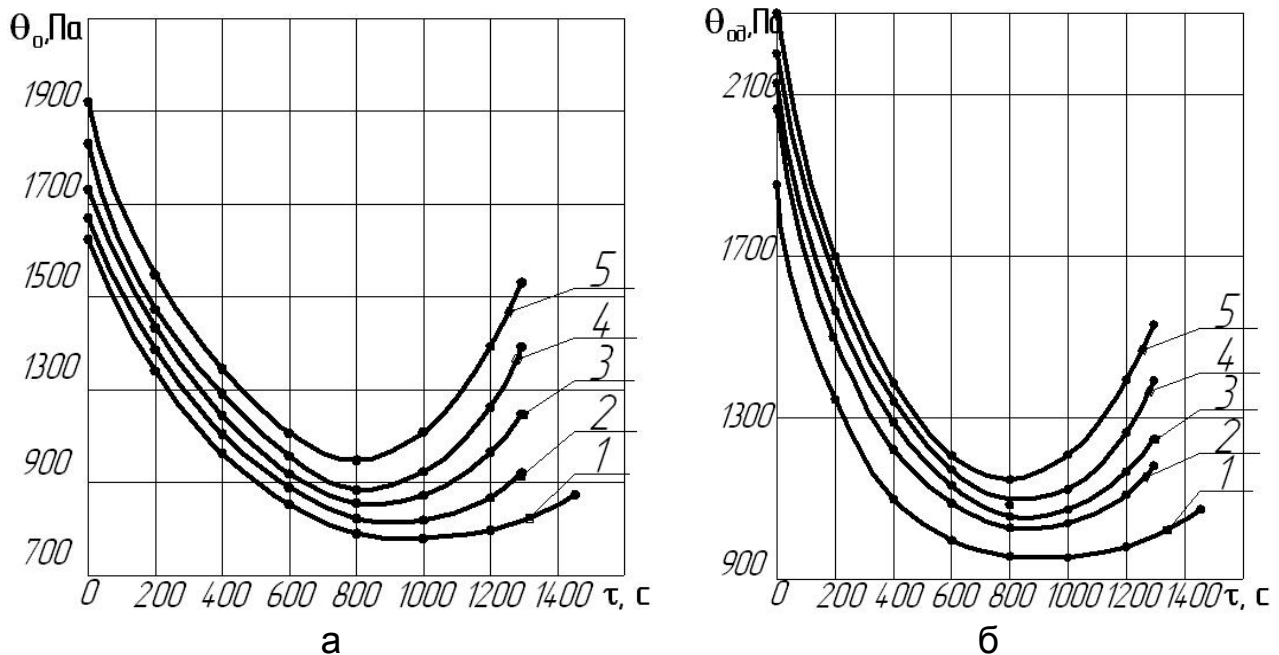


Рис. 3.21 – Кінетика зміни статистичного θ_o (а) і динамічного θ_{od} (б) граничного напруження зсуву від тривалості подрібнення τ на кутері дисперсійного середовища для фаршу сирокочених ковбас: 1 – Фантазія; 2 – Московська; 3 – Любительська; 4 – Советская; 5 – Свиняча

Значення коефіцієнтів A і A_1 і оптимальні значення θ_o і θ_{od} приведені в табл. 3.2.

Аналогічні дослідження були проведені за різних режимів обробки сировини на кутерах з місткістю чаші 250 і 500 л безпосередньо на виробництві, які показали, що реологічні характеристики ковбас потрібно оцінювати за критерієм хімічного складу, а оптимальну тривалість подрібнення визначати за оптимальними значеннями θ_o і θ_{od} , постійно контролюючи в процесі виробництва ГНЗ.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів, оптимальні величини складових рівнянь (3.83) і (3.84) та критерії хімічного складу сирокочених ковбас

Вид ковбаси	A (A_p)	A_1 (A_{1p})	θ_o^{onm} (θ_{op}^{onm})	τ_κ^{onm} (τ_{kp}^{onm})	θ_{og}^{onm} (θ_{ogp}^{onm})	τ_κ^{onm} (τ_{kgp}^{onm})	K_x
Фантазія	840 (840)	1000 (1017)	780 (783)	1080 (1100)	950 (953)	1080 (1100)	4,79
Московська	880 (878)	1080 (1067)	822 (815)	900 (943)	990 (994)	900 (933)	3,16
Любительська	910 (915)	1120 (1116)	840 (847)	900 (868)	1030 (1034)	900 (862)	2,37
Советская	950 (959)	1180 (1166)	870 (879)	840 (821)	1080 (1075)	840 (821)	1,89
Свиняча	1015 (1013)	1230 (1247)	930 (931)	750 (776)	1130 (1142)	800 (784)	1,42

Отримані емпіричні рівняння дозволяють розрахувати статичні і динамічні граничні напруження зсуву дисперсійного середовища фаршу для сирокочених ковбас і, таким чином, спрогнозувати його консистенцію і якість за структурно-механічними характеристиками та оптимізувати процес подрібнення сировини.

3.8. Інтенсифікація подрібнювальних процесів м'ясопереробки

Основні напрями інтенсифікації процесу різання м'ясопродуктів останнім часом спрямовані на оптимізацію режимів різання і форми різальних органів. У роботах Пелеева А.И., Горбатова А.В., Ивашова В.И., Мачихина Ю.А., Чижикової Т.В., Юркова С.Т. та ін. [134, 135, 136, 137, 138, 139] описана кінетика різальних органів при взаємодії їх з продуктом, що розрізається, і вплив режимів різання на ефективність процесу різання. Встановлено, що зусилля різання мясожирової сировини залежить як від її фізичного стану, так і від геометричних характеристик різального органу (товщина ножа, кут заточування, товщина різальної кромки та ін.) і його кінематики (швидкість руху, коефіцієнт ковзання та ін.). Зі збільшенням швидкості ковзаючого різання величина зусиль різання знижується, а якість поверхні розрізу підвищується. В той же час зі збільшенням швидкості різання підвищується температура продукту в зоні різання [140, 141].

Інтенсифікація процесу різання м'ясопродуктів нині здійснюється і шляхом застосування віброрізання [142, 143, 144]. М'ясопродукти є в'язкопружними тілами, молекули яких є довгими гнучкими ланцюгами, пов'язаними між собою по довжині зв'язками різної природи, що

утворюють різної форми надмолекулярні з'єднання. При повільному прикладанні до різального органу елементи структурного каркаса передають зусилля від локального місця уздовж волокон на значні відстані, що викликає значні деформації об'ємів м'ясопродуктів, прилеглих до поверхні розрізу. В процесі вібраційного різання тривалість контакту різального органу з продуктом незначна. Коливання різального органу є способом створення на його різальній кромці імпульсів сил. При взаємодії різальної кромки з продуктом об'єми, прилеглі до місця прикладання сил, у зв'язку з цим отримують незначну зміну кількості руху. Внаслідок цього в процесі різання м'ясопродуктів об'єми, прилеглі до поверхні розрізу, деформуються не дуже сильно. А волокна структурного каркаса, завдяки високій концентрації напружень в області контакту з різальною кромкою, перерізуються. Величина середнього зусилля різання за увесь період коливання у декілька разів нижча від зусилля різання продукту при звичайному різанні [144].

Віброрізання м'ясопродуктів застосовується з метою отримання високоякісної поверхні розділення і зменшення витрати енергії на процес.

Дослідженнями Горбатова А.А. і Лимонова Г.Е. [146] встановлені переваги застосування вібраційного перемішування при приготуванні м'ясних фаршів порівняно з традиційними способами.

Останнім часом в м'ясній промисловості все більше застосовують способи приготування фаршу з підвищеною точністю дозування компонентів і виготовлення його без участі людини.

Отримання оптимальної якості фаршу досягається при послідовному подрібненні яловичини з додаванням вологи і свинини. Тільки у цьому випадку досягається отримання стійкого специфічного водно-жиро-білкового напівфабрикату, який складає основу фаршу. У зв'язку з цим дослідження в області оптимізації процесу подрібнення з метою використання природної вологозв'язуючої здатності фаршу і оптимальної тривалості подрібнення м'яса, проведені під керівництвом Горбатова А.В., а також описані в роботах Косого В.Д., Бакунца Г.В., Салаватуліной Р.М. та ін. [134, 147, 148], є актуальними не лише в теоретичному плані, але і мають вагомe значення для інтенсифікації і підвищення ефективності виробничих процесів виготовлення варених ковбасних виробів.

В той же час значний вплив на якість ковбасного фаршу і готового продукту мають певні геометричні, кінематичні і налагоджувальні параметри робочих органів - різальних інструментів. Дослідженню впливу геометричних розмірів і конфігурації різальних органів, швидкості різання і установки ножів присвячена частина матеріалу цієї роботи.

Зроблені спроби по виробництву ковбас заданого хімічного складу з використанням ПЕОМ [3]. Для чого спочатку експрес методами визначається хімічний склад початкової сировини. Отримані результати вводяться в ЕОМ і вирішується завдання по дозуванню сировини для отримання ковбас заданого хімічного складу.

Методи оптимізації процесу подрібнення м'яса по тривалості подрібнення і хімічному складу готового продукту припускають, що початкові параметри сировини, різальних органів і їх вплив на подрібнюваний продукт в процесі роботи залишаються незмінними. Разом з тим, початкова сировина для виготовлення ковбасних фаршів має неоднорідний хімічний склад, а на сучасному етапі розвитку приладобудування прилади для визначення хімічного складу експрес-методами відсутні.

Одночасно виникає завдання оптимізації геометричних параметрів і кінематики різальних органів, форми леза, режимів різання та інших параметрів ножів. При цьому показані беззаперечні переваги ковзаючого різання м'ясопродуктів для отримання якісної поверхні розрізу і зниження зусиль, необхідний для перерізання структурних зв'язків і деформації продукту в зоні різання. Великого значення набувають також дослідження для розв'язання проблеми виготовлення м'ясорізальних інструментів з високою зносостійкістю.

Таким чином, розробка наукових основ інженерного розрахунку м'ясоподрібнювального обладнання повинна ґрунтуватись на математичному моделюванні процесів, побудові на основі експериментів функціональних залежностей між конструктивними параметрами подрібнювального обладнання і фізико-хіміко-механічними характеристиками м'ясної сировини, що може дати поштовх для підвищення ефективності різання, зменшення енергоємності процесу і проектування та виготовлення нових сучасних м'ясоподрібнювальних машин. Математичне моделювання процесів механічної переробки м'яса потрібно здійснювати на базі методів механіки полімерів, тому що м'ясо, які біополімери може бути у крихкому, аморфному, твердому, в'язко-пружньому і пластичному стані в залежності від ступеня подрібнення, навантаження, температури.

Детальна класифікація методів подрібнення може бути покладена в основу розробки нових комбінованих способів подрібнення, які дадуть можливість покращити якість м'ясних напівфабрикатів, оптимізувати енергетичні параметри процесів і забезпечити належну довговічність подрібнювальних машин.

Розділ 4. Загальні принципи моделювання процесів подрібнення м'ясної сировини

4.1. Сутність проблеми і мета моделювання

Ефективність будь якого технологічного процесу, у т.ч. і процесу подрібнення м'яса і м'ясопродуктів залежить від правильного врахування властивостей і поведінки оброблювального об'єкту при виконанні над ним технологічних операцій, тобто можливості максимально точного прогнозування результатів його обробки і, за необхідності, внесення до технологічних режимів процесу відповідних уточнень, що забезпечують необхідну якість і максимальну продуктивність обробки.

Нажаль, теоретичні підходи до прогнозування результатів подрібнення м'ясопродуктів, як узагальнена система пізнавальних засобів, методів і прийомів, що забезпечує належну ефективність процесу, до теперішнього часу не розроблені ні для однієї групи біополімерів м'яса. Є лише окремі рекомендації з вибору оптимальних режимів подрібнення для обмеженої кількості матеріалів, що вкрай недостатньо для розвитку м'ясопереробного обладнання.

Мета моделювання – розробка таких теоретичних і експериментальних засобів, що можуть бути застосовані при синтезі і проектуванні обладнання для подрібнення м'яса і м'ясопродуктів з різними механічними і реологічними властивостями.

4.2. Методологія прогнозування процесів подрібнення

Одним з найважливіших питань у розробці методології прогнозування процесів подрібнення є пошук критеріїв якості, умов руйнування і продуктивності.

Формально процес подрібнення можна представити як засіб зміни властивостей оброблюваного матеріалу одним з відомих способів (рис. 4.1) з метою збільшення площі вільної поверхні або розділення на частини [149]. Така схема відображає основне завдання промислової реалізації процесу подрібнення, яка полягає у виборі або створенні устаткування для подрібнення конкретного матеріалу з метою отримання необхідного результату. Для аналізу процесу подрібнення доцільно розглядати його у вигляді окремих стадій: завантаження матеріалу в зону подрібнення, навантаження його в робочій зоні, збільшення зусиль навантаження до початку руйнування, сам процес багатократного руйнування і видалення матеріалу із зони подрібнення.

З огляду модельного представлення подрібнення таке розділення необхідне, тому що при переході з однієї стадії на наступну починають змінюватись реологічні властивості матеріалу внаслідок його

руйнування. Наприклад, видалення матеріалу із зони подрібнення має здійснюватись відразу, тому що пружно-пластична деформація його частин без руйнування позначається на якості кінцевого продукту і призводить до зайвих енерговитрат.

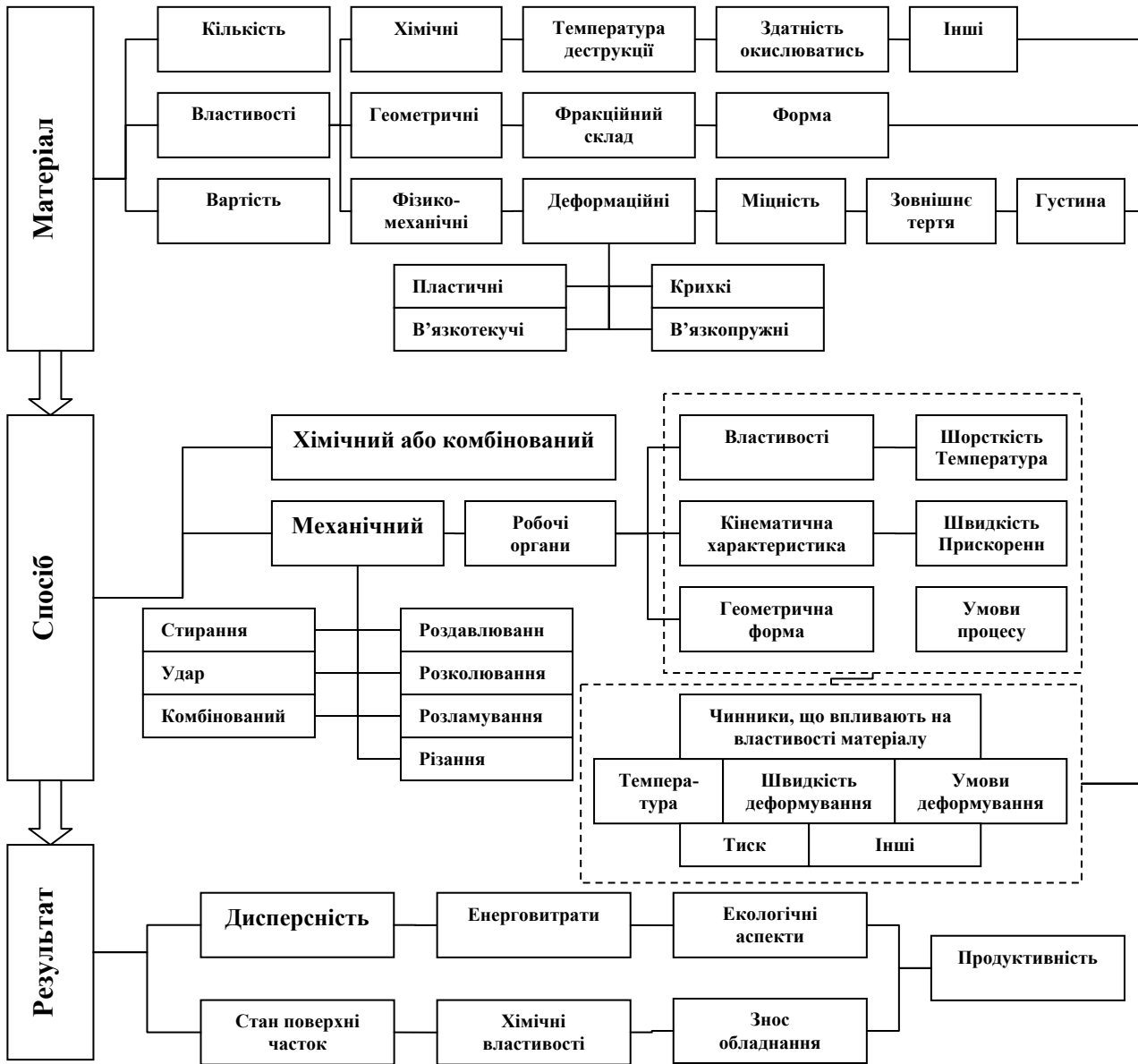


Рис. 4.1 - Взаємозв'язок чинників технологічного процесу подрібнення біополімерів м'яса

Рівняння енергетичного балансу для процесу подрібнення має вигляд [149]:

$$\frac{dA_M}{dt} + \frac{dq_1}{dt} + \frac{dq_2}{dt} + \frac{dW_1}{dt} + \frac{dW_2}{dt} + \frac{dA_T}{dt} + \frac{dW_S}{dt} + \frac{dW_Z}{dt} + \frac{dW_{\Phi X}}{dt} = 0, \quad (4.1)$$

де A_M - робота зовнішніх механічних сил, що прикладаються до системи; q_1 - кількість теплоти за рахунок зовнішніх джерел; q_2 - кількість теплоти

за рахунок внутрішніх процесів (дисипація, хімічні процеси та ін.); W_1 - приток в систему інших видів енергії (радіаційне випромінювання, електричне поле високої частоти та ін.); W_2 - енергія, витрачена на деформацію монолітних шматків матеріалу; W_Z - енергія, витрачена на пластичну деформацію полідисперсної суміші матеріалу, яка не приводить до руйнування окремих шматків; A_T - робота сил зовнішнього тертя матеріалу і робочих органів; W_S - енергія, витрачена на утворення вільної поверхні в матеріалі в результаті його руйнування, $W_{\Phi X}$ - енергія, витрачена на зміну фізико-хімічних властивостей матеріалу.

На основі термодинамічного підходу до процесу руйнування можна зробити припущення, що площа вільної поверхні матеріалу, яка утворилася в результаті його обробки пропорційна кількості енергії, витраченої на його деформацію. Рівняння зміни площі вільної поверхні в матеріалі можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{dW_S}{dt} + \frac{dW_2}{dt} = 0. \quad (4.2)$$

Припустимо, що інтенсивність поглинання матеріалом енергії залежить від наступних параметрів процесу подрібнення:

$$\frac{dW_2}{dt} = f(A, \Phi, S), \quad (4.3)$$

де A - параметр, що відображає фізико-механічні властивості матеріалу; Φ - функціональний параметр, що залежить від форми робочих органів подрібнюючого обладнання; S - площа руйнування. Фізична сутність рівняння (4.3) у тому, що інтенсивність деформації матеріалу і, відповідно, інтенсивність його руйнування залежить від способу прикладення механічних сил, ступеня його попередньої дисперсності і його фізико-механічних властивостей при деформуванні. Останні залежать від накопиченої ним теплової енергії та енергії, витраченої на зміну фізико-хімічних властивостей.

Взаємозалежність інших видів енергетичних потоків може бути виражена диференціальними рівняннями, які записуються на основі класичної термодинаміки з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача. Загалом аналітична модель процесу подрібнення може бути записана системою диференціальних рівнянь, що виражають динаміку енергетичних потоків в системі «матеріал - подрібнюючий пристрій - зовнішнє середовище» [149].

У загальному вигляді така модель може бути представлена схемою причинно-наслідкових зв'язків між елементами, що визначають параметри процесу подрібнення (див. рис. 4.1). Для математичної реалізації такої узагальненої моделі досить відобразити кожний з

елементів в математичній формі і записати рівняння залежності між ними.

Згідно з схемою (див. рис. 4.1) початковими параметрами моделі є хімічні, фізико-механічні і геометричні властивості матеріалу. В математичній моделі повинні бути враховані ті хімічні властивості біополімеру, які впливають на хід процесу подрібнення (агресивність по відношенню до обладнання, температура деструкції, здатність окислюватися та ін.). Аналітично ці показники можуть бути представлені у вигляді коефіцієнтів, які є постійними або залежать від динаміки процесу. Фізико-механічні властивості можна подати у вигляді рівнянь залежності реологічних властивостей, критерію міцності, сил тертя, густини, в'язкості та інших необхідних характеристик від чинників що впливають на ці показники. Геометричні властивості початкового матеріалу є фіксованими і визначаються фракційним складом і особливостями його геометричної форми.

Спектр механічних способів подрібнення досить широкий і вибір параметрів робочих органів подрібнювача досить складне завдання. Спосіб, за допомогою якого здійснюється процес, можна аналітично подати у вигляді рівнянь, що визначають геометричну форму робочих органів машини, їх кінематичну характеристику, властивості (шорсткість поверхні, температуру) і умови проведення процесу (тиск, наявність супутніх речовин тощо). Процес подрібнення механічним способом зручно поділити на стадії завантаження матеріалу, навантаження його до початку руйнування, зростання поверхні руйнування, і видалення матеріалу із зони обробки. Між цими стадіями у переважній більшості випадків неможливо провести розмежування у просторі.

Таким чином, для створення аналітичної моделі процесу подрібнення необхідно вибрати спосіб реалізації кожної з трьох вищенаведених стадій і записати рівняння, які описують поведінку матеріалу на кожній з них. Основна проблема в аналітичному описі процесу деформації і руйнування полідисперсної суміші матеріалу. Адекватно описати цей процес функціональними залежностями можна лише на основі експериментальних досліджень поведінки сукупності матеріалу у певному виді подрібнювального обладнання.

Одним з важливих етапів вирішення проблеми математичного моделювання процесів подрібнення є розроблення узагальненої класифікації способів і устаткування для подрібнення м'яса і м'ясопродуктів.

4.3. Класифікаційні ознаки способів і засобів подрібнення біополімерів м'яса

Аналіз способів і устаткування для подрібнення м'яса показав, що на даний час запропоновано безліч структурних схем подрібнювального

обладнання, які розрізняються за способом механічної дії на матеріал, станом біополімерів м'яса при подрібненні, принципом організації процесу (періодичний, безперервний), конструкцією машин і робочих органів, способом завантаження і видалення матеріалу із зони подрібнення. Характерною особливістю всіх запропонованих класифікаційних схем є та, що в їх основу покладений поділ способів і пристроїв за дискретними ознаками: подрібнення при низьких і підвищених температурах; обробка крихких в'язкотекучих та еластичних матеріалів, застосування ударної стираючої, ріжучої, зсувної дії робочих органів тощо. А щодо конструктивних ознак, то з використанням принципу створення класифікаційних схем [150] їх можна розвивати до нескінченності по мірі поглиблення аналізу існуючих і створення нових конструкцій. Жодна із запропонованих класифікацій, навіть при їх об'єднанні, не дозволяє провести узагальнений аналіз існуючих конструкцій через наявність безлічі дискретних класифікаційних ознак та бути основою для синтезу нових видів устаткування.

Тому, для узагальнення класифікації способів і устаткування для подрібнення, потрібно визначити ті дискретні ознаки, що характеризують способи і обладнання для подрібнення, які можуть бути описані безперервними функціями їх зміни в залежності від виду сировини і технологічних умов подрібнення, і ті загальні ознаки, які неможливо подати як безперервні і їх кількість мінімальна. Тільки на основі такої класифікації можливе створення узагальненої математичної моделі.

В результаті аналізу процесів, що відбуваються при подрібненні біополімерів м'яса в механічних пристроях [151] встановлено, що їх дискретними ознаками є лише структурні схеми обладнання, що визначають характер руху матеріалу під час технологічної обробки і виділено наступні основні параметри, які можуть бути описані безперервними функціями:

- геометричні і кінематичні параметри робочих органів;
- геометричні характеристики матеріалу;
- фізико-механічні властивості біополімерів м'яса в залежності від технологічних умов подрібнення (температури, швидкості і умов деформування).

При взаємодії поверхонь робочого органу з матеріалом виконується робота:

$$A_p = A_{деф} + A_{руйн} + A_{тер}, \quad (4.4)$$

де $A_{деф}$, $A_{руйн}$, $A_{тер}$ - відповідно, частини роботи, витрачені на деформування і руйнування матеріалу та подолання сил тертя.

Коефіцієнт корисної дії робочого органу:

$$\eta_p = \frac{A_{руйн}}{A_p}. \quad (4.5)$$

Елементарні акти утворення вільної поверхні матеріалу можливі при дії робочого органу в межах:

$$V_p = S_a \cdot l_a, \quad (4.6)$$

де V_p - об'єм області можливого руйнування матеріалу; S_a - площа перетину робочої порожнини подрібнювача у напрямку нормалі до відносної швидкості основного потоку матеріалу і робочих органів; l_a - довжина області можливого руйнування.

При розтягуванні зразка матеріалу область V_p обмежена повним об'ємом, що деформується, а при різанні це область об'ємом $V_p = \Delta_p L_p h_m$.

Очевидно, що геометричні параметри робочих органів подрібнювального обладнання характеризують потенційну інтенсивність технологічної дії на матеріал, яка, перш за все, визначена ступенем охоплення робочими органами об'єму порожнини машини. Цю потенційну інтенсивність можна записати так:

$$I_0 = \frac{S_a}{\sum S_p}, \quad (4.7)$$

де $\sum S_p$ - сумарна площа проекції ефективної поверхні робочих органів, яка має безпосередній контакт з матеріалом, на площину S_a (очевидно $0 < I_0 \leq 1$).

Ступінь заповнення робочої порожнини подрібнювача матеріалом:

$$0 < \frac{V_m(t)}{O_{II}} \leq 1. \quad (4.8)$$

де $V_m(t)$ - кількість матеріалу в подрібнювачі в даний момент часу;

O_{II} - об'єм робочої порожнини подрібнювача.

Тоді дійсний коефіцієнт інтенсивності технологічної дії.

$$I_\partial = I_0 \frac{V_m(t)}{O_{II}}. \quad (4.9)$$

Опір матеріалу подрібненню залежить від його механічних властивостей як суцільного середовища і його макроструктури, зокрема від наявності дефектів і тріщин, кількість яких можна виразити як площу вільної поверхні в одиниці об'єму, тобто питому площу вільної поверхні:

$$S_{num} = \frac{S_m}{V_m}, \quad (4.10)$$

де S_m - площа вільної поверхні в об'ємі V_m матеріалу.

Для досягнення початку руйнування суцільного бездефектного об'єму V_m матеріалу потрібно виконати роботу:

$$A = [w] \cdot V_m, \quad (4.11)$$

де $[w]$ - граничне значення питомої енергії деформації, перевищення якого супроводжується скиданням механічної енергії на утворення нової поверхні.

Наступне приращення роботи деформування призводить до утворення нової поверхні:

$$dS_m = \frac{dA}{\alpha^S}, \quad (4.12)$$

де α^S - питома енергія утворення одиниці площі вільної поверхні матеріалу (Дж/м²).

Початкові умови розвитку рівняння (4.12):

$$S = 0, \text{ при } A = [w] \cdot V_m. \quad (4.13)$$

Така оцінка інтенсивності дії робочих органів на матеріал буде справедливою для всіх типів механічних подрібнювальних машин.

Кінематичні характеристики робочих органів можуть бути описані рівняннями руху, а геометричні характеристики матеріалу можна подати за допомогою функції зміни площі вільної поверхні матеріалу [151]. Опір матеріалів деформуванню, міцність і сили тертя та їх залежність від температури, швидкості та умов деформування можна описати на основі експериментальних досліджень та теоретичних відомостей з фізики і механіки полімерів та біополімерів.

Для визначення ознак пристроїв для подрібнення, що мають дискретний характер, проведений аналіз можливих структур потоків подрібнювальних матеріалів, що складає математичний опис гідродинамічної структури потоків, особливості якої визначають ефективність роботи подрібнювачів.

За моделлю ідеального витиснення, незалежно від складних реальних траєкторій руху матеріалу, він рухається через зону обробки прямолінійної частинки, що мають різні властивості не змішуються одна відносно іншої. Час перебування частинок в зоні подрібнення однаковий:

$$t = \frac{O_{з.н.}}{Q_m}, \quad (4.14)$$

де $O_{з.н.}$ - об'єм зони подрібнення; Q_m - об'ємна продуктивність потоку подрібнюваного матеріалу.

Швидкість зміни властивостей такого ідеалізованого потоку:

$$\frac{dC}{dt} = -v \left(\frac{dC}{dz} \right), \quad (4.15)$$

де C - досліджуваний параметр; v - лінійна швидкість потоку матеріалу; z - координата переміщення.

За моделлю повного перемішування в усіх точках об'єму зони обробки властивості частинок однакові і рівні їх значенням на виході:

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{Q_M}{V_{з.н.}} \right) \cdot (C_{вх} - C_{вих}). \quad (4.16)$$

У реальних випадках час перебування частинок у потоці не однаковий і відрізняється від середнього часу, визначеного за рівнянням (4.14), а будь-яке відхилення від ідеального витіснення умовно називають перемішуванням. Це явище можна описати з використанням дифузійної і осередкової моделей.

За дифузійною моделлю перемішування матеріалу в потоці у напрямі його руху описується виразом, формально відповідним закону молекулярної дифузії Фіка [152]. По аналогії з коефіцієнтом молекулярної дифузії в законі Фіка ступінь поздовжнього перемішування у дифузійній моделі характеризується коефіцієнтом поздовжнього перемішування D_L . Цю модель можна записати так:

$$\frac{dC}{dt} = -v \left(\frac{dC}{dz} \right) + D_L \left(\frac{d^2C}{dz^2} \right). \quad (4.17)$$

Як і у моделі ідеального витіснення профіль швидкостей частинок матеріалу в перпендикулярному перетині зони обробки однаковий. Лише коефіцієнт поздовжнього перемішування D_L враховує вплив чинників, які викликають структурну нерівномірність потоку, але він не дозволяє повною мірою їх врахувати. Включення ж у рівняння (4.17) додаткових корегуючих членів для більш достовірного відображення реальної структури потоку призводить до ускладнення моделі і можливостей її практичного застосування.

Осередкова модель структури потоку дозволяє, окрім поздовжнього перемішування, врахувати й інші особливості руху потоку подрібнюваного матеріалу.

За цією моделлю подрібнювач складається з послідовно сполучених n осередків повного перемішування. Якщо їх об'єм однаковий, то така модель описується системою n рівнянь:

$$\left(\frac{1}{n} \right) \cdot \left(\frac{dC_i}{dt} \right) = \left(\frac{Q_M}{V_{з.н.}} \right) \cdot (C_{i-1} - C_i), \quad (4.18)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$.

В цій моделі, n - це єдиний параметр за допомогою якого характеризується ступінь нерівномірності розподілу частинок потоку матеріалу за часом перебування в моделі. Тому така модель, як і дифузійна, не дозволяє адекватно відобразити складні явища, якими характеризується рух матеріалу при подрібненні. Разом з тим, її легко можна удосконалити за рахунок більш повного віддзеркалення характеру руху матеріалу в подрібнювачах.

Області застосування розглянутих моделей безумовно залежать від виду технологічного обладнання, геометричних параметрів робочих зон та інструментів, фізико-механічних та реологічних властивостей подрібнюваного матеріалу і режимів обробки.

Залежності характеристик готового продукту від часового чинника, а саме від добутку константи швидкості подрібнення на час подрібнення, дають рішення диференціальних рівнянь моделей.

На відміну від хімічних процесів, які характеризуються безперервними, монотонними кінетичними рівняннями, подрібнення може відбуватись за рахунок ряду окремих актів руйнування матеріалу. Тому цей процес доцільно подати у вигляді послідовного ланцюга з комірок, кожна з яких характеризується стаціонарними умовами руху, деформування і руйнування матеріалу при незмінних властивостях. Кожна комірка характеризується певною інтенсивністю і умовами технологічної дії робочих органів на матеріал. При проходженні i -ї комірки вільна поверхня матеріалу змінюється до величини S_{i+1} . В залежності від виду подрібнювача кількість комірок може складати: $n = 1$ - при одноразовому навантаженні і руйнуванні певного об'єму матеріалу V_m ; $n = k$ - при дискретному деформуванні об'єму V_m k разів; $n = \infty$ - при монотонно зростаючій інтенсивності деформування протягом часу перебування матеріалу в подрібнювачі.

В залежності від типу структури матеріального потоку і значення n подрібнювачі можна класифікувати за схемою, поданою на рис. 4.2.

Подрібнювачі першого типу з ідеальним витисканням матеріалу і кратністю механічної дії $n = 1$ характеризуються постійною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення), а руйнування матеріалу відбувається по мірі його переміщення відносно робочих органів і збільшується пропорційно узагальненій координаті переміщення x . Кінетика такого процесу подрібнення описується рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = f(x) = const, \quad (4.19)$$

де $f(x)$ - деяка функція координати взаємного переміщення робочого органу і матеріалу.

До таких подрібнювачів можна віднести всі технологічні машини, в яких відбувається цілеспрямоване руйнування матеріалу при його однократній взаємодії з робочим органом.

Відносний рух матеріалу і робочого органу може бути простим і складним. Наприклад, при вирубуванні частин туші тварини різакми на пресах реалізується простий відносний рух матеріалу і інструменту, а при розрізанні пластових матеріалів дисковими ножицями чи стрічковими ножами відбувається складний рух матеріалу відносно інструменту. Таке ускладнення руху дає можливість цілеспрямованого керування технологічними зусиллями і ступенем підвищення продуктивності.

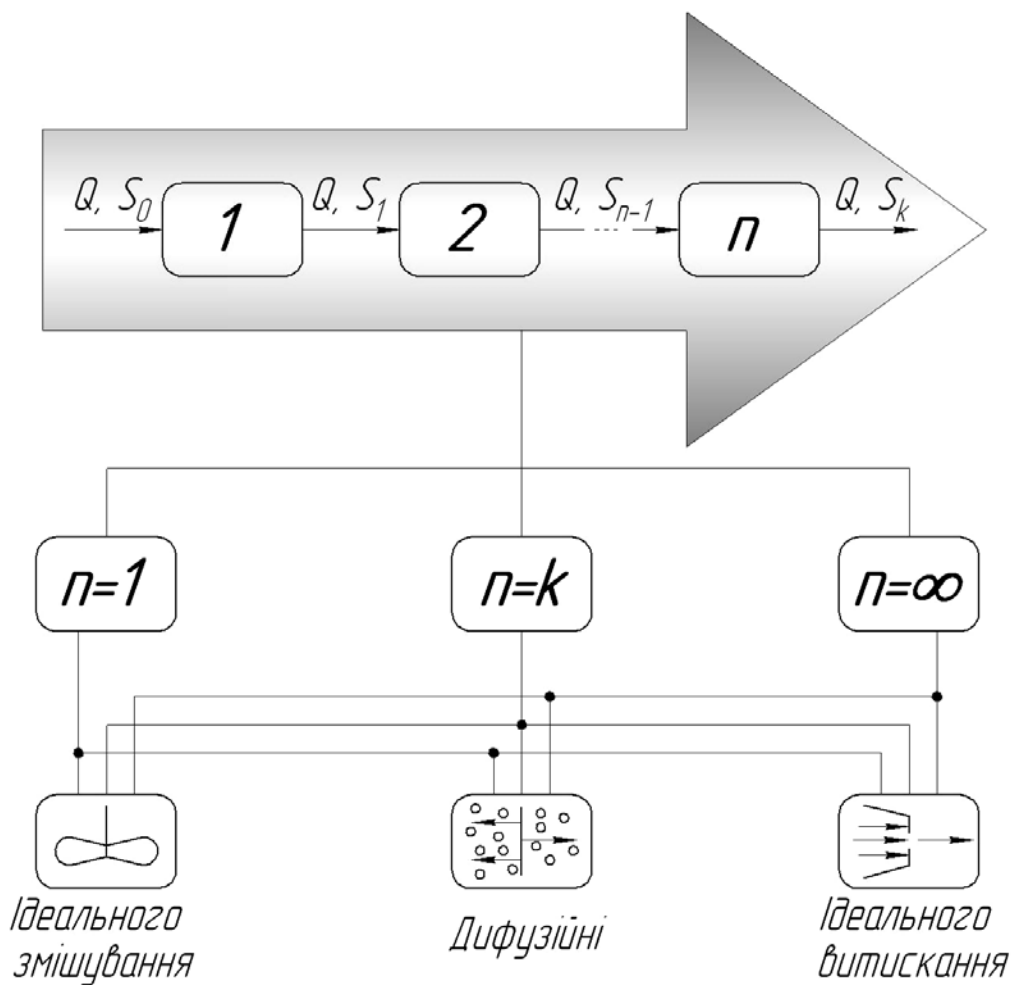


Рис. 4.2 – Схема класифікації пристроїв для подрібнення по структурі потоків матеріалу

Вид функції $f(x)$ визначається конструктивними і технологічними параметрами подрібнювача. Наприклад, для машини, що розрізає смугу матеріалу товщиною b за умови його подачі з постійною швидкістю v_m на нерухомий ніж функція (4.19) запишеться так:

$$\frac{dS}{dt} = bv_m. \quad (4.20)$$

Легко прийти до висновку, що такі подрібнювачі ефективні при поділі на частини довгомірних матеріалів і при дробленні на невелику кількість частин великогабаритної м'ясної сировини.

Подрібнювачі другого типу, з ідеальним витисканням і кратністю механічної дії $n = k$ можна подати як послідовний ряд руйнуючих елементів подрібнювачів першого типу зі збільшенням інтенсивності дії на матеріал. Зняття навантаження на матеріал при його переході його до наступного руйнуючого органу знижує енергетичну ефективність подрібнення.

Подрібнювачі третього типу з ідеальним витисканням і кратністю механічної дії $n = \infty$ характеризуються монотонним безперервним збільшенням коефіцієнту інтенсивності механічної дії на матеріал по мірі збільшення узагальненої координати переміщення:

$$I_\partial = f(x) \quad (4.21)$$

Очевидно, що збільшення технологічної інтенсивності механічної дії I_∂ може відбуватись за рахунок зменшення $\sum S_p$, або об'єму робочої порожнини пристрою O , як функцій від координати x .

Подрібнювачі четвертого типу з дифузійною схемою потоку матеріалу і кратністю механічної дії $n = 1$ характеризуються змінною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення), а руйнування матеріалу відбувається незалежно від координати його розташування відносно робочих органів і приріст поверхні руйнування залежить від миттєвого значення ступеня подрібнення матеріалу, тобто зменшується пропорційно збільшенню значення S_p . Кінетика процесу подрібнення для цих подрібнювачів описується рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S)). \quad (4.22)$$

До подрібнювачів четвертого типу відноситься роторні ножові дробарки, ударні молоткові подрібнювачі, струменеві млини та всі інші, в конструкціях яких є пристрої для часткового виведення матеріалу з зони подрібнення по мірі зменшення дисперсності частинок.

Враховуючи, що інтенсивність механічної дії на матеріал по мірі зменшення розмірів частинок у цих подрібнювачах зменшується, для них існує значне обмеження розмірів кінцевого продукту. Тому для отримання дрібнодисперсних частинок матеріалу такі подрібнювачі не ефективні.

Подрібнювачі п'ятого типу з дифузійною структурною схемою потоку матеріалу і кратністю механічної дії $n = k$ характеризуються

змінною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення). Інтенсивність механічної дії на матеріал залежить від координати його розташування в зоні подрібнення і приріст поверхні руйнування залежить від миттєвого значення ступеня подрібнення матеріалу, тобто зменшується пропорційно збільшенню значення S_p . Зміна інтенсивності механічної дії на матеріал від координати його розташування в подрібнювачі відбувається дискретно і має кінцеву кількість ступенів. Тому рівняння кінетики процесу подрібнення для цих подрібнювачів виглядає таким чином:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I_k). \quad (4.23)$$

Представниками таких подрібнювачів є дисмембратори та дезінтегратори, в яких зменшується крок установки руйнуючих елементів по мірі збільшення діаметра їх розташування на рухомих дисках.

Подрібнювачі шостого типу з дифузійною структурною схемою матеріального потоку і кратністю механічної дії $n = \infty$ відрізняються від попередніх подрібнювачів тільки тим, що інтенсивність механічної дії на матеріал змінюється монотонно за певною закономірністю $I = f(x)$ в залежності від координати переміщення матеріалу. Кінетика процесу подрібнення описується рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(x)). \quad (4.24)$$

Наприклад, таким вимогам могли б відповідати подрібнювальні дезінтегратори, в яких крок між руйнуючими елементами і діаметр розташування кожного з них змінюються за певними монотонними функціями.

Подрібнювачі сьомого типу з структурною схемою потоку матеріалу ідеального змішування і кратністю механічної дії $n=1$ характеризуються змінною швидкістю утворення нової поверхні (інтенсивністю подрібнення). В них інтенсивність механічної дії на матеріал і приріст поверхні руйнування залежить від миттєвого значення ступеня подрібнення матеріалу і зменшується пропорційно збільшенню значення S_p . Досягнення певного ступеня подрібнення регулюється часом обробки матеріалу. Для таких подрібнювачів рівняння кінетики процесу має наступний вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S)). \quad (4.25)$$

До цього типу подрібнювачів можна віднести барабанні і вібраційні млини.

Подрібнювачі восьмого типу з схемою потоку матеріалу ідеального змішування і кратністю механічної дії $n = k$ відрізняються від попередніх подрібнювачів дискретним збільшенням інтенсивності механічної дії на матеріал в залежності від координати його розташування. Кінетику процесу подрібнення у цих подрібнювачах можна описати рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I(x)). \quad (4.26)$$

До цього виду подрібнювачів можна віднести кульові млини з нахиленим барабаном, який розділений на секції з різним розміром руйнуючих елементів. Кут нахилу барабана визначає швидкість переміщення матеріалу з однієї зони інтенсивності подрібнення в іншу.

Подрібнювачі дев'ятого типу з схемою потоку матеріалу ідеального змішування і кратністю механічної дії $n = \infty$ відрізняються від подрібнювачів сьомого і восьмого типів збільшеною у часі інтенсивністю механічної дії на матеріал незалежно від координати його розташування. Кінетика процесу подрібнення для них описується рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(t)). \quad (4.27)$$

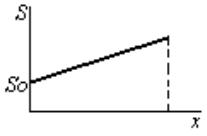


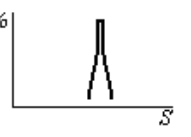
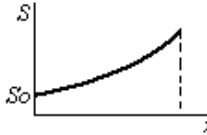
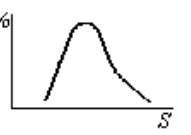
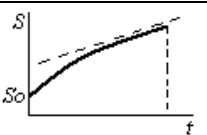
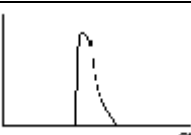
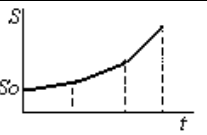
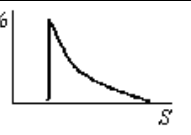
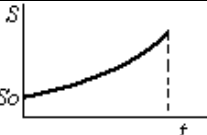
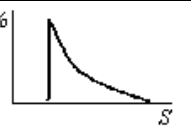
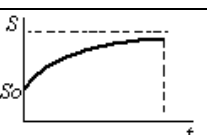
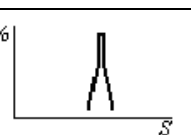
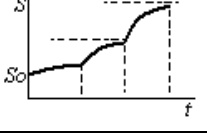
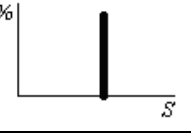
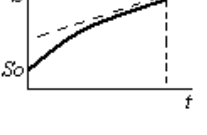

Таким вимогам могли б теоретично відповідати подрібнювачі, в яких по мірі зростання поверхні руйнування в матеріалі буде зростати інтенсивність механічних навантажень. Це в певній мірі свідчить про те, що запропонований принцип класифікації подрібнювальних пристроїв може бути підґрунтям для теоретичного прогнозування і створення нових способів подрібнення і обладнання для їх реалізації.

Отже, дискретні ознаки подрібнювальних машин зводяться до дев'яти структурних схем матеріальних потоків. По кожній структурній схемі визначені характерні рівняння кінетики збільшення площі вільної поверхні матеріалу S при подрібненні в залежності від координати його переміщення x , значення інтенсивності технологічної дії I , а також вид розподілу розмірів продукту подрібнення (табл. 4.1).

4.4. Енергетична ефективність подрібнювачів

Традиційні способи подрібнення в основному базуються на комбінації двох методів деформаційного навантаження - стисненні руйнованого тіла в квазістатичному і динамічному режимах, причому деформується весь об'єм тіла. Для оцінки коефіцієнта використання енергії K за різних способів подрібнення проведемо наступний уявний експеримент. Циліндричний бездефектний зразок, складений з набору атомних площин, розташованих на відстані d , розтягується до руйнування. Знехтуємо крайовими ефектами і не враховуватимемо різницю в питомій

Таблиця 4.1 – Характеристика процесів подрібнення за різних структурних схем матеріальних потоків

№	Тип моделі	Загальний вигляд рівнянь кінетики процесу подрібнення	Вид функції подрібнення	Приклади реалізації	Вид розподілу розмірів продукту подрібнення
1	\overrightarrow{I}	$\frac{dS}{dt} = f(x)$		Одноступеневі ріжучі, пили, пластовочні машини	
2	\overrightarrow{k}	$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(x)$		Багатоступеневі ріжучі, дробарки, силові подрібнювачі	
3	$\overrightarrow{\infty}$	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(x))$		Валкові, конусні, камерні, вовчки	
4	\overleftrightarrow{I}	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S))$		Роторні ріжучі, ударної дії з колосниковою решіткою, струменеві	
5	\overleftrightarrow{k}	$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I_k)$		Дисмембратори, дезінтегратори	
6	$\overleftrightarrow{\infty}$	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(x))$		Не реалізовані	
7	\overrightarrow{D}	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S))$		Барабанні, вібротлини	
8	\overrightarrow{k}	$\frac{dS}{dt} = \sum_{I=I_1, S=S_0}^{I=I_n, S=S_k} f(t, I(S), I(x))$		Кутери, барабанні багатоступеневі, колоїдні млини, емульситатори	
9	$\overrightarrow{\infty}$	$\frac{dS}{dt} = f(t, I(S), I(t))$		Не реалізовані	

енергоємності роз'єднання двох напівпросторів і двох атомних площин. При подальших міркуваннях буде зрозуміло, що врахування обох обставин привело б тільки до зменшення коефіцієнта використання енергії K . Тому отримана нижче оцінка буде завищеною.

При розтягуванні зразок накопичуватиме потенційну енергію деформації, співрозмірну з роботою зовнішніх сил по роз'єднанню атомних площин.

За бездефектної структури зразка не існує жодної пари сусідніх площин з ослабленим зв'язком і роз'єднання продовжуватиметься до тих пір, поки всі атомні площини не відокремляться. Лише у цей момент чергова енергетична флуктуація стає здатною порушити ослаблений зв'язок між довільно взятими двома атомними площинами, що приводить до поділу зразка на дві частини з утворенням нової поверхні площею

$$S_p = 2 \cdot S_n, \quad (4.28)$$

де S_n — площа поперечного перетину зразка.

Робота зовнішніх сил до моменту руйнування майже досягає рівня, достатнього для роз'єднання всього зразка на атомні площини і утворення нової поверхні площею

$$\sum S = 2nS_n, \quad (4.29)$$

де n - кількість атомних площин, що складають зразок.

Таким чином, при руйнуванні зразка теоретичної міцності коефіцієнт використання енергії буде таким:

$$K = \frac{2S_n w}{2nS_n w} = \frac{1}{n} = \frac{d}{l}, \quad (4.30)$$

де l — довжина зразка.

Характерний розмір d в твердих тілах складає близько $2 \cdot 10^{-10}$ м [152]. Приймавши $l = 20$ мм і підставляючи обидва значення у вираз (4.30), знаходимо $K = 10^{-8}$.

Така надзвичайно низька енергоефективність - наслідок прикладення зовнішніх сил до всього об'єму зразка. Гіпотетичний експеримент у перебільшеному вигляді продемонстрував енергетичну згубність такого деформування. Надмірна пружна деформація накопичується в процесі навантаження тіла, а потім переходить у тепло. Енергоємність надмірної деформації особливо велика при руйнуванні великих шматків матеріалу. Так, зі збільшенням лінійного розміру D шматка енергія його об'ємної деформації росте пропорційно D^3 , а площа поверхні, що утворюється в результаті руйнування, пропорційно D^2 . Тому питома витрата енергії деформації на одиницю утвореної поверхні виявляється пропорційною D^{-1} . Таким чином при крихкому руйнуванні коефіцієнт використання енергії деформації обернено пропорційний розміру шматка матеріалу.

Разом з тим описане явище відноситься до частинок однакової міцності. Відомо, що зі зменшенням розміру дефектність частинки зменшується а її міцність росте. При деякому граничному мінімальному розмірі повністю припиняється крихке руйнування частинки і настає пластична течія. Але це не відноситься до таких же частинок уявно виділених у довільному місці великого шматка матеріалу. «Міцність» цього об'єму в середньому співпадає не з міцністю згаданої частинки, а з міцністю шматка. Відповідно і середня щільність енергії «граничної» деформації елементарного об'єму і всього шматка теж співпадають. Таким чином, підвищення енергоселективності руйнування пов'язане із створенням локальних граничних навантажень безпосередньо в початковому шматку по місцю руйнування - в протилежність його навантаженню «цілком». Зі збільшенням градієнта напруження збільшується і енергоселективність руйнування.

Високоградієнтні методи застосовувалися на найраніших стадіях розвитку процесів подрібнення. Достатньо згадати розколювання клинами полін дерев і кам'яних блоків. Згодом цей процес замінили розпилюванням, яке забезпечило масову високопродуктивну переробку і витіснило цей енергетично селективний спосіб з одночасним підвищенням масштабів переробки і продуктивності праці та збільшенням витрат енергії.

Інший приклад – це різання лезом. Чим гостріше лезо, тим вищий градієнт напруження, менші зусилля різання та енерговитрати.

Найбільш високу градієнтність мають хімічні способи руйнування, масштаб «робочих тіл» яких співрозмірний атомними зв'язками.

Таким чином варто організувати подрібнення високоградієнтними способами, зберігши високу продуктивність технологічного процесу.

Важливо знизити витрати енергії на пластичну деформацію біополімерів м'яса за рахунок вибору оптимального співвідношення між навантаженням, швидкістю деформації і тривалістю навантаження. Наприклад, велика швидкість деформування локалізує пластичну деформацію у порівняно невеликій кількості атомних шарів в області формування магістральної тріщини.

Часом варто вдатися до попереднього підвищення крихкості, максимально блокуючи і гальмуючи наявні дислокації, що утворюються в процесі навантаження тіла. Ефект підвищення крихкості твердого тіла виникає тоді, коли дифузія точкових дефектів відбувається з швидкістю, достатньою для їх підходу до існуючих дислокацій, які знов виникають, і утворення навколо них скупчень певної щільності. Для збільшення рухливості атомів необхідне підвищення температури тіла, яка повинна відповідати рівню деформаційного навантаження, а швидкості

переміщення дислокацій і дифузії точкових дефектів повинні узгоджуватись.

Таким чином, при наданні тілу деякої температури, відповідної заданій швидкості деформації, воно руйнується з різким зменшенням пластичності. Ефективним є надання біополімерам м'яса крихкості за рахунок створення наднизьких температур і високих швидкостей руйнування.

Якщо порівняти в подрібнювальних машинах втрати на тертя деталей у вузлах і матеріалу в робочій зоні машини з іншими видами енергетичних втрат, то легко побачити їх вирішальну роль у реалізації технологічного процесу. За рахунок запобігання дисипативної взаємодії робочих органів і навантажуваних частинок подрібнювального матеріалу енергоємність подрібнення можна знизити щонайменше на порядок. Подальше зменшення енергоємності процесу можливе за умови виключення взаємодії вже подрібнених часток матеріалу з робочими органами машин і між собою. Це значить, що час t_2 перебування частинки в дисипативних контактах при подрібненні має наближатись до тривалості акту її руйнування t_1 . Він може оцінюватись за допомогою коефіцієнта використання часу:

$$K_t = \frac{t_2}{t_1} \quad (4.31)$$

Зрозуміло, що бажано наближення цього коефіцієнта до 1.

Оцінимо величину цього коефіцієнта для подрібнювальних пристроїв, класифікованих у відповідності з структурою матеріальних потоків (див. табл. 4.1). З урахуванням того, що руйнування крихкого матеріалу відбувається завдяки розповсюдженню тріщин з швидкістю v , яка швидко досягає закритичних максимальних швидкостей v_{\max} то приріст утворення нової поверхні від розповсюдження однієї тріщини можна описати формулою:

$$\Delta S = v_{\max} h, \quad (4.32)$$

де ΔS - приріст нової поверхні; h - глибина тріщини (лінійний розмір частинки).

Середнє значення часу руйнування матеріалу в подрібнювачі:

$$t_1 = O_3 / Q, \quad (4.33)$$

де O_3 - об'єм завантаження робочої порожнини подрібнювача; Q - продуктивність машини.

Якщо загальний приріст поверхні при дробленні 1 м^3 матеріалу за прийнятого режиму складає S_n ($\text{м}^2/\text{м}^3$), то загальний середній приріст поверхні при руйнуванні однієї частинки об'ємом h^3 за час t_1 буде рівним $S_n h^3$. Тоді приріст поверхні частинки за 1 секунду складає:

$$\Delta S = \frac{S_n h^3}{t_1} = \frac{S_n h^3 Q}{t_1 O_3} \quad (4.34)$$

Для гіпотетичного випадку розповсюдження всередині частинки в кожен момент часу лише однієї тріщини (міркування введене для більшої наочності викладок) можна записати:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_2}. \quad (4.35)$$

Розділивши вираз (4.34) на (4.35) і підставивши результат у (4.33), одержимо:

$$K_t = \frac{v_{\max} O_3}{S_t h^2 Q}. \quad (4.36)$$

З виразу (4.36) очевидно, що подрібнювач тим енергетично вигідніший, чим менше відношення об'єму його завантаження до продуктивності і чим вище питомий приріст поверхні при подрібненні одиниці об'єму матеріалу.

Формула (4.36) передбачає, що в частинці розповсюджується тільки одна тріщина. Насправді такого обмеження не існує. Це значить, що реальний коефіцієнт часу K_t набагато більший. Він ще більше зростає зі зменшенням лінійного розміру частинок h .

Таким чином витрати на зовнішнє тертя в подрібнювачах можна знизити вживши наступних заходів:

- зменшити співвідношення об'єму робочої зони і об'ємної продуктивності машини;
- швидкість переміщення робочих органів машини і їх хід по відношенню до взаємодіючих в процесі руйнування тіл потрібно зменшувати;
- після руйнування готовий продукт потрібно якнайшвидше вилучити з робочої зони.

Проведений аналіз дозволяє провести наближену оцінку енергоефективності подрібнювальних машин за класифікаційними ознаками (див. табл. 4.1).

Найнижча енергетична ефективність притаманна подрібнювачам типів 7, 8, 9. Середня – подрібнювачам типів 4, 5, 6. Найбільш енергоекономними є подрібнювачі 1, 2, 3 типу завдяки негайному виведенню готового продукту після руйнування з робочої зони.

4.5. Математична модель процесу подрібнення біополімерів м'яса

Будь яку зі структурних схем подрібнювачів (див. табл. 4.1) можна математично описати за наявності рівнянь, які зв'язують у часі безперервними функціями геометричні розміри обладнання, властивості

і фізико-механічний стан подрібнюваного матеріалу залежно від умов подрібнення, геометричні і кінематичні характеристики робочих органів.

Узагальнену математичну модель процесу подрібнення можна подати системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dt} = f_I(x, S, t); \\ \frac{dS}{dt} = f_S(x, I, t); \\ \frac{dx}{dt} = f_x(t); \\ \frac{dA}{dt} = f(I, M, S, t, x, T); \\ \frac{dM}{dt} = f(T, x, \frac{dx}{dt}, S); \\ \frac{dT}{dt} = f(x, t, A, \theta), \end{array} \right. \quad (4.37)$$

де S - площа вільної поверхні матеріалу; I - інтенсивність механічної дії на матеріал; A - робота подрібнення; T - температура; M - параметр механічних властивостей матеріалу; θ - тепловий потік; x - узагальнена координата положення.

Зрозуміло, що така система може розв'язуватись за певних початкових і граничних умов, які визначають стан матеріалу до руйнування, граничні умови його міцності, температурну стійкість біополімеру та ін.

Очевидно, що для полегшення розв'язку системи для кожного окремого випадку треба визначити можливі спрощення. Задача ускладнюється тоді, коли потрібно розглянути деформування і руйнування не суцільного середовища, а сукупності часток матеріалу, різних за розміром і формою.

Таке відображення процесу руйнування сукупності частин матеріалу в робочих зоні подрібнювача можна звести до вирішення наступних задач:

- розробки фізичної моделі матеріалу або її вибору;
- розв'язку задачі про напружений стан подрібнюваного матеріалу;
- аналітичного опису процесу руйнування окремого шматка матеріалу у визначеному силовому полі;
- моделювання трансформації гранулометричного складу матеріалу в робочій зоні за час його подрібнення;

- математичного опису взаємодії функціональних зон подрібнювача.

Розробку фізичної і реологічної моделі сукупності подрібнюваного матеріалу можна розпочати з представлення його у вигляді однорідного за хімічним складом, але різнорідного за формою і розмірами окремих шматків. Разом з тим, аналітичні методи розрахунку напруженого стану таких середовищ не досконалі, а тому доцільно представляти матеріал у вигляді суцільного середовища із відповідно підібраними фізичними і реологічними властивостями. Тоді для вивчення процесу руйнування матеріалу в робочій зоні машини можна скористатись аналітичним апаратом механіки суцільного середовища і класичної термодинаміки. Важливо підібрати просту модель, описуючу дійсні реологічні властивості подрібнюваного біополімеру м'яса.

Однією з можливих моделей сукупності подрібнюваного матеріалу, може бути модель деформуємого твердого тіла [149], якій притаманні різновиди тіл: пружне, пружно-пластичне, в'язке і в'язко-пружне та різні модифікації цих тіл.

Для моделювання подрібнюваного біополімерного матеріалу можливе використання також моделей суцільного середовищ, призначених для опису сипких середовищ (зв'язаних, не зв'язаних, ідеальних пластичних, зернистих). При цьому можна виходити з того факту, що у сипкому середовищі виникають тільки напруження стиснення σ і дотичні напруження τ [149]. Напруження σ і τ можуть виникати одночасно на одній площині. Причому σ і τ зв'язані залежністю

$$\tau \geq \pm\Phi(\sigma), \quad (4.38)$$

де $\Phi(\sigma)$ - безперервно зростаюча функція.

Частинам сипкого середовища властива пружність і міцність, які забезпечують відсутність пластичних деформацій за наявності σ і τ . В загальному випадку сипке середовище анізотропне.

Як основну розрахункову модель реального сипкого середовища можна використовувати суцільне середовище, яке має здатність чинити опір розтягуванню і зрушенню в межах сил внутрішнього тертя і зчеплення. Така розрахункова модель називається зв'язаним сипким середовищем [149].

Іншою моделлю сипкого середовища може бути таке суцільне середовище, в якому відсутнє зчеплення. Така модель представляє незв'язане сипке середовище.

Якщо в моделі сипкого середовища відсутнє внутрішнє тертя, то така модель називається ідеальним пластичним середовищем.

Моделлю сипкого середовища може бути так зване зернисте середовище, тобто середовище, що складається з твердих зерен правильної форми. Але застосування такої моделі проблематичне через

відсутність розвиненого математичного апарату. У загальному випадку перевагу потрібно віддати суцільним моделям сипкого середовища.

Для моделей суцільного середовища запропоновані [149] дві умови міцності. Умова міцності Кулона-Мора яка заснована на тому, що для рівноваги сипкого середовища необхідно, щоб сила зрушення була меншою за суму сил внутрішнього тертя і зчеплення. Умова рівноваги сипкого середовища в точці має вигляд:

$$|\tau| = \sigma \tan \varphi + c, \quad (4.39)$$

де $|\tau|$ - абсолютна величина дотичного напруження; σ - нормальне напруження; φ - кут внутрішнього тертя; c - питома сила зчеплення частинок матеріалу.

Загальним критерієм міцності сипкого матеріалу прийнято вважати енергетичну гіпотезу Р.Мізеса [153], згідно якої руйнування матеріалу настає тоді, коли питома енергія, що витрачена на зміну форми тіла, досягає критичної величини:

$$\sigma_i = \tau_{cp} \tan \varphi + c, \quad (4.40)$$

де σ_i - приведені напруження; τ_{cp} - дотичне напруження; φ - кут внутрішнього тертя; c - характеристика міцності сипкого матеріалу, що визначається експериментально.

Багато вчених займалися проблемами деформації біополімерів м'яса, а до цього часу універсальної теорії не існує. На нашу думку, це пов'язано зі складністю вивчення властивостей реології реальних подрібнюваних тіл. Основними реологічними моделями, на підґрунті яких розроблені різні математичні теорії є такі: ідеально пружне середовище Гука; ідеально в'язке середовище Ньютона та ідеально пластичне середовище Сен-Венана. Для опису поведінки біополімерів м'яса при деформуванні часто ці моделі поєднують. Насправді всі природні тіла, у т.ч. і м'ясо мають всі властивості названих реологій, але, в залежності, від умов навантаження одні домінують, а тоді іншими нехтують для спрощення моделювання [154].

Друга проблема полягає у розв'язанні задачі про напружений стан сукупності матеріалу, що перебуває в робочій порожнині подрібнювача. Щоб дослідити поля напружень у матеріалі треба мати динамічні рівняння його руху. Якщо моделювати сукупність матеріалу суцільною фазою у вигляді твердого тіла то рівняння такого руху описані у багатьох літературних джерелах і тоді це питання не потребує особливого розгляду.

Розглянемо випадок представлення сукупності матеріалу суцільною моделлю сипкого середовища. Вважатимемо, що сипке тіло складається з однорідних частин, розміри яких малі порівняно з областю, що зайнята

середовищем. Між частинами тіла є внутрішнє тертя і деяке зчеплення, що характеризується критичним напруженням зчеплення k . Необхідно розглянути стан середовища після досягнення критичної рівноваги, коли в результаті її порушення частини матеріалу починають рухатися. Переміщення частин представляється таким, що відбувається за рахунок кінцевих деформацій зрушення. Тоді модель рухомого середовища можна подати у вигляді ідеальної рідини, яка має сухе тертя і зчеплення. Приймаємо, що в кожній рухомій точці середовища виконується умова критичної рівноваги:

$$\max(\tau_n - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi) = k, \quad (4.41)$$

де τ_n - дотичне напруження, що розглядається на майданчику з нормаллю \bar{n} ; σ_n - відповідне нормальне напруження; φ - кут внутрішнього тертя; k - критичне напруження зчеплення.

Для плоскої задачі маємо п'ять невідомих функцій - компонентів тензора напружень і переміщень:

$$\sigma_{xx}(x, y, t), \sigma_{yy}(x, y, t), \sigma_{xy}(x, y, t), u(x, y, t), v(x, y, t). \quad (4.42)$$

Тоді у змінних Ейлера рівняння руху для прийнятої ідеальної рідини має вигляд:

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}; \\ Y - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}, \end{cases} \quad (4.43)$$

де X, Y - проекції діючої об'ємної сили; ρ - насипна густина сипкого середовища; u, v - складові швидкостей переміщень; $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$ - складові тензора напружень.

За третє рівняння можна прийняти рівняння критичної рівноваги [149]:

$$(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2 = \sin^2 \varphi (\sigma_{xx} - \sigma_{yy} + 2k \operatorname{ctg} \varphi)^2. \quad (4.44)$$

За четверте рівняння, яке описує стан моделі матеріалу, приймаємо рівняння суцільності середовища:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (4.45)$$

П'яте рівняння впливає з умови однакового напрямку максимальних швидкостей деформацій зсуву і напрямку швидкостей ковзання [149]:

$$\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \pm \frac{\partial u}{\partial x} \operatorname{tg} \varphi}{\frac{\partial u}{\partial x} \mp \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \operatorname{tg} \varphi} \quad (4.46)$$

Вибір знаку в рівнянні (4.46) визначається активним номером сімейства ліній ковзання.

Таким чином, маємо замкнуту систему рівнянь (4.43) - (4.46) яку треба доповнити крайовими умовами, які повністю визначаються конкретною конструкцією подрібнювача.

Розв'язок задачі про напружений стан сукупності матеріалу в робочому об'ємі подрібнювача для кожної моделі середовища можна отримати чисельним методом розрахунку.

Можливість розрахунку поля напружень у робочій порожнині подрібнювача дає підхід до вирішення проблеми аналітичної інтерпретації процесу руйнування окремого шматка матеріалу на підґрунті теорії розвитку тріщин в тілі, що знаходиться під дією конкретної системи сил. При цьому руйнування твердого тіла умовно можна підрозділити на два типи: крихке і пластичне.

Підхід до вирішення проблеми розробки методів розрахунку зміни гранулометричного складу матеріалу може бути оснований на використанні напівемпіричних законів подрібнення, статистичних даних за видами машин і на розрахунковому полі діючих на матеріал сил у робочій зоні конкретного подрібнювача. При цьому порядок досліджень може бути наступним:

- за розрахунковим полем напружень і деформацій визначається енергія, що передається шматку матеріалу у конкретному подрібнювачі;
- з використанням закономірностей подрібнення, емпіричних і статичних даних визначаються особливості процесу поділу шматків на частини;
- проводяться спеціальні експерименти для уточнення закономірностей подрібнення у конкретній машині.

Оскільки параметри процесу подрібнення в першу чергу залежать від фізико-механічних і хімічних властивостей матеріалу, які у біополімерів м'яса залежать від температури, тиску, швидкості деформації та інших чинників [155], то аналітичний опис процесу можливий на основі математичної моделі, яка до певної міри їх враховує. Основним показником ефективності кінцевого результату може служити кількість енергії, витраченої на утворення одиниці площі вільної поверхні матеріалу. Крім цього показниками кінцевого результату є дисперсність і

якість продукту продуктивність процесу, інтенсивність спрацювання робочих органів тощо.

4.6. Моделі руйнування біополімерів м'яса при подрібненні

М'ясо і м'ясопродукти, які подрібнюють для отримання якісних готових виробів мають широкий спектр властивостей [154]. Кожний з матеріалів має свої особливості механічної поведінки і їх залежності від технологічних умов переробки. Разом з тим, на наш погляд, буде достатнім описати процес утворення нових поверхонь у біополімерах м'яса за крихким, високоеластичним і пластичним механізмами руйнування, що перекликається з процесами подрібнення хімічних полімерів.

Міцність крихкого матеріалу характеризується граничним напруженням крихкого руйнування $[\sigma_k]$. При досягненні таких напружень полімер руйнується миттєво за атермічним механізмом. Енергія у цьому випадку витрачається на динамічні і поверхневі втрати при розриванні жорстких зв'язків, а прирощення пружної деформації матеріалу майже відсутнє ($\frac{d\varepsilon_{np}}{d\tau} \rightarrow 0$) [156].

За термодинамічним підходом до міцності ця енергія витрачається в основному на утворення вільної поверхні [157]:

$$[w_k] = \alpha_k^S S_k, \quad (4.47)$$

де S_k - площа поверхні руйнування за крихким механізмом; α_k^S - коефіцієнт, що характеризує питому енергію утворення площі вільної поверхні при крихкому руйнуванні.

Умова міцності $\sigma \leq [\sigma_k]$ лише якісно відображає початок процесу руйнування крихкого матеріалу. Для кількісного відображення процесу руйнування використовуємо енергетичний критерій міцності Мізеса-Губера-Генкі [153], згідно з яким руйнування матеріалу настає за умови досягнення питомої енергії пружної деформації зміни форми деякого критичного значення [157]:

$$[w_k] = A_{np}^{num} = \frac{\alpha_k^S S_k}{V_{деф}}, \quad (4.48)$$

де A_{np}^{num} - питома робота пружної деформації; $\frac{\alpha_k^S S_k}{V_{деф}}$ - питома енергія, достатня для утворення вільної поверхні S_k в частині об'єму матеріалу, що деформується $V_{деф}$.

З урахуванням того, що $\frac{S_{\kappa}}{V_{def}} = S_{\kappa}^{num}$, формула (4.48) прийме вигляд:

$$[w_{\kappa}] = A_{np}^{num} = \alpha_{\kappa}^S S_{\kappa}^{num}, \quad (4.49)$$

де S_{κ}^{num} - питома площа передбачуваної поверхні руйнування.

У прогнозуванні площі S_{κ}^{num} є невизначеність, тому що в реальних матеріалах утворення тріщин відбувається по місцях ослабленої структури у напрямку головного дотичного напруження [158]. Для спрощення приймемо, що утворювана вільна поверхня є площиною, направленою в матеріалі так, що енергія $[w_{\kappa}]$ мінімальна.

Приріст питомої роботи пружної деформації зміни форми запишеться так:

$$dA_{np}^{num} = \sigma d\varepsilon_{np}. \quad (4.50)$$

Рівняння утворення вільної поверхні в умовах пружного руйнування:

$$dS_P = \frac{V_{def}}{\alpha_{\kappa}^S} dA_{np}^{num}. \quad (4.51)$$

Або

$$dS_P^{num} = \frac{dA_{np}^{num}}{\alpha_{\kappa}^S}. \quad (4.52)$$

Розв'язок рівняння (4.43) можливий за наступних початкових умов:

$$\left. \begin{aligned} A_{np}^{num} \\ S_{\kappa} = S_{\kappa 0} \end{aligned} \right| = [w_{\kappa}], \quad (4.53)$$

де $S_{\kappa 0}$ - площа руйнування в об'ємі V_{def} матеріалу до деформування (за відсутності руйнування і дефектів структури $S_{\kappa 0} = 0$).

Значення $[w_{\kappa}]$ можна визначити експериментально при випробуваннях на зріз або розтягування зразків матеріалу в умовах крихкого руйнування.

При деформуванні біополімерів м'яса у високоеластичному стані відбувається нерівномірне навантаження з наступним розриванням зв'язків. Це пов'язано перш за все нерівномірністю розподілу довжин ланцюгів макромолекул біополімеру і частоти поперечних зв'язків.

Високоеластичне руйнування призводить до утворення нової поверхні в об'ємі матеріалу, причому приріст поверхні руйнування пропорційний приросту деформації елемента матеріалу.

Припустимо, що руйнування за високоеластичним механізмом також розпочинається при досягненні напруження в матеріалі критичного

значення. Тоді умова початку високоеластичного руйнування буде такою:

$$\sigma = [\sigma_{вел}], \quad (4.54)$$

де $[\sigma_{вел}]$ - граничне напруження початку високоеластичного руйнування матеріалу.

Приріст питомої роботи:

$$dA_{вел}^{num} = [\sigma_{вел}] d\varepsilon_{вел}, \quad (4.55)$$

де $\varepsilon_{вел}$ - приріст високоеластичної деформації.

За критерієм Губера- Мізеса-Генкі, умовою початку високо еластичного руйнування буде така:

$$[w_{вел}] = \alpha_{вел}^S S_{вел}^{num} = \frac{\alpha_{вел}^S S_{вел}}{V_{деф}}, \quad (4.56)$$

де $S_{вел}^{num}$ - питома площа збільшення вільної поверхні; $\alpha_{вел}^S$ - коефіцієнт, характеризуючий питому енергію утворення площі вільної поверхні; $\frac{\alpha_{вел}^S S_{вел}}{V_{деф}}$ - питома енергія, достатня для утворення вільної поверхні $S_{вел}$

при деформуванні об'єму $V_{деф}$.

Якщо матеріал поєднує високоеластичні і пружні властивості, то руйнування за високоеластичним механізмом почнеться за умови:

$$[w_{вел}] = A_{np}^{num} + A_{вел}^{num} \quad (4.57)$$

Рівняння утворення нової поверхні для такого матеріалу:

$$dS_{вел} = \frac{V_{деф}}{\alpha_{вел}^S} d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}), \quad (4.58)$$

або

$$dS_{вел}^{num} = \frac{d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num})}{\alpha_{вел}^S}. \quad (4.59)$$

Розв'язок останнього рівняння можливий за наступних початкових умов:

$$\left. \begin{aligned} (A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}) &= [w_{вел}] \\ S_{вел}^{num} &= S_{вел0}^{num} \end{aligned} \right\} \quad (4.60)$$

де $S_{вел0}^{num}$ - площа вільної поверхні в матеріалу до деформації.

Початок руйнування біополімерів за механізмом пластичного (в'язкого) деформування розпочинається при досягненні межі пластичної деформації:

$$\sigma = [\sigma_{пл}], \quad (4.61)$$

де σ - напруження в матеріалі; $[\sigma_{nl}]$ - межа пластичності.

Приріст питомої роботи у цьому випадку:

$$dA_{nl}^{num} = [\sigma_{nl}] d\varepsilon_{nl}, \quad (4.62)$$

де ε_{nl} - деформація матеріалу за пластичним механізмом.

На відміну від крихкого і високоеластичного руйнування при пластичній деформації всередині об'єму матеріалу не утворюється нова поверхня, а відбувається відносне зміщення мікрооб'ємів, якому протидіють сили міжмолекулярної взаємодії, що супроводжується виділенням теплоти. За критерієм Губера- Мізеса-Генкі умову початку пластичної деформації можна подати так:

$$[w_{nl}] = \alpha_{nl}^S S_{nl}^{num} = \frac{\alpha_{nl}^S S_{nl}}{V_{деф}}, \quad (4.63)$$

де S_{nl}^{num} - питома площа мікрооб'ємів (молекулярного рівня); α_{nl}^S - коефіцієнт, що характеризує питому енергію утворення площі вільної поверхні; $\frac{\alpha_{nl}^S S_{nl}}{V_{деф}}$ - питома енергія, достатня для початку відносного зміщення поверхні S_{nl} при деформації об'єму матеріалу $V_{деф}$.

Якщо матеріал поєднує пластичні, високоеластичні і пружні властивості, то механізм його руйнування при критичному деформуванні буде залежати від співвідношення питомих робіт цих деформацій і умова початку пластичного деформування (якщо не відбувається крихкого руйнування) буде такою [157]:

$$[w_{nl}] = A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}. \quad (4.64)$$

Рівняння утворення вільної поверхні при пластичній деформації пластично-пружного тіла:

$$dS_{\Pi} = \frac{V_{деф}}{\alpha_S} d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}), \quad (4.65)$$

а

$$dS_{nl}^{num} = \frac{d(A_{np}^{num} + A_{вел}^{num})}{\alpha_{nl}^S}. \quad (4.66)$$

Розв'язок рівняння (4.66) можливий за початкових умов:

$$\left. \begin{aligned} (A_{np}^{num} + A_{вел}^{num}) &= [w_{nl}] \\ S_{nl}^{num} &= S_{nl0}^{num} \end{aligned} \right\} \quad (4.67)$$

де S_{nl0}^{num} - площа поверхні ковзання мікрооб'ємів у матеріалі в зоні деформації.

Наприклад, при полоскопаралельному зсуві куба дисперсного матеріалу розміром a_0 , що складається з кубічних часток розміром a_1 , площа поверхні ковзання при пластичній деформації складає:

$$S_{nl0} = a_0^2 \left(\frac{a_0}{a_1} - 1 \right). \quad (4.68)$$

Якщо $a_0 \gg a_1$, то матимемо:

$$S_{nl0}^{num} = \frac{1}{a_1}. \quad (4.69)$$

Отримані теоретичні залежності відображують в загальному вигляді процеси прирощення нової поверхні біополімерів м'яса за різних механізмів руйнування.

Розглянемо процес руйнування матеріалу який поєднує пружні, високоеластичні і пластичні властивості. Питома робота його загальної деформації A^{num} представляє суму робіт:

$$A^{num} = A_{np}^{num} + A_{вел}^{num} + A_{nl}^{num} + A_{руйн}^{num}, \quad (4.70)$$

де A_{np}^{num} , $A_{вел}^{num}$, A_{nl}^{num} - відповідно, питомі роботи пружної, високоеластичної і пластичної деформації; $A_{руйн}^{num}$ - питома робота руйнування матеріалу, що витрачається на утворення нової поверхні і включає всі види механічних втрат.

Прирощення роботи руйнування є сумою прирощень робіт, що витрачаються на утворення нових поверхонь за всіма згаданими механізмами руйнування:

$$dA_{руйн}^{num} = \alpha_S^k dS_k^{num} + \alpha_S^{вел} dS_{вел}^{num} + \alpha_S^{nl} dS_{nl}^{num}. \quad (4.71)$$

Дольова участь кожного виду руйнування залежить від властивостей біополімеру і умов його деформування:

$$dS_k^{num} = k_k dS^{num}; \quad dS_{вел}^{num} = k_{вел} dS^{num}; \quad dS_{nl}^{num} = k_{nl} dS^{num}, \quad (4.72)$$

де dS^{num} - загальне прирощення питомої площі вільної поверхні; k_k , $k_{вел}$, k_{nl} - коефіцієнти дольової участі, відповідно, крихкого, високоеластичного і пластичного руйнування в утворенні нової поверхні. Підставляючи (4.72) в (4.71) отримаємо:

$$dA_{руйн}^{num} = (\alpha_S^k k_k + \alpha_S^{вел} k_{вел} + \alpha_S^{nl} k_{nl}) dS^{num}. \quad (4.73)$$

Якщо умови змінні в процесі руйнування то рівняння (4.73) можна записати так:

$$dA_{руйн}^{num} = (\alpha_S^k dk_k + \alpha_S^{вел} dk_{вел} + \alpha_S^{nl} dk_{nl}) dS^{num}. \quad (4.74)$$

Не вирішеним є питання про граничні значення питомих енергій деформацій, при яких розпочинається процес руйнування, що входять

до початкових умов (4.53), (4.60) і (4.67). Потрібно знайти раціональний шлях для визначення їх чисельних значень, які залежать від умов виконання технологічних операцій подрібнення біополімерів м'яса.

4.7. Алгоритм пошуку ефективного способу і обладнання для подрібнення м'ясної сировини

Загальний підхід до проектування процесів подрібнення біополімерів м'яса і визначення найбільш ефективного обладнання можна подати у вигляді наступних кроків:

- Задати один або декілька критеріїв якості процесу подрібнення (розмір і форми часток фаршу, розвиненість поверхні, хімічні властивості, вологоутримуючу здатність, енерговитрати, продуктивність та ін).

- Визначитись з видом подрібнювача за розробленою класифікацією і записати у загальному вигляді рівняння кінетики прирощення поверхні руйнування;

- У відповідності з структурою матеріального потоку для конкретного подрібнювача вибрати підхід до розв'язання задач з визначення характеру взаємодії матеріалу і робочих органів машини. Для моделювання машин 1, 2, 3 типу (див. табл. 4.1) можна розглядати подрібнювальний матеріал як суцільне середовище зі зміною властивостей під дією механічних сил і температури. Для моделювання машин 4, 5, 6 типів варто застосовувати підхід, що враховує стохастичний характер взаємодії робочих органів і окремих елементів матеріалу на основі складання рівняння балансу матеріальних потоків. Моделюючи процеси подрібнення у машинах 7, 8, 9 типів доцільно розглядати перероблюваний матеріал як сипке середовище зі змінною дисперсністю в полі дії механічних сил і температур.

- Визначити показники фізико-механічних і реологічних властивостей подрібнюваної м'ясної сировини і встановити характер їх залежності від технологічних умов процесу.

- Скласти у явному вигляді та розв'язати систему рівнянь (4.37).

- Проаналізувати аналітичні залежності, що описують процес подрібнення і їх вплив на цільові функції критеріїв якості процесу.

- Знайти найбільш раціональні конструктивні і технологічні параметри процесу подрібнення біополімерів м'яса.

Таким чином, розроблена вище класифікація обладнання для механічного подрібнення біополімерів м'яса охоплює всі можливі структурні схеми потоків матеріалу і відображає кінетику перетворення його дисперсного складу.

Аналітичне ж поєднання процесів подрібнення біополімерних матеріалів доцільно здійснювати на основі розгляду сукупності

енергетичних потоків, що протікають в системі подрібнювач-матеріал. Обов'язково треба враховувати витрати механічної енергії на переміщення, деформування, руйнування матеріалу робочими органами машин, подолання сил тертя, розсіювання теплової енергії, а також оцінити вплив зовнішніх енергетичних потоків на властивості подрібнюваного матеріалу.

Аналіз енергоощадності подрібнювачів з різними структурними схемами з урахуванням класифікаційних ознак показав, що найбільш економічні машини, в яких матеріал відразу після руйнування видаляється з робочої зони. Енергозатратність на подрібнення біополімерів м'яса можна також знизити за рахунок зменшення їх межі міцності і ступеня деформування до початку руйнування завдяки цілеспрямованому впливу на його фізико-механічні властивості, наприклад, з використанням відповідної термообробки, терміну автолізу тощо.

Подану вище узагальнену математичну модель процесу механічного подрібнення біополімерних матеріалів (4.37) можна застосовувати для аналітичного опису подрібнювального обладнання, яке застосовується у м'ясопереробці.

Корисні у застосуванні також моделі процесів руйнування крихких, пластичних і високоеластичних біополімерних матеріалів, які загалом характеризують майже увесь спектр м'ясної сировини і є добрим підґрунтям для аналізу технологічних процесів і розробки раціональних конструктивних схем обладнання. Алгоритм пошуку найефективніших способів подрібнення м'яса і високопродуктивного обладнання дозволяє реалізувати переробку матеріалів з відомими властивостями при заданих вимогах до кінцевого продукту.

4.8. Синтез м'ясоподрібнювальних машин

Структура матеріальних потоків у подрібнювачі визначає його місце у класифікаційній схемі (див. табл. 4.1.). Технологічна задача, яку треба розв'язати є основою у виборі структурної схеми обладнання. Для її вирішення бажано мати повну інформацію щодо фізико-механічних і хімічних властивостей сировини, її початкових розмірів, бажаної продуктивності подрібнення, якісних показників подрібненого продукту.

Вибрана структурна схема машини прямо впливає на енергетичну ефективність процесу подрібнення і властивості отриманого продукту (розмір часток, стан поверхні, вологоутримуючу здатність, органолептичні показники, консистенцію, реологію подрібненої маси, можливість безперешкодного і раціонального застосування в операціях виготовлення готової м'ясної продукції).

Найбільш раціональними за енергетичною ефективністю є

подрібнювачі, в яких структура потоку матеріалу відповідає 1, 2 і 3 видам (див. табл. 4.1). Обладнання 1 типу раціонально використовувати для розділення на частини великогабаритних або довгомірних кусків м'яса, особливо якщо до кінцевого продукту пред'являється вимога до чітко визначених розмірів часток. Наприклад, розрізання довгомірних шматків або розрубання на частини сировини з великими розмірами.

Застосування обладнання 2-го типу доцільне якщо потрібно декілька разів застосувати схему 1-го типу і отримати частинки матеріалу дещо менших розмірів. Прикладом такого процесу подрібнення може бути багаторазове, послідовне розрубання чи розрізання шматків матеріалу, або послідовне різання довгомірних м'ясних напівфабрикатів на кількох дискових ножицях зі зменшенням кроку між ножами, або в різних напрямках руху матеріалу. Обладнання 3-го типу є найбільш енергетично ефективним при подрібненні матеріалів на дрібні фракції. Розмір часток матеріалу, які отримують при подрібненні на обладнанні 1, 2, 3 типів визначається геометричними параметрами робочих органів і є керованою величиною. Недоліком обладнання з структурними схемами 1, 2 і 3 є той, що розміри відходів матеріалів, які підлягають подрібненню, повинні відповідати певним вимогам: бути довгомірними при різанні дисковими ножицями, подібними за формою при розрубанні, або мати певний середній розмір при подрібненні, наприклад, у вовчку.

Машини для подрібнення з дифузійною схемою матеріального потоку 4, 5, 6 типів (див. табл. 4.1), хоча і є менш енергетично вигідними, але при їх застосуванні особливі вимоги до розмірів подрібнюваних шматків майже відсутні. Застосування подрібнювачів з структурною схемою 4, 5 і 6 доцільне для отримання часток матеріалу з певним розкидом середнього розміру і форми заготовок, що мають обмеження тільки за максимальним розміром, що відповідає типорозміру обладнання. Зі збільшенням кратності механічної дії n на такому обладнанні можна отримувати частки матеріалів менших розмірів.

Обладнанню 7, 8 і 9 типів притаманна найменша енергетична ефективність. Це зумовлено багаторазовими механічними діями на матеріал, які не всі призводять до руйнування, а інтенсивність механічної дії зменшується по мірі зменшення розмірів частинок матеріалу. Розмір частинок кінцевого продукту визначається, в першу чергу, часом перебування матеріалу в робочій зоні. Разом з тим, таке обладнання ефективно, якщо треба досягти дуже малих розмірів частинок матеріалу навіть за підвищених енерговитрат.

Аналітичний аналіз запропонованих структурних схем подрібнення дозволяє синтезувати машини для подрібнення біополімерів м'яса.

Розділ 5. Вплив технологічних середовищ на спрацювання м'ясоподрібнювальних машин

5.1. Показники надійності м'ясоподрібнювальних інструментів

Стабільне виконання поставлених перед м'ясопереробною промисловістю завдань здебільшого залежить від надійності та довговічності технологічного обладнання. Наприклад, через недостатню стійкість ріжучих інструментів вовчків і кутерів порушується ритм виробництва, погіршується якість фаршу та збільшуються енергетичні затрати [159].

Аналітичний огляд виконаних досліджень показав, що на сьогоднішній день майже відсутні дані про причини виходу з ладу різального інструменту м'ясоподрібнювальних машин, немає обґрунтувань щодо використання для його виготовлення матеріалів, відсутні статистичні та експериментальні дані, які дозволяють визначити основні причини швидкого виходу інструментів з ладу [137, 159].

Виконаний нами протягом 2011 р. аналіз працездатності м'ясорізального інструменту у вовчках на 10-ти м'ясопереробних підприємствах м. Києва показав, що для виготовлення ножів і ґраток не визначені не тільки конкретні марки сталей, захисних покриттів, методи їх зміцнення, але не визначені навіть групи придатних сталей, а тому ножі і ґратки вовчків виготовляються на підприємствах з любых сталей – від конструкційних до високолегованих інструментальних. В нормативній документації на інструменти обумовлена лише твердість ножів (52HRCe) і ґраток (61HRCe). Обумовлюється також нормативний термін служби – 200 год, який на жодному з обстежених підприємств не досягається.

М'ясопереробне обладнання випускається малими серіями, що приводить до застосування широкої номенклатури ножів і ґраток. Тільки на м'ясопереробних підприємствах Києва застосовують більше 25-ти типорозмірів м'ясопереробних інструментів з 11-ти марок сталей, які мають різний строк служби. З великої кількості ножів, заміненних у групі обстежених великих і малих м'ясопереробних підприємств більша частина випала на інструментальну вуглецеву сталь У8А та загалом на інструментальні сталі – 1709 ножів. Друга за чисельністю група – це леговані сталі, які мають у своєму складі 0,4% мас. вуглецю і сталі, леговані до 13% хромом та нікелем (табл. 5.1).

Гарантований термін служби м'ясоподрібнювальних інструментів вовчків повинен становити 200 год, у т.ч. до наступного заточування – 24 год. За результатами проведеного нами дослідження строк служби ножів не перевищував 168 год, а середній термін їх безперервної роботи обмежувався 13,8 год. Середньорічна потреба у ножах на обстежених

підприємствах коливалась в межах від 45 до 110 шт., в залежності від типу обладнання і ступеня його завантаження.

Таблиця 5.1 – Показники експлуатаційної надійності м'ясорізальних ножів вовчків із різних марок сталей

Марка сталі	Кількість заміненних ножів за 2011р., шт.	Відсоток від загальної кількості ножів, які витримали нормативний строк служби (+) і були зняті достроково (-)		Середній термін служби ножів, год
		«+»	«-»	
У8А	792	26,5	73,5	166,2
ХВГ	465	24,8	75,2	165,3
95Х18Л	451	54,3	45,7	162,2
40Х2НЛ	147	31,3	68,7	168,8
40ХНЛ	113	45,1	54,9	171,0
40Х13	119	52,9	47,1	180,6
65Г	51	66,7	33,3	178,2

Було встановлено, що відсутня єдина концепція, обґрунтовуюча використання тих чи інших марок сталей для виготовлення ножів. Наприклад, ножі, виготовлені з вуглецевих інструментальних сталей, були замінені через прискорений знос різальних лез, хоча високий вміст вуглецю мав би забезпечити їх належну твердість і зносостійкість. Не покращились суттєво експлуатаційні характеристики ножів з високим вмістом хрому. Не забезпечило також належного підвищення зносостійкості і економне легування сталей (табл. 5.1). Очевидно, причину швидкого зношування сталей необхідно шукати не лише у доцільному виборі легуючих елементів, але також у особливих властивостях м'ясної сировини, дія якої на різальні інструменти майже не досліджена.

5.2. Обґрунтування основ забезпечення довговічності подрібнювальних машин

Корозійно-активні середовища (КАС) м'ясопереробних виробництв, діючи на деталі обладнання, зокрема на подрібнювальні інструменти, спричиняють надзвичайно швидке їх спрацювання, що впливає на ритмічність роботи підприємств завдає їм великих економічних збитків та погіршує якість харчової продукції [161].

Була поставлена мета дослідити вплив КАС в м'ясоподрібнювальних машинах на субмікроструктуру і зносостійкість поверхонь твердих тіл (інструментів) при їх терті і деформуванні і, на цьому підґрунті, дати науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору

сталей і способів їх зміцнення для досягнення високого опору спрацюванню різальних інструментів.

5.2.1. Методика досліджень, використані матеріали і установки

Плівки вторинних структур, бар'єрні і сорбовані шари на металах, що у подавляючій більшості випадків вирішально впливають на характер деформування і руйнування поверхонь тертя різальних інструментів, мають напівпровідникові властивості [162-165], причому багато оксидів мають ГЦК структуру, як і монокристали кремнію та фториду літію [189], які були використані в дослідженнях.

Для цих матеріалів, як і для інших твердих тіл подібної кристалічної структури, характерні найбільші значення напружень Пайєрлса-Набарро та енергії дефектів упаковки [166,167]. Таким чином при їх використанні практично виключається вплив границь зерен, випадкових деформацій і релаксації дислокаційної структури після розвантаження зразків.

Перед випробуванням зразки монокристалів кремнію і фториду літію полірували алмазними пастами і оксидами хрому до $Ra=0,08...0,16$ мкм, відпалювали, відповідно, при $1100^{\circ}C$ протягом 10-ти год. і при $500^{\circ}C$ протягом 6-ти год., а потім піддавали хімічному поліруванню для повного зняття наклепаного шару. Вихідна щільність дислокацій в монокристалах не перевищувала 10^3 см⁻². У всіх описаних випадках субмікροструктуру деформованої зони виявляли селективним травленням на дислокації [168,169]. Монокристали фториду літію були вибрані для досліджень завдяки простоті їх обробки і доброму виявленню дислокацій методом хімічного травлення.

Для створення напруженого стану зразки монокристалів перед дослідом стискали в струбціні у напрямках {100} і {010}. Зусилля стискання контролювали тензOMETричним методом. У такому стані монокристали деформували в мікροтрибOMETрі, описаному нижче, по свіжосколотих площинах {001}, паралельно і перпендикулярно до стискаючих напружень. У першому випадку дотичні (стискаючі, розтягуючі) і нормальні напруження, у напрямку прикладення попередніх стискаючих напружень, обумовлюють плоско-напружений стан деформованої зони. У другому випадку ці зусилля діють у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, створюючи нерівномірний об'ємно-напружений стан поверхневого шару зразків. Експерименти проводили при стискаючих напруженнях, відповідаючих середині першої ділянки залежності «напруження-деформація» монокристалів фториду літію (1,92 МПа) поблизу критичного зсувного напруження (4,1 МПа) [170]. Вибір цих значень пояснюється тим, що деформація в межах першої ділянки деформаційної кривої мало залежить від стану поверхні монокристала. У цьому випадку щільність дислокацій пропорційна

прикладеному напруженню. Деформація при напруженнях, відповідаючи другій ділянці кривої, залежить від умов на поверхні, а дислокації вихідної структури майже не впливають на її характер [170,171].

Досліди проводили при терті індентора по зразку без змащування, у дистильованій воді (рН 7,0), яка є основою у хімічному складі м'яса, а також у м'ясному соку, відпресованому з одного зразка мускульної тканини парної телятини 2-ї категорії через 2 години після забою (рН 7,4) і через 240 годин (після повного завершення автолізу при температурі 0°C) (рН 5,5) [172]. Перед використанням у дослідях м'ясний сік піддавали трьохразовому фільтруванню через бельтингову тканину і попередньо промитий та калібрований на ситах річний пісок.

Хімічний склад м'яса (табл. 5.2) і кислотно-лужний баланс (рН) м'ясного соку був визначений в Українській лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України.

Робочі рідини заливались в електрохімічну комірку дослідної установки (мікротрибомера) відразу після приготування і набрання ними температури 18-20°C (кімнатної, яка регулювалась кондиціонером).

На мікротрибометрі [173], сконструйованому О.Є. Новицьким і М.А. Сологубом (НУХТ), було проведене вивчення впливу властивостей м'ясного соку, природи і структури монокристалічних і полікристалічних матеріалів, їх плоско- та об'ємно-напруженого стану на механо-фізичні і електрохімічні процеси при терті ковзання, а також на дислокаційну структуру деформованої зони (рис. 5.1). В конструкції приладу передбачене мінімальне тепловиділення на ковзаючому контакті та виключення впливу реологічних властивостей робочих середовищ за рахунок дуже малої швидкості відносного переміщення поверхонь, які труться, і точкової схеми фрикційного контакту.

Таблиця 5.2 – Хімічний і вітамінний склад телятини 2-ї категорії на 100 г. продукту

Вода, г	Білки, г	Жири, г	Зола, г	Na,мг	K,мг	Ca,мг	Mg,мг	P,мг	Fe,мг	B1,мг	B2,мг	PP,мг	A	C
78,0	20,4	0,9	1,1	112	357	13	25	213	3	0,15	0,24	6,0	Сл.	Сл.

Мікротрибометр (рис. 5.1,а) включає електрохімічну комірку, змонтовану на предметному столику 1, навантажувальні вузли, системи вимірювання сили тертя та електродних потенціалів зразків і привід, які об'єднані на загальній основі 4 [173].

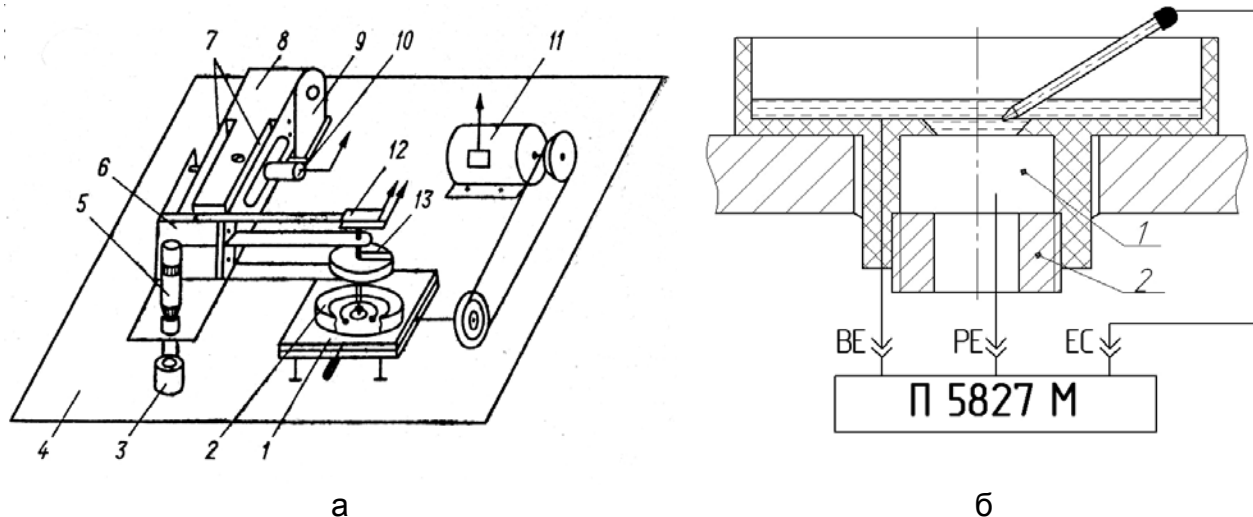


Рис. 5.1 – Мікротрибометр: а – принципова схема, б – електрохімічна комірка.

У наскрізьному отворі столика, встановленого на трьох опорах закріплена електрохімічна комірка 2 з діелектричного матеріалу (органічного скла). Переміщення столика разом з коміркою здійснюється за допомогою електродвигуна РД-09 та пасової передачі. Навантажувальні вузли розташовані на важелі 8, зв'язаному шарніром зі стійкою 9. На важелі 8 закріплені плоско-паралельні пружні пластини 7 і стандартний мікрометричний гвинт 5, який упирається вимірювальною площиною на кульку, розміщену в корпусі 3. На кінцях пружин 7 закріплена траверса з навантажувальним вузлом 13, за конструкцією аналогічним навантажувальним вузлом серійного мікротвердоміра ПМТ-3. Закріплений на важелі 8 індуктивний датчик 10 служить вимірювачем тангенційного зусилля. На навантажувальному вузлі 13 встановлені дві пластини 12, які забезпечують для вимірювання глибини впровадження індентора ємнісним способом за допомогою моста типу Р5010. Конструкцією приладу передбачене використання конічних, кулькових і пірамідальних інденторів. Величина тангенційного зусилля фіксується з використанням індуктивного датчика і самозаписуючої системи 212 заводу «Калібр» (Росія).

Випробовуваний циліндричний зразок 1 (рис. 5.1,б) фіксується гвинтом 2 у електрохімічній комірці зі збереженням горизонтального розташування досліджуваної поверхні, а отвір у дні комірки забезпечує постійний його контакт з робочою рідиною.

Електрохімічні процеси при терті і деформуванні індентором зразка досліджувались за допомогою електрода порівняння ЕП, допоміжного платиного електрода ДП і робочого електрода РЕ (досліджуваний зразок 1), які були підключені до потенціостата П5827М [159].

В якості контртіла (КТ) був використаний сферичний індентор із сталі ШХ15 (HRC_e 62) КТ-1,5 з радіусом 1,5 мм і конічний індентор КТ-0,1 з твердого сплаву ВК6 з радіусом при вершині 0,1 мм. При терті індентор притискався до зразка з зусиллям, пропорційним установленому на ньому вантажу. Максимальна чутливість схем з тензопідсилювачем 8АНЧ-4м та осцилографом Н-700 складала 1,2 сН/мм, а з мілівольтметром РЗ9–4 мН/мм при відносній похибці вимірювання, відповідно, 8 і 6%. Швидкість відносного переміщення контактуючих поверхонь складала 5×10^{-4} м/с. Для створення напруженого стану зразки перед дослідом стискали в струбцині.

Відомо чимало методів виявлення тонкої структури кристалів [168,174]. При їх порівнянні стає зрозумілим, що дозволяюча здатність фігур травлення у 3-8 разів вища, ніж при застосуванні інфрачервоної мікроскопії, рентгенографії, авторадіографії. В результаті визначення максимально можливої щільності дислокацій виявилось, що найбільш досконалими є метод фігур травлення і просвічувальна електронна мікроскопія, але остання має ряд недоліків, які знижують її можливості та цінність. До цих недоліків відноситься релаксація напружень, перерозподіл і анігіляція дислокацій в процесі виготовлення тонких фольг, складність проведення досліджень. Виявлення дислокацій селективним травленням не має цих недоліків. Простота і доступність, висока дозволяюча здатність і точність, можливість проводити спостереження безпосередньо на масивних зразках була беззаперечним аргументом на користь вибору цього метода досліджень.

Для вивчення дислокаційної структури в монокристалах кремнію були застосовані реактиви СР-4А і Деша, а для хімічного полірування зразків – реактив Сіртла [174]. Монокристали фториду літію хімічно травили в 10%-ному розчині хлоридного заліза. Для отримання недеформованих поверхонь їх розколювали при температурі рідкого азоту.

Щільність дислокацій на досліджуваних поверхнях монокристалів розраховували за співвідношенням:

$$N_d = \frac{n_{cp} \cdot M^2}{S_M}, \quad (5.1)$$

де N_d - щільність дислокацій, см⁻²;

n_{cp} - середня кількість ямок травлення на матовому склі приладу (фотографії);

M - збільшення приладу;

S_M - площа матового скла приладу (фотографії), см²

Вимірювання шорсткості зразків виконували на подвійному мікроскопі МИС-11 і профілографі-профімометрі мод.201 заводу «Калібр» (Росія). Їх твердість визначали на твердомірах ТШ-2 і ТК.

Інтенсивність процесів зміцнення деталей вузлів тертя і механічні властивості оксидів оцінювали за величиною мікротвердості, яку вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 на поверхні зразків, скошених шліфах і темплетях. Перед кожного серією дослідів мікротвердомір юстували на монокристалах хлористого натрію. Мікротвердість конструкційних та інструментальних сталей визначали на структурних складових.

Глибину зміцненого шару визначали за методом П.Є. Дяченка [175]:

$$h = k \cdot P_{,**} \quad (5.2)$$

де h - глибина зміцненого шару, мкм;

k - емпіричний коефіцієнт;

P - навантаження, відповідає точці перегину кривої «навантаження-мікротвердість», сН.

$$k = 0,17 \cdot \operatorname{tg} \alpha H_{СК} , \quad (5.3)$$

де α - кут при вершині алмазної піраміди (136°);

$H_{СК}$ – середньоквадратична шорсткість поверхні, мкм.

Вплив КАС на розвиток пружньо-пластичних деформацій у сталях при терті ковзання визначали методом фотопружності на зразках із відпаленої сталі 65Г, яка є перспективною для виготовлення м'ясорізальних інструментів, за методикою П.В. Назаренка [181]. Досліди проводили при терті без змащування, у дистильованій воді, а також у кислому рН 5,5 і лужному 7,4 середовищах м'ясного соку при відносній швидкості ковзання 2×10^{-3} м/с і нормальному навантаженні на зразки 60Н на лабораторній установці (рис. 5.2), побудованій на базі металографічного мікроскопа МИМ-7, в якій передбачена можливість зміни у широких межах тиску на фрикційному контакті, а також реєстрації сили тертя тензометричним методом.

** Формулу можна застосовувати при шорсткості поверхні від $R_a=0,016$ мкм до $R_a=10$ мкм.

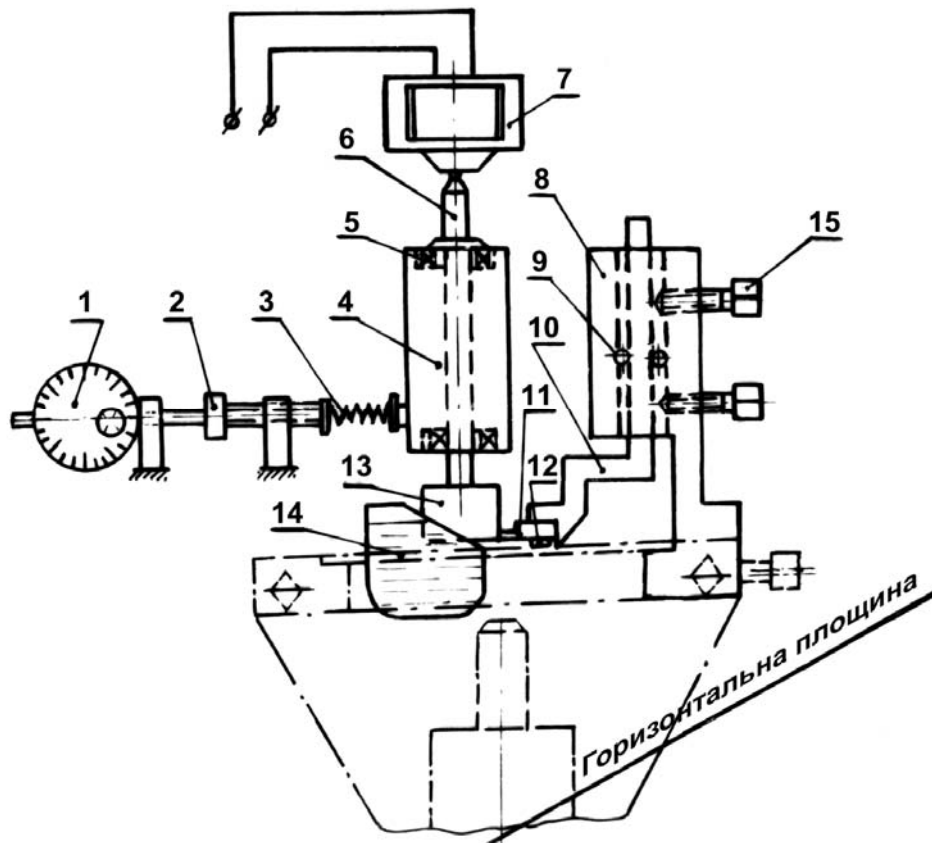


Рис. 5.2 – Схема установки для визначення пружно-пластичних деформацій в металах поляризаційно-оптичним методом в умовах тертя ковзання.

Циліндричне контртіло 13 діаметром 20 мм було виготовлене зі сталі ШХ15 (HRCe 60-62). Призматичні зразки зі сталі 65Г (5x10x20 мм) і товщиною в зоні тертя 0,5 мм, закріплялись гвинтами 12 в утримувачі 10, який, разом зі стійкою 8, може здійснювати в профільній площині зворотно-коливальний рух навколо горизонтальної вісі. Обертання утримувача у напрямку обертання контртіла обмежує тензобалка, величина прогину якої пропорційна силі тертя.

5.2.2. Вплив м'ясних середовищ на дислокаційну структуру твердих тіл

При терті ковзання металів у (КАС), в результаті сорбційних та електрохімічних процесів, на їх поверхнях утворюються адсорбовані шари і плівки вторинних структур, властивості яких залежать від хімічного складу і рН робочих середовищ, природи і структури металів, умов роботи вузлів тертя. Вони в значній мірі визначають характер зношування спряжених поверхонь [176,177]. Сорбційні та електрохімічні процеси змінюють фізико-хімічні властивості і тонку структуру твердих тіл, викликаючи додатковий потік дислокацій до поверхні внаслідок

зниження поверхневого потенціального бар'єру за рахунок енергії реакції (хемомеханічний ефект) [178]. Вид руйнувань матеріалів залежить від величини і характеру напружень в них. Наприклад, відомо, що при всебічному нерівномірному стисканні в залежності від величини головних напружень матеріал може знаходитися пластичному, крихкому чи перехідному стані [179]. Під впливом напружень значно прискорюється взаємодія металів з середовищем, що в свою чергу, полегшує процеси деформації (механіко-хімічний і адсорбційно-механічний ефекти) [180]. Багаточисельні і зазвичай взаємопов'язані форми впливу середовища на механічні властивості твердих тіл залежать від ряду чинників, з яких можна виділити основні: хімічний склад і рН робочих середовищ; електрохімічні властивості твердих тіл в конкретному середовищі, їх атомна будова і структура дефектів в об'ємі і на поверхні; умови деформування і їх вплив на електрохімічні властивості і структуру дефектів в тілах.

Для визначення впливу рН м'ясного соку на дислокаційну структуру поверхонь тертя експерименти проводили на монокристалах фториду літію при терті без змащування, у воді та у м'ясному соку з рН 5,5 та 7,4. Такі водневі показники соку характерні для яловичого м'яза за різних термінів автолізу. Кристали деформували на мікротрибометрі індентором КТ-1,5 при навантаженні 0,3 Н.

При терті без змащування на деформованих кристалах чітко виділяються лінії ковзання, утворені крайовими дислокаціями (рис. 5.3,а1) і розташовані у напрямку легкого ковзання $\{110\}$ для даної сингонії. Їх довжина значно більша за половину ширини сліду індентора на поверхні зразка, а відстань між ними повторюється досить регулярно. На доріжці тертя, перпендикулярно до напрямку ковзання, спостерігати виступи (валки), що періодично повторюються.

Характер розташування ліній ковзання і валків на поверхні тертя свідчить про циклічність процесів і відповідному розповсюдженні пружно-пластичних хвиль напружень у зразках [180,181]. В перетині, перпендикулярному до ліній ковзання, в результаті взаємодії і виникнення нових дислокацій утворюється зона суцільних дислокацій. Максимальна її ширина знаходиться у приповерхневому шарі на глибині близько 50 мкм (рис. 5.3,а2). Поза цією зоною дислокації шикуються у лінії, орієнтовані у напрямку легкого ковзання $\{110\}$.

При терті у воді ширина деформованої зони більша, а нерівноважна концентрація дислокацій менша майже у 14 разів у порівнянні з тертям без змащування (рис. 5.4). При цьому довжина ліній ковзання і відстань між ними набагато менша і повторюються вони менш регулярно (рис. 5.3, б1). Крім того, у воді об'єм деформованої зони менший, а найбільша

її ширина знаходиться значно ближче до поверхні (на відстані 3-4 мкм від неї), ніж при терті без змащування (рис. 5.3,б2).

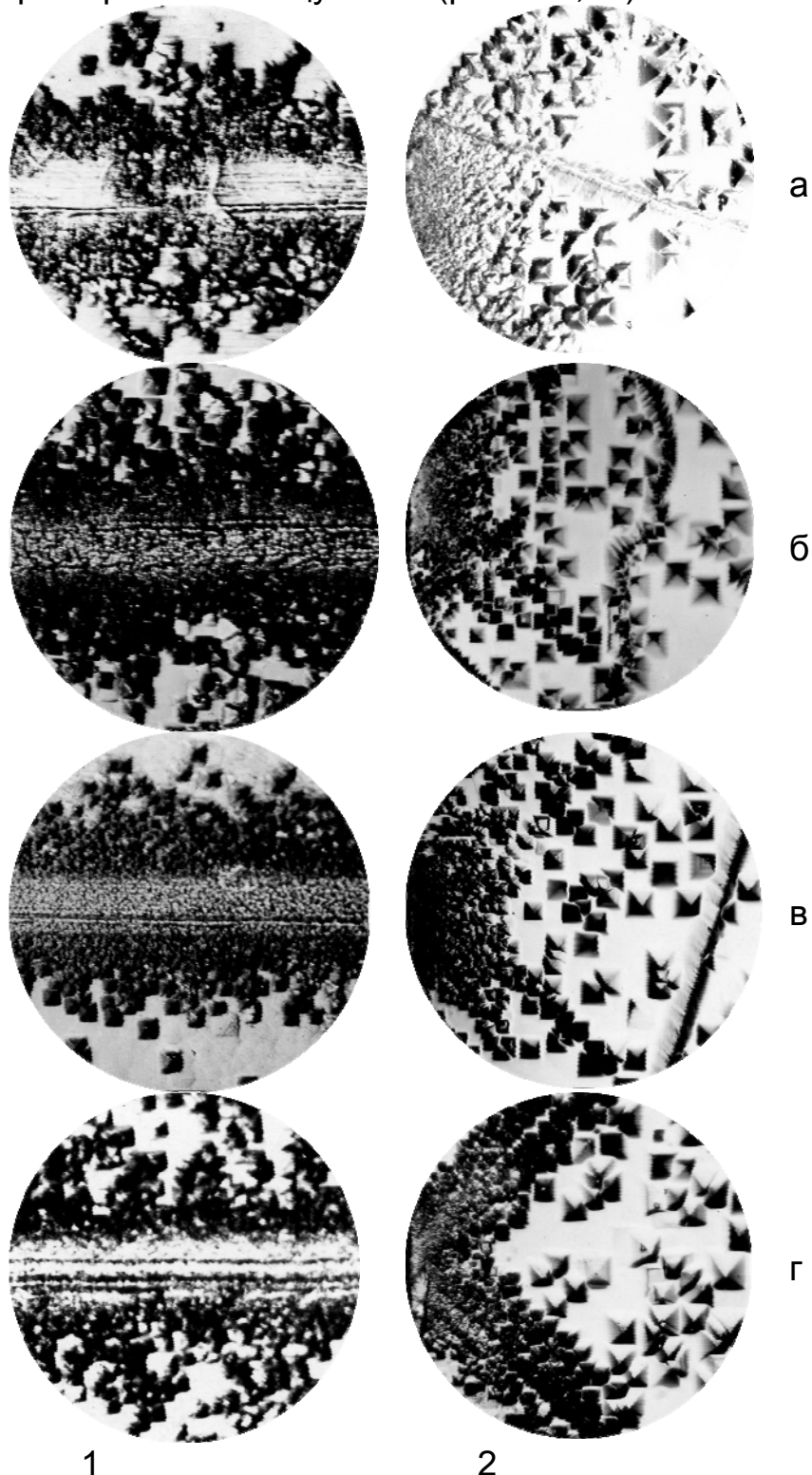


Рис. 5.3 – Дислокаційна структура поверхонь тертя (1) і по глибині деформованої зони (2) в монокристалах фториду літію при терті без змащування (а), в дистильованій воді (б), кислому рН 5,5 (в) і лужному рН 7,4 (2) м'ясних соках

При терті у кислому м'ясному соку з рН 5,5 лінії ковзання на поверхні зразків ледве помітні. Зона деформацій має виразну межу, густина дислокацій у ній надзвичайно висока (рис. 5.3, в1). Ширина цієї зони така ж, як і при терті без змащування (рис. 5.3, б2).

Зі збільшенням рН соку з 5,5 до 7,4 ширина деформованої зони збільшується у 2 рази, а локальна концентрація дислокацій зменшується майже у 18 разів (рис. 5.4). В лужному середовищі поверхня зразків пластифікована на значній площі, а межа деформованої зони майже не вирізняється (рис. 5.3,г1). Глибина цієї зони невелика (рис. 5.3, г2).

При терті дільниці фактичного контакту поверхонь – це джерела хвиль механічних напружень. В результаті фотон-електронної взаємодії енергія хвиль напружень частково передається елементарним носіям зарядів, що призводить до їх зміщення у напрямку розповсюдження хвиль і виникнення електричного струму (акусто-електричний ефект). Густина цього струму, наприклад, за інтенсивності хвиль від 10^{-3} до 10 Вт/см² в натрії складала від 0,6 до 600 А/см² [182]. Оpubліковані дослідження свідчать, що електричний струм може помітно впливати на напруження старту і усталену швидкість руху дислокацій [183]. Тому є підстави вважати, що при терті без змащування рух дислокацій відбувається не лише під впливом механічних напружень, але також під впливом електричних струмів, виникаючих при деформації твердих тіл.

В рідких середовищах змінюються пружні характеристики фрикційного контакту. У всіх досліджених нами випадках тертя в КАС зсувні процеси локалізуються у більш тонких поверхневих шарах порівняно з тертям без змащування (рис. 5.3...рис. 5.6). Плівки вторинних структур і адсорбовані чи бар'єрні шари по-різному впливають на поверхневу міцність матеріалів. В одних випадках вони знижують поверхневу енергію та зменшують приведену критичне зсувне напруження, збільшуючи тим самим швидкість деформації твердих тіл. При цьому робочі поверхні пластифіковані на значній площині, а нерівноважна концентрація дислокацій на них невелика.

Такі ефекти спостерігаються при терті у м'ясному соку з лужною реакцією. Ймовірно, у цьому випадку структура плівки і матричного матеріалу когерентні. Якщо плівка і матеріал підкладки мають різні параметри ґратки і структуру, то сітка дислокацій невідповідності гальмує роботу підповерхневих джерел і є перепорою виходу і розрядженою на поверхні рухомих дислокацій, збільшуючи межу текучості матеріалу [170]. В результаті на поверхнях тертя виникає висока локальна концентрація деформацій, яка може призвести до окрихчування поверхневого шару і утворення у цьому тріщин [176]. Це спостерігається на поверхнях тертя у кислому м'ясному соку, де надзвичайно висока

нерівноважна концентрація дислокацій є причиною їх крихкого руйнування.

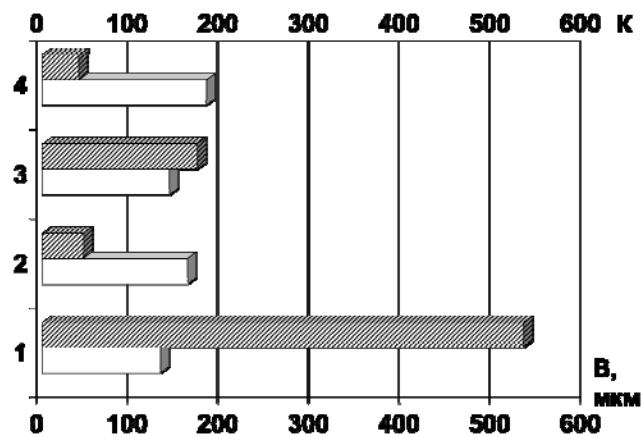


Рис. 5.4 – Залежність ширини деформованої зони В (не заштриховано) і нерівноважної концентрації дислокацій К (заштриховано) в монокристалах фториду літію при терті без змащування (1), в дистильованій воді (2), кислому рН 5,5 (3) і лужному рН 7,4 (4) м'ясних соках

Для перевірки адекватності впливу КАС на монокристали і полікристалічні тіла визначали розвиток пластичної деформації при терті ковзання у відпаленій сталі 65Г, з якої часто виготовляють м'ясоподрібнювальні інструменти. Вплив КАС на розвиток пружньо-пластичних деформацій сталі 65Г при терті ковзання визначали методом фотопружності [181] по методиці П.В. Назаренка. З приведеного на рис. 6 графіка видно, що величина відносної деформації поверхонь збільшується, а глибина її розповсюдження зменшується при підвищенні рН м'ясного соку. Ці величини максимальні при терті без змащування. Аналогічно змінюються коефіцієнти тертя (табл. 5.3).

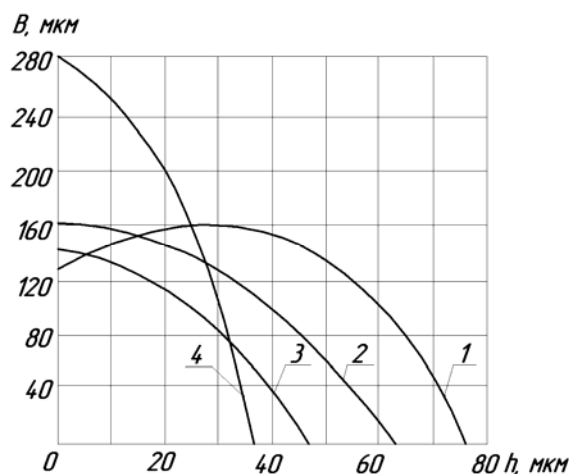


Рис. 5.5 – Вплив умов тертя на ширину В і глибину h деформованої зони в монокристалах фториду літію при випробуваннях без змащування (1), в дистильованій воді (2), кислому рН 5,5 (3) і лужному рН 7,4 (4) м'ясних соках

При співставленні графіків на рис. 5.5 і 5.6 видно, що приведені на них залежності якісно подібні. Глибина зони суцільних дислокацій і її ширина в деформованих монокристалах відповідає глибині деформованої зони і відносної деформації поверхонь тертя зразків із сталі 65Г. Ці дані свідчать про можливість кореляції параметрів процесів деформування монокристалів і полікристалічних тіл.

Узагальнюючи викладене можна констатувати, що характер руйнування поверхонь тертя в КАС різний і залежить від їх властивостей. В кислому середовищі м'ясного соку реалізується крихке руйнування, а у лужному м'ясному соку – в'язке руйнування або диспергування [183]. Локалізація зсувних деформацій у лужному м'ясному соку призводить до зменшення тангенційних зусиль, які обумовлюють цю деформацію. Тому сила тертя у такому середовищі менша за силу тертя у кислих середовищах.

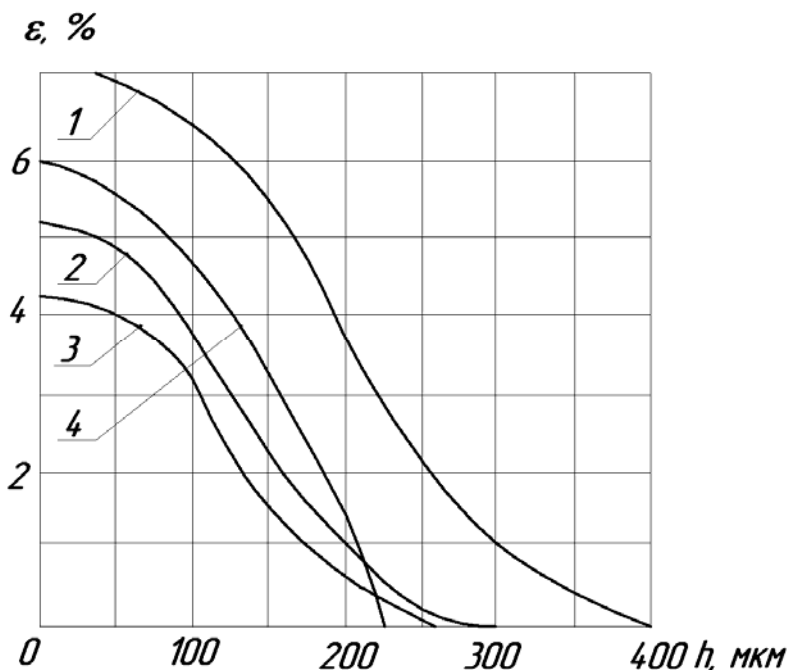


Рис. 5.6 – Залежність відносної деформації ϵ і глибини деформованої зони h сталі 65Г (НВ 2,5 Гпа) від умов на фрикційному контакті (позначення на рис. 5.5)

Таблиця 5.3 – Вплив робочих середовищ на коефіцієнти тертя

Умови випробувань	Коефіцієнт тертя
Без змащування	0,43
У дистильованій воді	0,30
У кислому м'ясному соку	0,22
У лужному м'ясному соку	0,18

Відомо, що можливість схоплювання визначається імовірністю контакту ювенільних поверхонь і активністю дислокацій, які на них виходять (величиною енергії, акумульованої кристалічною ґраткою) [184]. У зв'язку з цим вантажопідіймальність вузлів тертя має бути меншою в кислих середовищах.

Вплив корозійно-активних середовищ на дислокаційну структуру деформованих поверхонь різний і залежить від властивостей середовищ, характеру і рівня напружень у зразках.

При терті у дистильованій воді з підвищенням стискаючих напружень збільшується щільність дислокацій і ширина деформованої зони в плоско-напружених зразках (рис. 5.7,1). Лінії ковзання розташовані вздовж доріжки тертя у напрямку $\{110\}$ на досить рівній відстані одна від однієї. В об'ємно-напружених зразках ширина деформованої зони більша, але помітно нижча нерівноважна концентрація дислокацій K (рис. 5.8):

$$K = N_d / N_c, \quad (5.4)$$

де N_d - щільність дислокацій у деформованій зоні, см^{-2}

N_c - щільність дислокацій по вільному полю, см^{-2} .

У кислому середовищі зі збільшенням напружень ширина деформованої зони стає більшою, особливо в об'ємно - напружених зразках. На поверхнях монокристалів, випробуваних на першому рівні напружень, в плоско напруженому стані, видно пошкрябини, розташовані у напрямку руху індентора (рис. 5.7,2). В об'ємно-напружених зразках, випробуваних на другому рівні напружень, на доріжці тертя під кутом $100-110^\circ$ до напрямку ковзання утворюються тріщини, довжина яких більша за ширину сліду індентора. У цьому випадку нерівноважна концентрація дислокацій у деформованій зоні приблизно в 4 рази більша, ніж при випробуваннях плоско-напружених кристалів (рис. 5.8).

У лужному м'ясному соку збільшення стискаючих напружень сприяє зменшенню нерівноважної концентрації дислокацій на поверхнях тертя і незначному збільшенню ширини деформованої зони (рис. 5.8). Аналогічно змінюється характер деформації робочих поверхонь зразків при переході від плоского до об'ємно-напруженого стану (рис. 5.7,3). Тут також очевидне пластичне відтискання матеріалу на доріжці тертя і висока густина полос ковзання. Відомо, що ступінь пластифікування поверхонь твердих тіл визначається кутом повороту блоків, величина якого обернено пропорційна відстані між дислокаціями вздовж меж блоків [185].

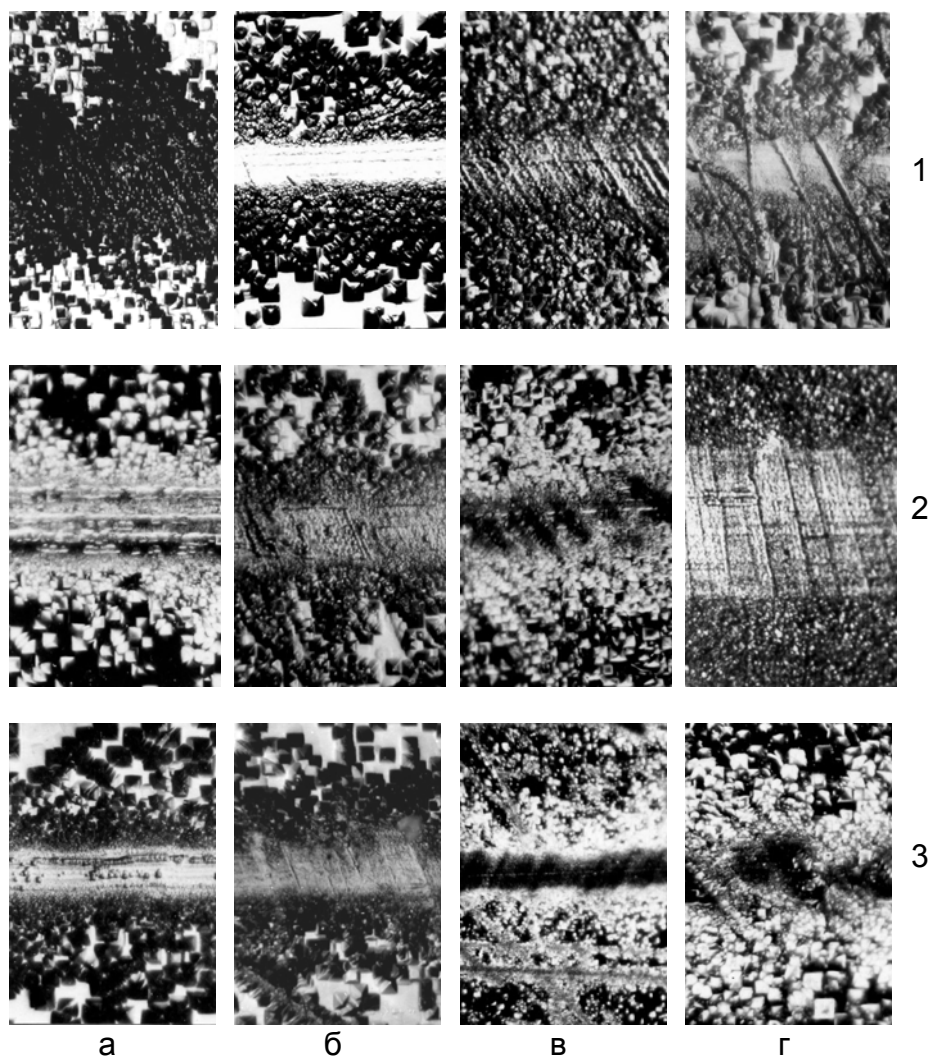


Рис. 5.7 – Дислокаційна структура робочих поверхонь монокристалів фториду літію при терті в плоско- (а,в) і об'ємно-напруженому стані (б,г) на першому (а,б) і другому (в,г) рівні напружень в дистильованій воді (1), кислому рН 5,5 (2) і лужному рН 7,4 (3) м'ясному соку

В кислому м'ясному соку при переході від плоского до об'ємного напруженого стану, а також при збільшенні рівня стискаючих напружень відбувається окрихчування поверхонь тертя і утворення на них тріщин. У відповідності з моделлю Зінера-Стро [185] деформація у твердому тілі локалізується у полосах ковзання, які грають роль в'язких включень у пружній матриці. У кислому м'ясному соку висока локальна концентрація напружень головних діляниць полос ковзання не сприяє відновленню ковзання, а викликає втрату стійкості кристалічної ґратки монокристалів. Причиною цього, ймовірно, є блокуючий вплив на тонку структуру зразків хемосорбованих і оксидних плівок. У цьому середовищі виникає сама висока зі всіх розглянутих випадків локальна концентрація дислокацій.

На першому рівні напружень вона більша, ніж при терті у лужному м'ясному соку, у 5 разів, а на другому рівні напружень – в 11 разів.

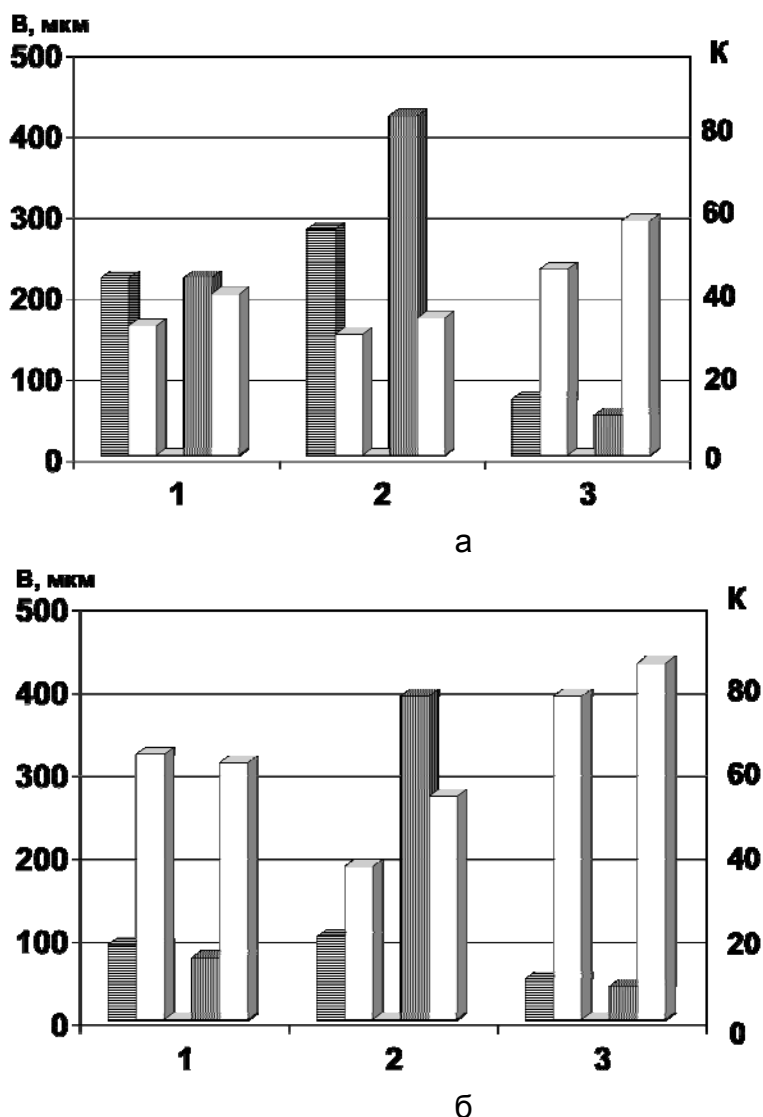


Рис. 5.8 - Ширина деформованої зони в (не заштриховано) і нерівноважна концентрація дислокацій K (заштриховано) при терті монокристалів фториду літію в плоско - (горизонтальні штрихи) і об'ємно-напруженому стані (вертикальні штрихи) на першому (а) і другому (б) рівні напружень у дистильованій воді (1), кислому рН 5,5 (2) і лужному рН 7,4 (3) м'ясному соку

Висока щільність дислокацій на поверхнях монокристалів у лужному м'ясному соку, очевидно, є наслідком зниження їх енергії активації. Утворювані на поверхні сорбовані шари і вторинні структури не є перепорою для виходу і розрядження дислокацій. У цьому середовищі поверхні зразків пластифіковані настільки інтенсивно, що на їх стан впливає не характер стискаючих напружень, а лише їх величина.

З аналізу впливу КАС на субмікроструктуру зразків виходить, що для зменшення крихкого руйнування поверхонь тертя різальних інструментів м'ясоподрібнювальних машин в кислих м'ясних соках необхідно використовувати матеріали з мінімальним рівнем напружень у кристалічній ґратці. Це, наприклад, нормалізовані або покращені сталі. У лужних середовищах поверхневі шари металів повинні мати підвищену твердість зі значними макро- і мікронапруженнями, що може змінити їх спрацювання в результаті диспергування. Для цього можна використати хіміко-термічну обробку, термо- і електромеханічне зміцнення, наклепування, обробку на білий шар тощо [179].

Прийнято вважати, що стійкість різального інструменту корелює зі зносостійкістю інструментального матеріалу. Тому для виготовлення інструментів, подрібнюючих м'ясну сировину з лужною реакцією, можна рекомендувати тверді і навіть крихкі матеріали і покриття, а у разі обробки сировини з кислою реакцією – матеріали в'язкі і пластичні. З урахуванням того, що м'ясна сировина в залежності від терміну автолізу може бути у кислому, лужному і нейтральному стані та може перероблятися на одній і тій же м'ясорізальній машині, то підібрати сталь, яка б мала одночасно високий рівень твердості і пластичності, або забезпечити такі властивості за рахунок її термічної обробки досить важко. У цьому випадку перспективними можуть бути захисні зносостійкі евтектичні покриття на різальних інструментах, нанесені з використанням концентрованих джерел енергії [190], вакуумні іонно-плазмові покриття дискретного типу (острівні, мозаїчні, перфоровані, стільникові) [191] та інші покриття, які, завдяки своїй конструкції, поєднують у властивостях твердість, пластичність і корозієстійкість у лужних, нейтральних і кислих середовищах та високу зносостійкість при терті.

Механізм корозійно-механічного зношування у м'ясному соку також може бути уточнений завдяки виконаним експериментам.

Адсорбовані і бар'єрні шари, а також оксидні плівки (за нашими та іншими багато чисельними дослідженнями) підвищують енергію активації незалежно від типу кристалічної ґратки матеріалів, збільшують межу їх текучості [185]. Пояснюють це явище заліковуванням субмікроскопічних тріщин за допомогою оксидів, аналогічно тому, як це відбувається з кам'яною сіллю у воді (ефект А.Ф. Йоффе), утрудненням виходу дислокацій на поверхню і блокуванням поверхневих джерел Франка-Ріда і Фішера, обмеженим ковзанням по границях кристала [186].

Ще в тридцятих роках минулого століття були виявлені напівпровідникові властивості оксидів перехідних металів. Дослідженнями підтверджено, що в подавляючій більшості випадків поверхневі шари і оксидні плівки на металах є напівпровідниками з

власною або примісною провідністю. У зв'язку з цим для розуміння і подальшого вивчення корозійно-механічного зношування металів можуть бути використані закономірності фізико-хімії поверхні напівпровідників [162].

Загальною властивістю оксидів є відхилення їх складу від стехіометрії. Ступінь цього відхилення (переважає в гратці надлишковий метал чи кисень, характеризується оксид електронною або дірковою провідністю) визначає його реакційну здатність. Іншими словами, кінетика електродних реакцій на окиснених металах залежить від концентрації заряду в оксиді і пов'язана з процесами перенесення через нього заряду і речовини [188].

Різноманітні речовини, які входять до складу м'яса, адсорбовані поверхнею окиснених металів, відіграють в тонкому поверхневому шарі таку ж роль донорів або акцепторів, як і штучно впроваджені у напівпровідники елементи. В цьому друге можливе проявлення впливу хімічного складу і рН м'ясного соку на поверхневу міцність металів.

Наслідком адсорбції є зарядження поверхні і виникнення у при поверхневому шарі твердого тіла об'ємного заряду, за знаком протилежного заряду поверхні і його компенсуючого. У цьому випадку виникає велика напруженість електричного поля, яка може досягати 10МВ/см [183]. По мірі збільшення товщини оксиду градієнт електричного поля і тунельний потік електронів через нього зменшується, що викликає зміну сорбційних і каталітичних властивостей поверхні.

Характер зв'язку води, яка присутня завжди у випробуваних м'ясних соках, з поверхнею металу залежить не лише від природи цього металу, але також і від природи електроліту, зокрема від його кислотно-лужного балансу рН. Енергія зв'язку води з електролітом визначається величиною стаціонарного потенціалу в даному електроліті по відношенню до його нульової точки [189]. В хемосорбованому шарі вона може бути більшою або меншою за енергії ювенільних поверхонь металів. У першому випадку твердість поверхні збільшується і можливе її окрихчування в процесі деформації, а в другому – має місце хемосорбційне пластифікування поверхні. Виявлене нами експериментально крихке руйнування поверхонь тертя зразків у кислому м'ясному соку і характер дислокаційної структури деформованої зони дає підставу вважати, що у цьому середовищі поверхнева енергія збільшується. Тому вихід дислокацій, генерованих при деформації гетерогенними джерелами та джерелами Фішера затруднений. Установлено, що поблизу поверхні деформованих зразків утворюється шар з підвищеною щільністю дислокацій (debris-шар), який є перепорою для виходу полос ковзання на поверхню кристала і гальмом для розвитку об'ємної деформації [166]. В кислому м'ясному соці збільшення

бар'єрної дії поверхні на дислокації є, на нашу думку, причиною утворення підповерхневих тріщин, які починаються в debris-шарі.

В лужному середовищі умови деформування поблизу поверхні полегшені. Адсорбування ОН-іонів знижує поверхневу енергію зразків і створює тим самим сприятливі умови для виходу і розрядження дислокацій. Пластифікування поверхонь кристалів, викликане дією цього середовища, зменшує величину активаційного об'єму і сприяє локалізації деформації в тонких поверхневих шарах.

Більшість відомих моделей використовують уявлення про те, що крихкому руйнуванню твердих тіл передують пластична деформація [185,186]. Це значить, що взаємодія дислокацій відповідальна за утворення зародків тріщин. За допомогою критерію Ешелбі-Франка-Набарро [185] можна оцінити імовірність руйнування монокристалів фториду літію. Гранична щільність дислокацій визначається з умови формування тріщин:

$$n \cdot \tau > \frac{12 \cdot \alpha \cdot G}{1 + \nu}, \quad (5.5)$$

де n - кількість дислокацій у скопиченні;

τ - напруження зсуву;

G - модуль зсуву;

ν - коефіцієнт Пуассона.

Після підстановки відповідних значень отримаємо $n = (300 \div 800) \text{ см}^{-2}$. Розрахована гранична щільність дислокацій наближена до експериментально отриманих значень після випробування зразків у кислому м'ясному соку. З викладеного вище видно, що у лужному м'ясному соку напруження, що викликають крихке руйнування зразків значно вищі, ніж у кислому. Таким чином, в одних випадках під впливом КАС спостерігається зміцнення робочих поверхонь деталей машин і обладнання (блокування дислокацій і дислокаційних джерел), а в інших – полегшення їх деформування.

Підсумовуючи викладені результати досліджень можна зробити наступні висновки:

- М'ясні соки, незалежно від їх кислотно-лужного балансу (величини рН) сприяють локалізації деформації у більш тонких поверхневих шарах твердих тіл у порівнянні з тертям без змащування.
- Підвищення рН м'ясних середовищ з 5,5 до 7,4 викликає збільшення відносної деформації робочих поверхонь твердих тіл і зменшення глибини деформаційної зони.
- В кислому м'ясному соку висока локальна концентрація дислокацій призводить до крихкого руйнування м'ясоподрібнювальних інструментів. М'ясний сік з лужною реакцією викликає адсорбційне

- пластифікування, а при деформуванні – диспергування їх робочих поверхонь.
- В кислому середовищі перехід від плоского до об'ємно-напруженого стану та збільшення рівня стискаючих напружень інтенсифікує крихке руйнування поверхонь тертя і тріщиноутворення на них. У лужному середовищі м'ясного соку на субмікроструктуру поверхонь твердих тіл впливає на характер, а величина стискаючих напружень.
 - Дислокаційна структура деформованих поверхонь і характер їх руйнування свідчить, що в кислому середовищі поверхнева енергія більша, ніж у лужному.
 - Вплив КАС на поверхневу міцність твердих тіл проявляється у зміні їх поверхневої енергії і перерозподіл і дисипативних складових енергії деформації, викликаному сорбційними процесами і окиснюванням.
 - Перспективними для зміцнення м'ясоподрібнювальних інструментів можуть бути зносостійкі евтектичні покриття та покриття дискретного типу, які дозволяють забезпечити поєднання необхідної міцності і пластичності, що дозволяє отримати задовільну зносостійкість інструментів при переробці м'ясної сировини з різним терміном автолізу.

5.2.3. Електричне зарядження деталей м'ясоподрібнювальних машин як засіб підвищення опору спрацюванню

Робочі середовища м'ясопереробних виробництв, як правило, є електролітами і, при їх контакті з металами, розвиваються електрохімічні корозійні процеси, які інтенсифікуються в процесі тертя. В роботі [192] автором цієї роботи був досліджений вплив корозійно активних середовищ на субмікроструктури і зносостійкість твердих тіл у м'ясному соку і розроблені рекомендації щодо вибору сталей та способів їх зміцнення для досягнення високого опору спрацюванню м'ясорізальних інструментів.

Деталі м'ясорізальних машин і середовища, в яких вони працюють, є фізичними об'єктами, а тому їх взаємодію треба пояснювати як матеріальні зв'язки між атомами і молекулами. Рух цих мікрочастинок, складаючи основу мікросистем, має свою специфіку і підлягає законам квантової механіки. Тертя – це проявлення електромагнітної взаємодії мікрочастинок і, перш за все електронів атомів і молекул, з яких складаються деталі середовища. Характерною особливістю цього процесу є та, що під дією сили тертя проходить зміна відстані між взаємодіючими атомами і молекулами об'єктів спочатку в сторону зменшення. Досягнувши деякої мінімальної відстані ці частинки роз'єднуються [193]. В ідеальному випадку всі взаємодіючі частинки

повинні були б зайняти ті свої місця, які вони займали до взаємодії. В реальних об'єктах такого, як правило, не буває. В металах, з яких виготовляються деталі і, зокрема, м'ясорізальні інструменти, присутня пружня і пластична деформації, а якщо до них приєднати дефектність кристалічних ґраток, то все це стає передумовою виникнення дислокацій та їх бар'єрів.

Очевидно, що на тертя та зношування деталей м'ясорізальних машин повинні впливати м'ясні середовища – електроліти, що нівелюють взаємодію молекул, атомів і електронів цих об'єктів [193]. Дослідження цих процесів є актуальною науковою і практичною задачею, розв'язання якої дасть можливість підвищити довговічність подрібнювального обладнання м'ясопереробної галузі.

Нижче наведені результати дослідження впливу електрохімічних процесів і поляризації на поверхневу міцність твердих тіл з метою прогнозування зносостійкості конструкційних та інструментальних матеріалів у м'ясних середовищах з кислотою і лужною реакцією і застосування результатів для підвищення опору спрацюванню деталей подрібнювальних машин.

Вплив технологічних середовищ на механічні характеристики твердих тіл проявляється через утворення на поверхнях тертя поверхневих плівок і вторинних структур, які можуть відігравати двояку роль [194]. Тонкі, міцні та еластичні сприяють підвищенню антифрикційних властивостей поверхонь тертя. Більш товсті і тверді викликають збільшення сили тертя, напружень і деформацій в матеріалі підкладки. Робота поверхневого руйнування матеріалів при терті може змінюватись на 1-3 порядки в залежності від типу вторинних структур [195].

Експериментально встановлена залежність механічних властивостей металів в електролітах від величини їх електродних потенціалів [195,196]. Відомо, що електрохімічна поляризація твердих тіл змінює кінетику електродних процесів та властивості адсорбованих шарів і окислів [197]. Змінюючи вільну поверхневу енергію електродів в результаті зміни донорно-акцепторної взаємодії на межі фаз, поляризація впливає на інтенсивність накопичення дефектів в деформованих матеріалах [198]. У зв'язку з цим було запропоновано використати електрохімічну поляризацію для регулювання поверхневої міцності матеріалів при терті в корозійно-активних середовищах (КАС) [199].

Залежність дислокаційної структури поверхонь тертя від електродних потенціалів досліджували на зразках монокристалів кремнію, які поміщали в електрохімічну комірку. Досліди проводили при терті сферичних інденторів КТ-0,1 і КТ1,5 по зразку без змащування, а

також у м'ясному соку, відпресованому з одного зразка мускульної тканини парної телятини 2-ї категорії через 2 години після забою (рН 7,4) і після завершення автолізу через 240 годин (рН 5,5). Методика проведення досліджень викладена вище.

Прийнято вважати, що пластична деформація крихких напівпровідникових матеріалів неможлива за температури нижче $\sim 700^{\circ}\text{C}$ – порога пластичності [200]. При терті без змащування з високими локальними тисками індентором КТ-0,1 поверхня піддається мікропластичній деформації навіть при кімнатній температурі (рис. 5.9), що обумовлено, ймовірно, можливістю квантово-механічного просочування дислокацій через потенційний рельєф ґратки [201].

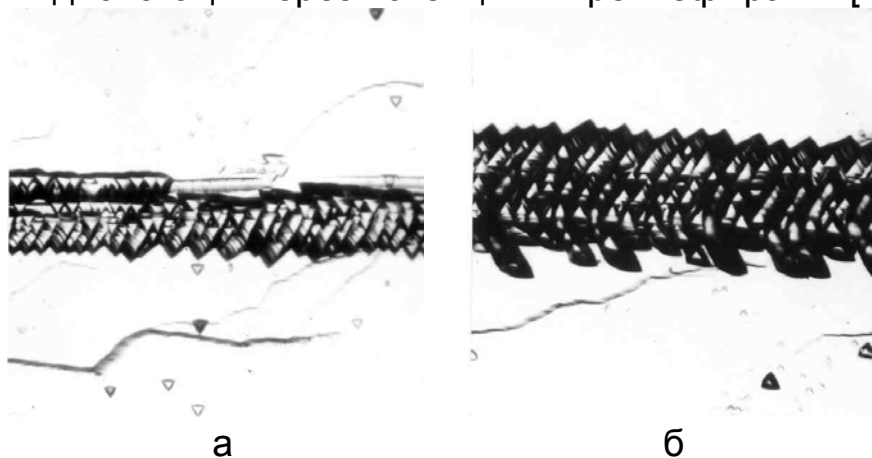


Рис. 5.9 – Дислокаційна структура деформованої зони монокристалів кремнію при терті без змащування індентором КТ-0,1 і навантаженні 1 (а) та 2Н (б)

При пропусканні через фрикційний контакт постійного струму, негативний полюс джерела якого підключений до зразка, дещо збільшується сила тертя, зменшується ширина деформованої зони і майже втричі збільшується щільність дислокацій (рис. 5.10). При позитивному заряджуванні монокристалу характер деформування поверхонь тертя змінюється. Очевидно, у першому випадку, негативний заряд зменшує роботу виходу дислокацій завдяки дії на електростатичний бар'єр на між фазній межі а інтенсифікує хемосорбційні процеси, а у другому випадку, завдяки позитивному зарядженню зразка, його адсорбційна здатність до кисню зростає, що ще більше стабілізує пасивний стан поверхні [202].

В кислому м'ясному соку (рН 5,5) на поверхнях тертя монокристалів виникають окремі виразки неоднорідної пластичної деформації з високою щільністю дислокацій (рис. 5.12), які є зародками крихких тріщин і сколів, що утворюються при наступних навантаженнях. Сила тертя і ширина деформованої зони більші, а середня щільність дислокацій в ній

майже у 25 разів менша у порівнянні з тертям без змащування (рис. 5.11).

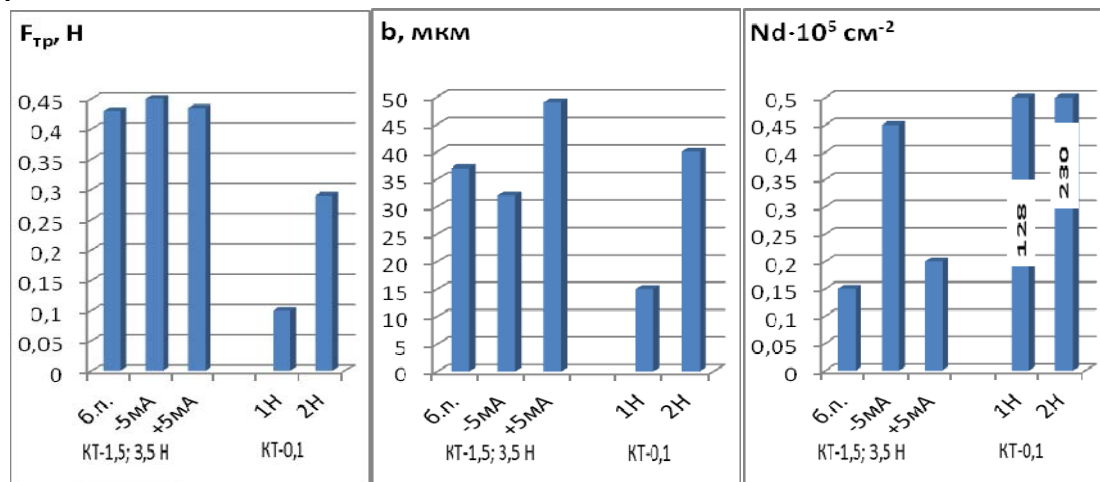


Рис. 5.10 – Сила тертя $F_{тр}$, ширина b і щільність дислокацій N_d деформованої зони монокристалів кремнію в залежності від величини струму (індентор КТ-1,5) і навантаження на фрикційному контакті при терті без змащування

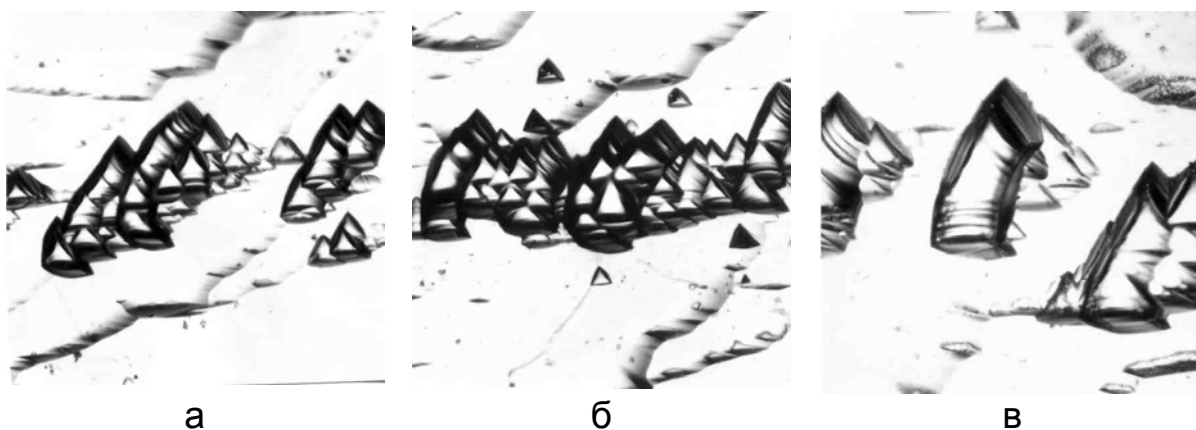


Рис. 5.11 – Дислокаційна структура деформованої зони монокристалів кремнію при терті в м'ясному соку з рН 5,5 без поляризації (а), з поляризацією потенціалом -6В (б) і +6В (в); $\times 340$

Катодна поляризація в цьому середовищі сприяє порушенню пасивного стану зразків. Утворені в цих умовах оксидні шари на поверхні зразків можуть виконувати функції гетерогенних джерел дислокацій, діючих за менших навантажень, ніж гомогенні джерела всередині кристала [201]. Цим можна пояснити полегшення умов деформації, що проявляється у зменшенні сил тертя, збільшенні ширини деформованої зони і щільності в ній дислокацій у порівнянні з тертям без поляризації (рис. 5.11,б і рис. 5.12).

Анодна поляризація збільшує дифузію кисню до поверхні зразка та сприяє потовщенню оксидної плівки. Одночасно дислокації блокуються киснем та підсилюється бар'єрний вплив на них оксидної плівки. Хоча середня щільність дислокацій на доріжці тертя менша, ніж у попередніх випадках, деформаційна гетерогенність поверхні набагато більша. Значно підвищується локальна концентрація напружень, що сприяє утворенню в приповерхневих шарах дислокаційних ансамблів граничної щільності, що збільшує вірогідність крихкого руйнування (див. рис. 5.12,в). Пасивуюча плівка, на нашу думку, є фазовою по відношенню до підкладки і відрізняється від неї параметрами ґратки та величиною мікронапружень [203].

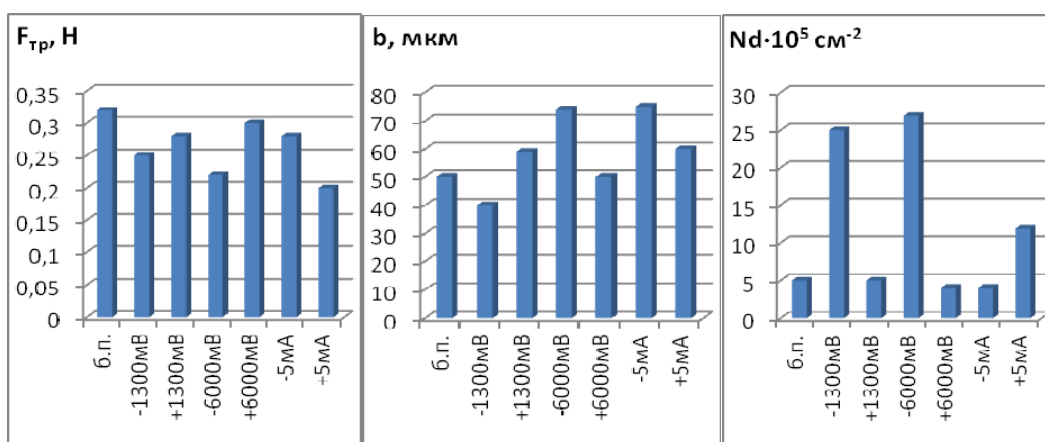


Рис. 5.12 – Вплив поляризації у м'ясному соку з рН 5,5 на силу тертя $F_{тр}$, ширину b і щільність дислокацій N_d деформованої зони монокристалів кремнію

В лужному середовищі кремній схильний до саморозчинення, в процесі якого знижується локальна концентрація напружень на його поверхні (стравлювання сходинок і тріщин). Його деформація у цьому середовищі викликає пластичну течію тонких поверхневих шарів у зоні фрикційного контакту. Доріжка тертя суцільна і рівна (рис. 5.13,а), сила тертя менша, а щільність дислокацій в деформованій зоні більша, ніж при випробуванні в кислому м'ясному соку (рис. 5.14).

Отримання екіпотенціальних поверхонь при катодній поляризації в лужному м'ясному соку зменшує швидкість анодної реакції і сприяє утворенню екрануючої плівки на поверхні монокристала. Деякі дислокації в деформованій зоні рухаються майже паралельно поверхні (рис. 5.13,б), а відстані пройдені ними, зменшуються майже на порядок при видаденні поверхневого шару завтовшки близько 2 мкм.

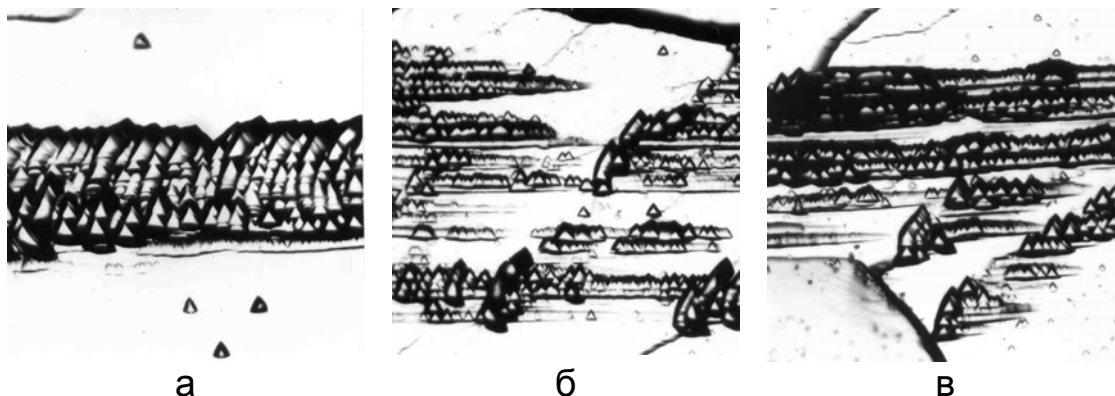


Рис. 5.13 – Дислокаційна структура деформованої зони монокристалів кремнію при терті у лужному (рН 7,4) м'ясному соку без поляризації (а), і при поляризації потенціалом -6В (б) і +6В (в); $\times 340$

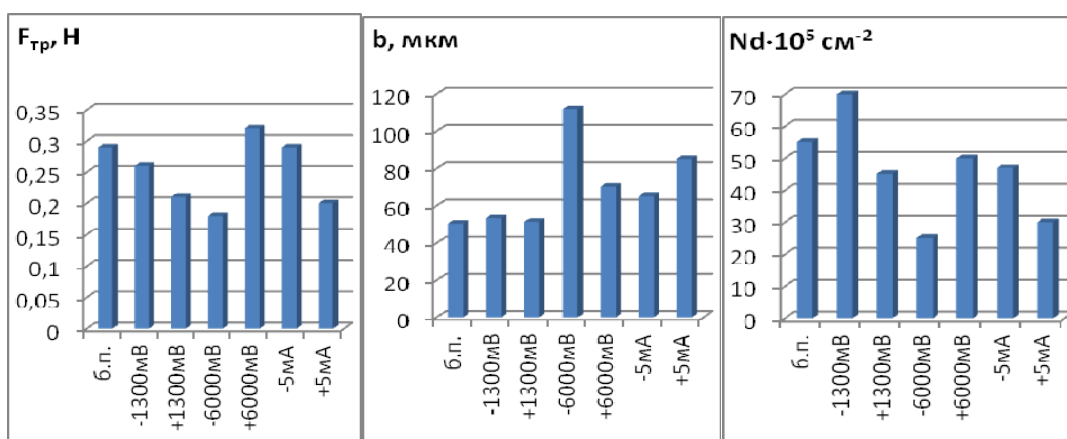


Рис. 5.14 – Вплив поляризації в лужному (рН 7,4) м'ясному соку на силу тертя $F_{тр}$, ширину b і щільність дислокацій N_d деформованої зони монокристалів кремнію

На цій підставі можна вважати, що катодна поляризація знижує поверхневу енергію зразків і полегшує, тим самим, рух і розрядження дислокацій у тонкому поверхневому шарі. При зміщенні електродних потенціалів у негативну область сила тертя і щільність дислокацій у деформованій зоні зменшується і при потенціалі -6В указані параметри приймають екстремальне значення (рис. 5.14). Одночасно монотонно зменшується густина корозійного струму, що свідчить про покращення екрануючих властивостей поверхневих плівок. Вигляд субмікроструктури поверхонь тертя дозволяє стверджувати, що оксиди не є перепорою руху і розрядженню дислокацій. Це стає можливим при когерентності структур плівок і підкладки і свідчить про те, що в цьому випадку поверхневі плівки є псевдоаморфними по відношенню до матеріалу підкладки [196]. Маючи високу пластичність вони збільшують площу контакту спряжених

тіл та зменшують концентрацію мікронапружень у зоні деформації. Навантаження робочих поверхонь може відбуватись за рахунок сил контактного тертя, виникаючих при осадженні і розтіканні вторинних структур [201]. При цьому зсувні деформації локалізуються в поверхневих шарах, а руйнування поверхонь тертя відбувається в результаті диспергування.

Анодне розчинення кремнію в лужному м'ясному соку знижує бар'єрну дію на дислокації зміцненого поверхневого шару (рис. 5.13,в), але пластифікування поверхні монокристалів за рахунок зменшення енергії активації дислокацій менше, ніж у попередньому випадку. Поляризація потенціалом +1,3В сприяє зменшенню указаних вище параметрів, а подальше облагороджування потенціалу до +6В – їх збільшенню (див. рис. 5.14).

Приведені у цій роботі дані якісно подібні результатам, поданим у роботі [192]. Слабокислий м'ясний сік підвищує схильність зразків до крихкого руйнування, а сік з лужною реакцією, полегшуючи генерацію і рух дислокацій, обумовлює в'язке руйнування або диспергування поверхні при терті.

Оцінюючи властивості використаних нами м'ясних соків їх можна розділити за ознакою взаємодії з зразками таким чином: сік, в якому зразки не розчиняються – слабокислий; сік, в якому зразки добре розчиняються слабколужний.

З урахуванням такого поділу можна зробити наступні важливі висновки.

Анодна поляризація в нерозчиняючому середовищі знижує пластичні властивості зразків і сприяє збільшенню напружень в приповерхневих шарах (ефекти Роско і Баррета). В розчиняючому матеріалі середовищі позитивне зарядження полегшує деформацію його поверхні (ефекти Іоффе та Евальда-Поляні).

Катодна поляризація в розчиняючих і нерозчиняючих середовищах зменшує поверхневу енергію твердих тіл, прискорює їх взаємодію з середовищем і, тим самим, полегшує деформацію поверхні.

Таким чином, експериментальні дослідження підтвердили можливість застосування електрохімічної поляризації для управління механізмом деформування твердих тіл в КАС. Щільність дислокацій N_d є функцією прикладених деформацій ε і визначається кількістю діючих джерел ковзання m , кожне з яких генерує n петель при заданому рівні напружень τ [201]. Тому вплив поляризації на тонку структуру поверхонь тертя можна пояснити зміною енергії активації дислокацій та активаційного об'єму.

При електрохімічній поляризації в КАС на електродах виділяється водень і кисень. Перший, відновлюючи поверхневий оксид, може

проникати в поверхневі шари електрода і, тим самим, викликати втрату його пластичності і крихке руйнування [205]. Вірогідно, кисень, дифундуючи у кристалічну ґратку, також впливає на кінетику процесів деформації і руйнування металів.

В спеціально поставленому експерименті вивчали вплив водню і кисню на субмікроструктури монокристалів кремнію у кислому і лужному м'ясних соках. Зразки частково занурювали в рідке середовище для того, щоб диференціювати дію цих газів в об'ємі рідини і над її поверхнею. Потенціали поляризації відповідали далеким анодним і катодним областям (більше зворотнього потенціалу кисневого електрода і менше зворотнього потенціалу водневого електрода) і забезпечували отримання густини струму на зразках $75\text{mA}/\text{cm}^2$.

Наводнювання твердих тіл у м'ясних соках – електролітах пояснюється тим, що у воді (основі електроліту) водень практично не розчиняється. Водень, що виділяється на катоді відновлює оксиди, забезпечуючи тим самим можливість дифузії в поверхневі шари електрода. В слабо кислому м'ясному соку в результаті наводнювання відбувається достатньо рівномірне по всій поверхні зразка підвищення щільності дислокацій до її граничного значення 108 cm^{-2} (рис. 5.15,а2). В парях кислого м'ясного середовища водень розташовується по межах блоків монокристала, підвищуючи залишкові напруження другого роду і викликаючи утворення трьохвимірних дислокаційних сіток (рис. 5.15, а1). Тут особливо чіткий вплив водню як стимулятора крихкого руйнування. Відомо, що пластична деформація в кристалічній ґратці твердих тіл естафетно передається через малокутові межі [205]. Тому збільшення блокомежних напружень буде підвищувати вірогідність руйнування сколом.

У лужному м'ясному соку катодна поляризація викликає розвиток волокнистої дислокаційної структури на поверхні електрода (рис.5.15, а2). Дислокації розташовуються вздовж ліній росту монокристала, що є місцем сегрегації домішок. Хоча і в цьому середовищі під впливом водню також підвищується щільність лінійних дефектів ґратки, але вона на тричотири порядки менша, ніж в кислому м'ясному соку.

Над рідиною інший характер взаємодії водню з кремнієм. Очевидні ямки травлення вздовж сліду дислокацій, що рухаються майже паралельно поверхні зразка (рис. 5.16, а1). Це свідчить про значне зменшення його поверхневої енергії. Таким чином, в парях лужного середовища процеси сорбції водню викликають пластифікування поверхні монокристалів. Ефект протилежний тому, який спостерігався у кислому м'ясному соку і його парях.

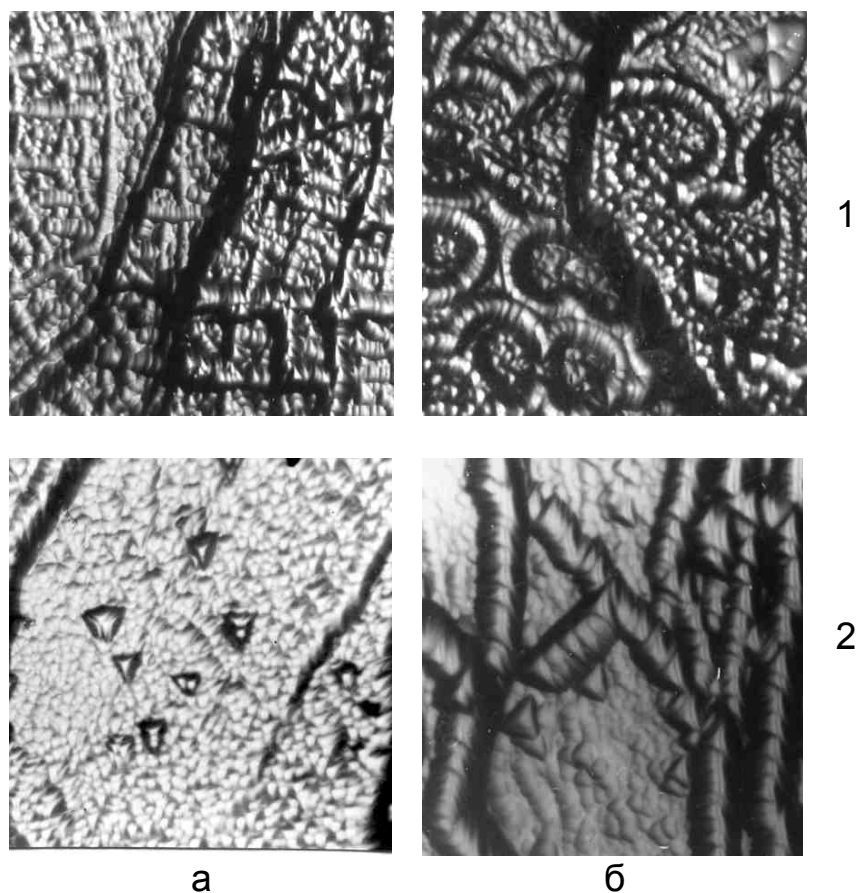


Рис. 5.15 – Дислокаційна структура монокристалів кремнію після катодної (а, $\times 200$) і анодної (б, $\times 340$) поляризації у кислому м'ясному соку (рН 5,5): поверхні над соком (1) і в соку (2)

Кисень сприяє крихкому руйнуванню монокристалів в парах кислого м'ясного соку і, в меншій мірі, – в парах лужного м'ясного соку. У лужному середовищі кисень зменшує вірогідність такого руйнування.

При різних видах навантаження деформація твердих тіл починається з поверхні і далі передається в глибинні шари матеріалу. Тому електричне зарядження металів в КАС може бути використане не лише для підвищення надійності і довговічності вузлів тертя технологічного обладнання м'ясопереробних підприємств але і в процесах лезової обробки м'яса.

Для виготовлення деталей м'ясоподрібнювальних машин застосовують чорні і кольорові сплави. Одним з простих способів підвищення їх довговічності в КАС є вибір електрорушійної сили внутрішньої поляризації за рахунок застосування матеріалів з відповідними електрохімічними властивостями. Ця задача може бути розв'язана з використанням конструктивних заходів.

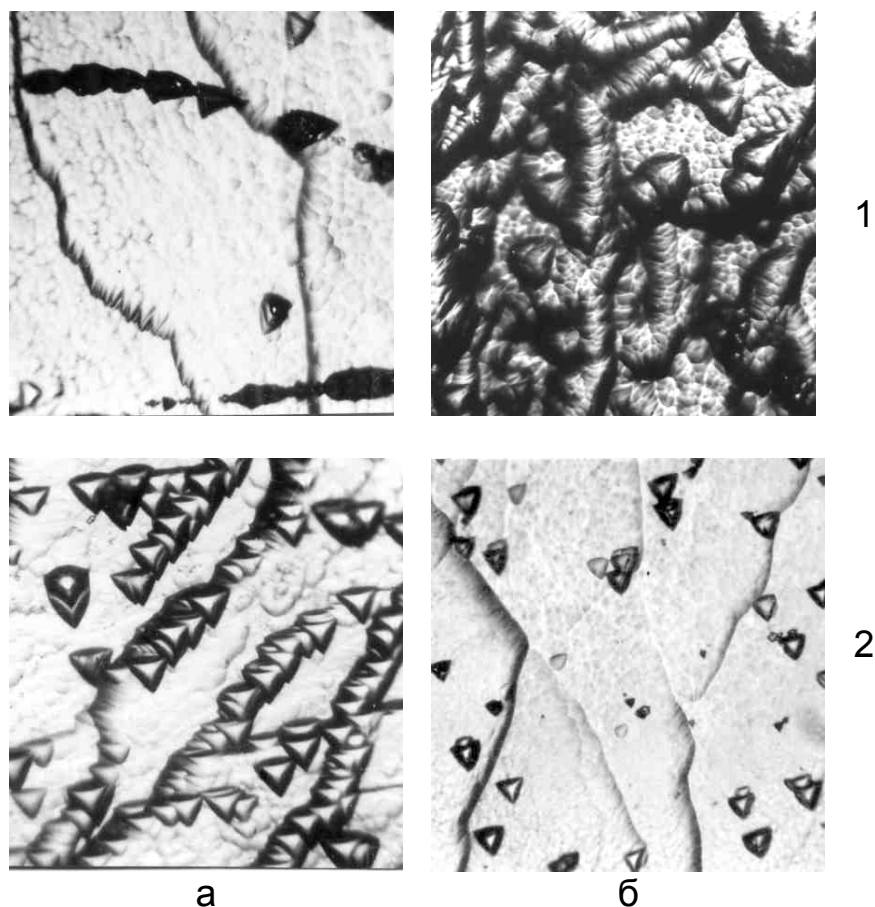


Рис. 5.16 – Дислокаційна структура монокристалів кремнію після катодної (а, $\times 200$) і анодної (б, $\times 340$) поляризації у лужному м'ясному соку (рН 7,4): поверхні над соком (1) і в соку (2)

Напружені поверхні деталей машин, як відомо, є анодами, а вільні – катодами. Швидкість електродних процесів у вузлі тертя визначається з залежності [206]:

$$\frac{S_a}{S_k} = \frac{i_a}{i_k} \quad (5.6)$$

де S_a , S_k – площа анода і катода;

i_a , i_k – густина анодного і катодного струмів.

Таким чином, вибравши співвідношення площ електродів, можна забезпечити необхідний вид поляризації системи.

Підвищення довговічності поверхонь тертя в лужних середовищах м'ясних соків можна досягти за рахунок їх катодного зарядження. При важких режимах тертя, як це має місце, наприклад, у м'ясорізальних комплектах вовчків для подрібнення м'яса, поверхневий шар інструментів є зоною, в якій розвивається крихке руйнування. У цьому випадку для підвищення вантажопідйомності пари тертя треба

застосовувати анодну поляризацію. Вона також може значно підвищити зносостійкість схильних до пасивації металів, якщо на них подавати потенціал дещо більший Фладе-потенціалу.

Залежність інтенсивності зношування твердих тіл у часі має три чітко виражених періоди: припрацювання, сталий і прискорений знос. Змінюючи заряд металів у КАС можна скоротити термін процесу припрацювання, збільшити термін сталого зношування та зменшити його вплив на корозійно-втомлювальну міцність деталей вузлів тертя.

Описаний спосіб регулювання деформації і руйнування твердих тіл в КАС притягує своєю простотою і можливістю безперервно і в широкому діапазоні змінювати їх поверхневу міцність і зносостійкість.

На підставі викладених досліджень можна зробити наступні висновки:

- Кислі м'ясні середовища підвищують схильність твердих тіл до крихкого руйнування, а лужні полегшують утворення і рух дислокацій та обумовлюють в'язке руйнування або диспергування деформованих при терті поверхонь. Тому у перших можуть добре працювати деталі, зокрема, подрібнювальні інструменти з достатнім рівнем пластичності, а у других – з достатнім рівнем твердості.
- Анодна поляризація у кислому м'ясному соку знижує пластичні властивості твердих тіл, а в лужному соку зменшує вірогідність крихкого руйнування. Катодна поляризація в обох соках знижує поверхневу енергію тіл, викликаючи пластифікування поверхонь тертя.
- Регулювати службові характеристики деталей м'ясоподрібнювальних машин і різальних інструментів для подрібнення м'ясної сировини з різною глибиною автолізу можна за рахунок їх електричного зарядження, або підбором захисних покриттів, що мають необхідний рівень твердості і пластичності та відповідні електрохімічні характеристики.

5.3. Модель корозійно-механічного спрацювання м'ясоподрібнювальних машин

Аналіз матеріальних затрат на ремонт обладнання у харчовій і переробній промисловості АПК показує, що на ліквідацію наслідків його корозійно-механічного спрацювання витрачається близько 80% усіх коштів, а питома вага річних витрат перевищує 2% вартості основних фондів [207].

Спрацювання деталей обладнання м'ясопереробної промисловості є маловивченою специфічною проблемою. Для її вирішення необхідно залучити сучасні методи і засоби фізико-хімічної механіки матеріалів, триботехніки, електрохімії і матеріалознавства.

Робочі вузли машин і апаратів м'ясопереробної промисловості, перероблювальні речовини й технологічні рідини утворюють складні фізико-хімічні і динамічні системи, в яких закономірності тертя, корозії та інтенсивність спрацювання залежать від багатьох чинників: умов переробки сировини, хімічних і реологічних характеристик робочих середовищ, застосованих конструкційних матеріалів і захисних покриттів, геометричних параметрів робочих органів тощо. Оскільки більшість технологічних процесів м'ясопереробної промисловості відбувається в рідинних середовищах, багато з яких є корозійно- та поверхнево-активними, значна частина деталей обладнання зазнає дії швидкоплинних потоків рідини, що спричиняє їх інтенсивне корозійно-механічне спрацювання. Не викликає сумніву, що робочі органи технологічного обладнання м'ясопереробних підприємств повинні мати особливо високу корозіє- та зносостійкість, тому що продукти їх спрацювання можуть потрапити у харчові продукти і зробити їх непридатними для харчових і кормових потреб.

Технологічне подрібнювальне обладнання м'ясної промисловості найчастіше перебуває в безпосередньому контакті з основними і допоміжними технологічними середовищами. Особливо це стосується різних технологічних апаратів і місткостей. Склад середовищ, які використовуються в м'ясопереробних виробництвах досить різноманітний. Умовно їх можна поділити на мінеральні та органічні речовини. Так, в цій промисловості застосовують різноманітні прісні води (артезіанську, питну з водогону, дистильовану) з рН 6,5-7,0, а також соляні розчини різної концентрації. Технологічна сировина на м'ясопереробних підприємствах крім білків і ліпідів містить ряд органічних кислот та інших сполук, які надають їй значної хімічної (рН5,2-7,5) та поверхневої активності.

До складу м'яса входять такі ефективні поверхнево-активні речовини (ПАР), як стеаринова та олеїнова кислоти, що зумовлюють адсорбувальний вплив і беруть безпосередню участь у корозійно-механічному спрацюванні обладнання.

Санітарна обробка обладнання проводиться неорганічними і органічними мийними та очищувальними засобами. До неорганічних мийних засобів відносяться їдкі луги, кальцинована сода, фосфати, силікати, а до очищувальних – неорганічні кислоти (азотна, сірчана, соляна, фосфорна та ін.) [210]. Всі вони негативно впливають не лише на корозійно-механічну стійкість деталей з вуглецевих сталей, але можуть також викликати міжкристалітну корозію високолегованих іржостійких сплавів і зруйнувати високоефективні захисні покриття.

На підґрунті аналізу термодинамічної системи процесу корозійно-механічного спрацювання деталей в агресивних технологічних

середовищах м'ясопереробної промисловості можна математично описати механізм зношування, оцінити адекватність і перспективи практичного застосування такої математичної моделі.

Механізм корозійно-механічного зношування матеріалів в агресивних харчових середовищах-електролітах м'ясопереробної промисловості може бути описаний на основі аналізу термодинамічної системи, яка зв'язує макроскопічні параметри трибо логічних об'єктів з електрохімічними характеристиками взаємодії і руйнування конструкційних матеріалів в конкретному технологічному середовищі.

При розгляданні сталого процесу корозійно-механічного зношування металів і сплавів в технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв трибологічну термодинамічну систему можна окреслити сукупністю деформованих об'ємів металу і продуктів зносу, які знаходяться в контакті з агресивним середовищем. Ця система може бути поділена на дві частини: в першій протікають лише деформаційні процеси, а друга, крім цього, зв'язана з хімічними реакціями і зміною площі вільних поверхонь внаслідок руйнування.

При корозійно-механічному зношуванні величина розсіяної енергії визначається не лише пластичною деформацією, але й інтенсивністю електрохімічних процесів та величиною зміни площі вільних поверхонь. Сумісний кількісний аналіз різнорідних процесів можливий при введенні універсальних енергетичних критеріїв з використанням методів термодинаміки необоротних процесів. Такі процеси можна описати за допомогою дисипативної функції [5-7]:

$$\bar{\psi} = T \frac{diS}{dt} = \sum \frac{d\bar{W}_{\text{ouc}}^i}{dt} + \bar{I}_c A_c, \quad (5.7)$$

де $\psi = \psi/S_K$ - дисипативна функція (швидкість розсіювання енергії в системі) віднесена до одиниці поверхні контакту S_K ; T – температура системи; $di\bar{S}/dt = diS/S_K dt$ - зміни ентропії системи; $d\bar{W}_{\text{ouc}}^i/dt$ - швидкість розсіювання енергії для i - процесу, який реалізується в системі; $\bar{I}_c A_c = \frac{I_c}{S_K} A_c$ - потужність хімічної реакції; \bar{I}_c - швидкість хімічної реакції; A_c - хімічна спорідненість реакції.

Швидкості розсіювання енергії, пов'язана з пластичним деформуванням і утворенням нових поверхонь, складає:

$$\sum_i \frac{dW}{dt} = \frac{d\bar{W}_{nn}}{dt} + \sum_j \frac{d\bar{W}_s^j}{dt} \quad (5.8)$$

Дисипативна функція процесу пластифікації має вигляд [211]:

$$\bar{\psi}_{nn} = \frac{dW_{nn}}{dt} = \bar{I} dA_\alpha, \quad (5.9)$$

де $\bar{I}_\alpha = I_\alpha/S_K$ - густина потоку дислокацій; $A_\alpha = \Delta\tau/\alpha$ - хімічна спорідненість процесу утворення і переміщення дислокацій; $\Delta\tau$ - знеміцнення матеріалу; α - кількість дислокацій в одиниці деформованого матеріалу.

Уявляючи процес зношування поверхні як відколювання частинок матеріалу по дислокаційних межах, дисипативну потужність процесу можна виразити таким чином:

$$\sum_j \frac{d\bar{W}_S^j}{dt} = I_{S_0}\Delta\sigma_0 + \bar{I}_{sm}\Delta\sigma_m, \quad (5.10)$$

де $I_{S_0} = dS_0/S_K \cdot dt$ і $I_{sm} = dS_m/S_K \cdot dt$ - швидкості зміни площі вільної поверхні оксидів і неокисленого матеріалу; $\Delta\sigma_0$ і $\Delta\sigma_m$ - відповідно, робота утворення одиниці нової вільної поверхні оксидів і вихідного матеріалу.

З урахуванням виразів (2-4), вираз (1) можна записати у вигляді:

$$\bar{\psi} = \bar{I}_\alpha \frac{\Delta\tau}{\alpha} + \bar{I}_{S_0}\Delta\sigma_0 + I_{sm}\Delta m + \bar{I}_C A_C \quad (5.11)$$

На основі лінійного закону і співвідношень взаємності Онзагера [7] з рівняння (5.11) отримуємо систему лінійних феноменологічних рівнянь:

$$\bar{I}_\alpha = C_1 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_2 A_C + C_3 \Delta\sigma_0 + C_4 \Delta\sigma_m, \quad (5.12)$$

$$\bar{I}_C = C_2 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_5 A_C + C_6 \Delta\sigma_0 + C_7 \Delta\sigma_m, \quad (5.13)$$

$$\bar{I}_{S_0} = C_3 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_6 A_C + C_8 \Delta\sigma_0 + C_9 \Delta\sigma_m, \quad (5.14)$$

$$\bar{I}_{sm} = C_4 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_7 A_C + C_9 \Delta\sigma_0 + C_{10} \Delta\sigma_m, \quad (5.15)$$

де $C_1 \dots C_{10}$ - феноменологічні коефіцієнти.

Приведена швидкість зношування \bar{I} повинна визначитися сумою густини потоків маси окислених \bar{I}_0 та неокислених I_m продуктів зносу:

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m \quad (5.16)$$

Потоки I_0 та I_m можна отримати, виходячи з рівнянь (5.11-5.16). Враховуючи, що $\bar{I}_0 = \bar{I}_C v_0$ з рівняння (5.13) можна визначити величину потоку окисленого металу:

$$\bar{I}_0 = I_C v_0 = v_0 (C_2 A_\alpha + C_5 A_C + C_6 \Delta\sigma_0 + C_7 \Delta\sigma_m), \quad (5.17)$$

де v_0 - стехіометричний коефіцієнт окислу в рівнянні хімічної реакції.

Підставляючи рівняння (5.12) і (5.13) у (5.11) і враховуючи, що $I_m = \bar{I}_{sm}/C_{11}$ (де C_{11} - коефіцієнт, який залежить від властивостей зношеного матеріалу) [6], отримаємо :

$$\bar{I}_m = \frac{1}{C_{11}\Delta\sigma_m} \left[\bar{\psi} - C_1 \left(\frac{\Delta\tau}{\alpha} \right)^2 - (2C_3\Delta\sigma_0 + 2C_2 A_C + C_4 \Delta\sigma_m) \frac{\Delta\tau}{\alpha} - (C_5 A_C + C_8 \Delta\sigma_0^2 + 2C_6 \Delta\sigma_0 A_C + C_7 \Delta\sigma_m A_C + C_9 \Delta\sigma_0 \Delta\sigma_m) \right] \quad (5.18)$$

Вся зовнішня робота, виконана над системою тертя, дорівнює:

$$W = P \cdot f_{mp} \cdot L, \quad (5.19)$$

де P - питоме навантаження; f_{mp} - коефіцієнт тертя ковзання; L - шлях тертя.

Тоді розсіяна енергія (дисипативна функція) визначиться так:

$$\psi = K \cdot P \cdot f_{mp} \cdot V, \quad (5.20)$$

де K - постійна, яка характеризує долю розсіяної енергії при зношуванні; V - швидкість відносного ковзання частинок зношуючого середовища по поверхні тертя.

З виразів (5.17), (5.18) і (5.20) можна отримати швидкість зношування, приведену до одиниці поверхні :

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m = K_1 \cdot P \cdot V + K_2 \Delta\tau + K_3 (-\Delta\tau)^2, \quad (5.21)$$

де K_1, K_2, K_3 - постійні, які включають в себе величини $C_i, f_{тр}, v_0, \Delta\sigma_0, \Delta\sigma_m, \alpha$.

З рівняння (5.21) видно, що швидкість корозійно-механічного зношування лінійно залежить від навантаження і швидкості ковзання і параболічно від знеміцнення матеріалу корозійно-активним середовищем.

З електрохімії відомо [8], що

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M}, \quad (5.22)$$

де $\Delta\varphi_0$ - зміна рівноважного електродного потенціалу при зношуванні; n - валентність металу; F - постійна Фарадея; V_M – мольний об'єм речовини.

Підставляючи вираз (5.22) в (5.21) отримаємо:

$$\bar{I} = K_1 \cdot P \cdot V - K_2 \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M} + K_3 \left(\frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_M} \right)^2 \quad (5.23)$$

У формулі (5.23) величини P і V характеризують зовнішню дію на поверхню, що зношується, а зміна потенціалу залежить від властивостей матеріалів пари тертя та характеристик корозійного середовища. Якщо пара тертя буде складатися з різнорідних металів або покриттів, то кожен з них має свій електродний потенціал. В цьому випадку пара буде мати сумарний змішаний електродний потенціал [215, 216].

Зміщуючи потенціал тертя пари з використанням зовнішнього джерела струму в катодну або анодну область, можна управляти процесом корозійно-механічного зношування в деяких межах, не змінюючи при цьому умов навантаження вузла тертя. Це зміщення також можна здійснити зміною складу матеріалів, що труться, шляхом нанесення захисних покриттів, зміною режимів тертя та інгібуванням технологічного середовища, що підтверджено багатьма дослідженнями

[207,215,216].

Для перевірки правильності вибору термодинамічної моделі корозійно-механічного зношування провели розрахунок коефіцієнтів в формулі (5.23) з використанням методу найменших квадратів. При розрахунках були вибрані довірчі інтервали для рівня імовірності 0,95. Паралельно були проведені випробування на зношування бронзових зразків (БрОЦС 5-5-5) по схемі "втулка-втулка" на установці торцевого тертя з вимірюванням потенціалів поверхні тертя при занурюванні у середовище та в процесі тертя [207,216] за допомогою потенціостата П-5827. Досліди проводили в середовищах м'ясопереробного виробництва (табл. 5.1). Швидкість ковзання складала 0,2 м/с, питома навантаження 0,92 МПа. Швидкість розгортання потенціалу при зніманні поляризаційних кривих дорівнювала 2 мВ/с.

Для перевірки адекватності моделі (5.23) для м'ясного соку з рН 5,5 і вмістом 3% NaCl води було проведено 3 досліди (табл.5.4). Середньоквадратична похибка буде такою:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)} = 0,25. \quad (5.24)$$

Враховуючи малу величину виборки помножимо S на коефіцієнт Ст'юдента t. Для $\alpha=0,05$ і $f=2$ його табличне значення дорівнює $t=4,3$. Тоді відкорегована S буде: $S = 0,25 \cdot 4,3 = 1,08$. Тобто за результатами вимірювань $S = 10,95 \pm 1,08$. Верхня межа зносу дорівнює 12,03 мг. Таким чином, теоретично визначений результат зносу 11,80 мг попадає в довірчий інтервал з імовірністю 0,95. Аналогічний хід перевірки адекватності моделі для зношування в жировій емульсії: $S=0,2$, а, з врахуванням критерію Ст'юдента, $S = 0,02 \cdot 4,3 = 0,086 \approx 0,09$. Отже, з імовірністю 0,95 теоретичний результат розрахунку зносу у 0,24 мг попадає в довірчий інтервал, тому що його нижня межа дорівнює 0,21 мг.

Таблиця 5.1 – Триботехнічні та електрохімічні параметри експериментальних зразків, отримані розрахунками та вимірюванням

Технологічне середовище	Зміна потенціалу при зношуванні, мВ	Знос зразків в мг на 10 км шляху тертя				
		верхнього	нижнього	середній	середній по всіх експериментах	розрахований
М'ясний сік	135	11,20	10,70	10,95	10,95	11,80
		11,22	10,72	10,97		
		11,18	10,68	10,93		
Жирова емульсія	25,0	0,33	0,29	0,31	0,30	0,24
		0,32	0,27	0,29		
		0,32	0,28	0,30		

Результати аналітичних і експериментальних досліджень підтверджують адекватність отриманої математичної моделі. Вони також свідчать, що технологічне середовище може в десятки разів змінювати інтенсивність зношування матеріалів. Корозійно-механічне зношування поверхонь в агресивних технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв не може розглядатися як просте сумування механічного і електрохімічного факторів. Це більш складний процес, в якому електрохімічне розчинення служить каталізатором втомного руйнування. Тертя ж, в свою чергу, сприяє розвитку електрохімічної корозії. У всіх цих процесах суттєву роль відіграє потенціал системи [9] та його зміщення під впливом технологічного середовища в трибо логічних системах [215,216].

5.4. Керування зносостійкістю м'ясоподрібнювальних інструментів

Виготовлення фаршу для багатьох видів ковбас здійснюють за допомогою вовчків, які мають низьку довговічність через інтенсивне зношування різальних інструментів [217,218]. А тому доцільно дослідити і застосувати конструктивно-технологічні заходи для підвищення зносостійкості ножів і решіток цих машин.

Для вовчків характерна висока продуктивність, простота обслуговування, можливість включення в поточно-механізовані лінії. Їх застосовують для подрібнення не лише м'яса, але і для приготування рибних, овочевих, сирних напівфабрикатів, харчових жирів, кормового борошна тощо [217-221].

М'ясо у вовчку продавлюється крізь решітки шнеком і зрізається ножами хрестоподібної форми. Решітки діаметром ~80...320 мм мають отвори, діаметр яких зменшується від ~ 25 до 2 мм у напрямку руху сировини. Частота обертання шнека залежить від типу вовчка і характеристик подрібнюваного матеріалу [217,218].

На переробних підприємствах різної потужності м'ясо-жирову сировину для варених ковбас, сосисок, сардельок подрібнюють спочатку у вовчках, наприклад, МП-160, МП-200 (Україна), ЮМ-ФВП-82-2, К7-ФВП-82, К7-ФВП-114, ЛПК-1000В, МП-1-120, МП-2, ЯЗ-ФВВ, «Super Grinder Laska» WWB-200 (Австрія), N-112 (Чехословаччина), «MADO», «Seydelmann» (Німеччина), «Konteteollisuus» (Фінляндія) та ін., потім – у кутерах типу ФІО-80, Л5-ФКВ, ВК-125, «Schaller» (Німеччина), або інших машинах для тонкого подрібнення (ФІБ-2,5, Я2-ФЮТ, Я2-ФІБ, ПМ-ФІБ-0,5) [217-222]. Найчастіше все ж застосовують вовчки виробництва Полтавського машинобудівного заводу, завдяки їх невисокій вартості і наявності достатньої кількості запасних частин [217,221,222]. Разом з тим, стійкість до спрацювання ножів і решіток обмежується 7...8

годинами експлуатації. Якість подрібнення м'яса прямо залежить від гостроти інструментів вовчка. Тому за об'єкт досліджень був вибраний різальний комплект вовчка МП-160.

Підвищення зносостійкості різального комплекту вовчків типу МП-160 можливе завдяки використанню ефекту вибіркового переносу при терті ножів по решітках та конструкційному удосконаленню інструментів.

5.4.1. Конструктивно-технологічні способи підвищення зносостійкості

Якість фаршу визначається ступенем його подрібнення, вологомісткістю та якістю вихідної сировини. Ці показники прямо залежать від геометричних параметрів ножів і решіток вовчків та від гостроти різальних лез [7–9]. Швидкість спрацьовування ножів і решіток визначає довговічність вовчків у цілому. Збільшуючи довговічність ножів, можна збільшити довговічність вовчків.

Довговічність різальних комплектів можна збільшити завдяки оптимізації їхньої конструкції, використанню прогресивних технологічних процесів виготовлення інструментів та забезпеченню умов для їх раціональної експлуатації [7,8,10-12].

До конструктивних методів підвищення довговічності належать: використання ножів з криволінійним і зміщеним різальним лезом, вибір оптимальних кутів загострення ножів, використання збірних конструкцій інструментів для зменшення витрат легованих інструментальних сталей або твердих сплавів.

До технологічних методів підвищення довговічності ножів належать: використання зносостійких матеріалів і прогресивних способів виготовлення заготовок, вибір оптимальних режимів термообробки і загострення та способів захисту від спрацювання [224-226].

Експлуатаційна довговічність вовчків залежить від умов роботи різального комплекту і його правильної експлуатації. Наприклад, не можна допускати великого спрацювання інструменту, надто затягувати притискну гайку під час зближення ножів, тому що це призводить до перегрівання фаршу та інтенсивного спрацьовування різального комплекту [8,9]. Тому багато авторів та фірм пропонують пристрої, що регулюють зусилля притискування ножів до решітки. Але вони складні і не використовуються у вовчках вітчизняного виробництва [223,227,228].

Різальний комплект вовчків складається із швидкозношуваних деталей, а витрати на їх виготовлення для поновлення працездатності співмірні з вартістю самих машин. У процесі експлуатації зношуються лише різальні леза, тому захист їх від спрацювання та відновлення роботоздатності коштує дешевше, ніж виробництво нових інструментів [223,225].

За даними різних авторів лінійне спрацювання лез серійних ножів вовчків до наступного загострення становить всього 0,25...1,0 мм, причому спрацювання по довжині леза нерівномірне. Під час повторних загострень знімається шар матеріалу ножів завтовшки 0,5...0,7 мм і вони повністю виходять з ладу вже через 15...20 робочих змін. А тому зменшення кількості загострень може значно підвищити їх довговічність [8,9].

Вважається, що на сучасному рівні розвитку машинобудування для переробної і харчової промисловості в Україні перспективними, з огляду на ефективність і простоту реалізації, є такі методи підвищення довговічності ножів: застосування збірних конструкцій; використання для виготовлення різальних пластин легованих зносостійких сталей; вибір раціональних геометричних параметрів інструментів; застосування для загострення ельборових кругів; забезпечення вчасного і якісного обслуговування м'ясоподрібнюючих вовчків [1,7].

Одним з головних чинників, що визначають працездатність ножів м'ясорізальних вовчків, є радіус заокруглення різального леза (рис. 5.17). Від його величини залежить вологомісткість м'ясного фаршу. Зі зменшенням гостроти інструменту цей показник якості зменшується по експоненті (рис. 5.18). Дослідження показали, що радіус заокруглення різального леза ножа значною мірою визначається величиною спрацювання, що залежить від кількості повторних загострень, та переднім кутом ножа γ (рис. 5.19). Зі збільшенням переднього кута зменшується величина спрацювання ножа і радіус заокруглення його різального леза та покращується якість подрібнення сировини.

Недоліком серійних м'ясорізальних ножів є те, що лінія різального леза ножа співпадає з радіальним напрямком відносно осі обертання (рис. 5.17,а) і процес різання сировини наближається до процесу рубання. Внаслідок цього відбувається інтенсивне спрацювання леза та погіршується якість фаршу.

Нова конструкція ножа вовчка зі зміщеним різальним лезом передбачає розміщення леза по дотичній до кола деякого діаметра, описаного з центра обертання. У цьому випадку з'являється повздовжня (відносно леза ножа) складова зусилля різання, що забезпечує поступове розтинання сировини і покращує якість кінцевого продукту (рис. 5.17,б).

Запропоновані конструкції ножів з передніми кутами $\gamma > 0^{\circ}$ та зміщеним різальним лезом не потребують суттєвої перебудови технологічного процесу їх виготовлення і забезпечують значне (на 50...100%) підвищення довговічності.

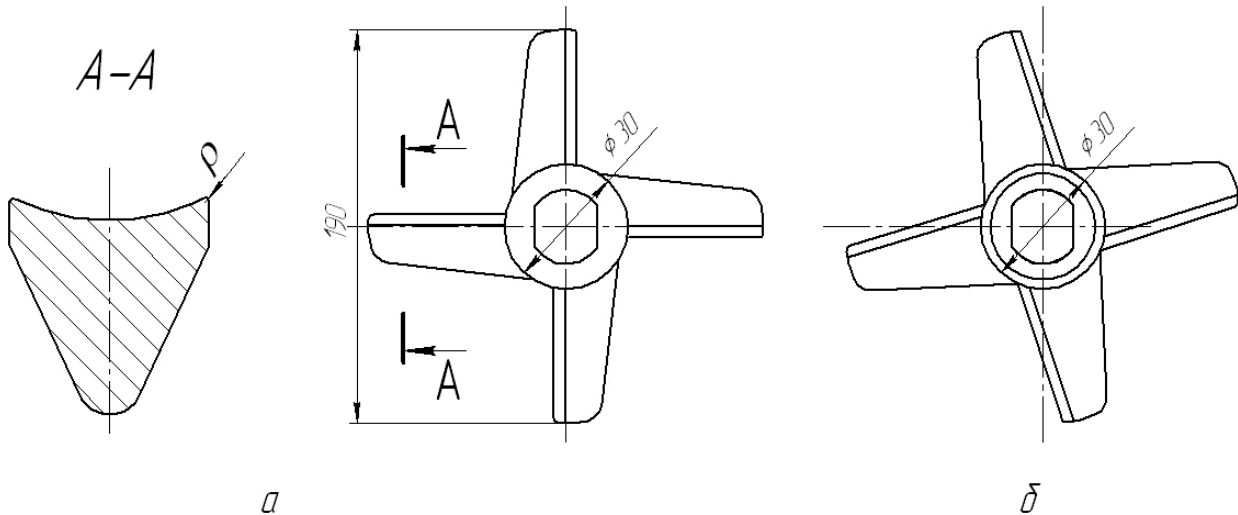


Рис. 5.17 – Ніж м'ясорізального вовчка МП-160: а – серійний; б – із зміщеним різальними лезом

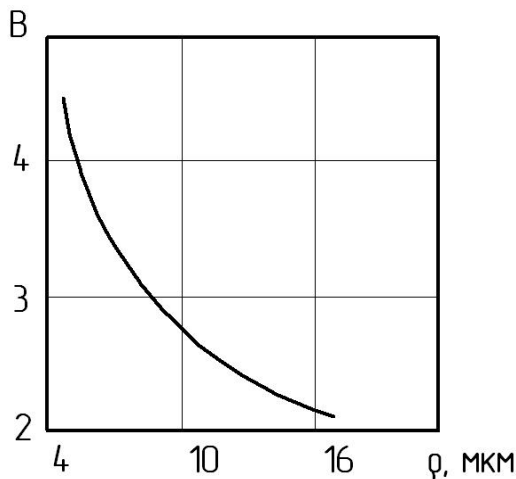


Рис. 5.18 – Залежність відносної вологомiсткостi фаршу B вiд радиуса заокруглення рiзального леза ножа r

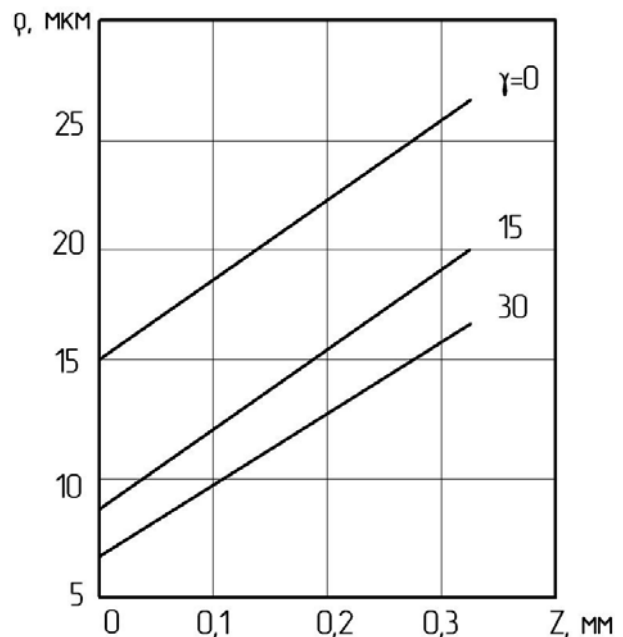


Рис. 5.19 – Залежність радиуса заокруглення рiзального леза r вiд величини спрацювання Z i переднього кута ножа γ

Вiдмови деталей рiзального комплексу переважно обумовленi їх спрацюванням в умовах тертя зi змащуванням специфiчним середовищем (фаршем i м'ясним соком). За даними виробничих спостережень, лiнiйне спрацювання серiйних ножiв вовчкiв, виготовлених зi сталi У8А, до вiдмови становить близько 0,2...0,3 мм. При

переточуванні лез знімається шар завтовшки 0,5...0,7 мм. За таких умов довговічність ножів не перевищує 7...15 робочих змін. Традиційні методи підвищення зносостійкості шляхом вибору зносостійких матеріалів і покриттів ґрунтовно досліджені і їх можливості обмежені [223,225].

5.4.2. Застосування вибіркового переносу у вузлах подрібнення м'яса

У пошуках нових шляхів підвищення зносостійкості деталей м'ясоподрібнювальних машин доцільно звернутися до живої природи. Аналіз навантажених рухливих з'єднань показує, що є всього два типи вузлів тертя — відкриті і закриті. У відкритих вузлах тертя працює твердий матеріал по твердому - це зуби тварин. Закриті вузли тертя – суглоби живих організмів, «сконструйовані» на принципах, які у машинобудуванні не застосовують. Тут на твердій кістці розташовується м'який хрящ, на поверхні якого є тонка рухлива біополімерна плівка. Сполучена поверхня має таку ж структуру. У суглобі в парі тертя працюють два однакових матеріали, причому м'який по м'якому. Відзначимо, що подібні пари тертя (у миші, слона, риби, птахів) є універсальними вузлами, які володіють «беззношуванням». Відомо, що біологічні системи мають здатність до самовідновлення і можуть працювати десятки років без зношування.

Довгий час існувало як би протиріччя законів розвитку живої і неживої природи. Основний закон термодинаміки Клаузіуса пророкує ріст ентропії, тобто безладдя в замкнутій системі. Еволюційна теорія Дарвіна, навпаки, встановлює, що в основі добору лежить підвищення ступеня організованості біологічних систем. Ці взаємно протилежні закони розвитку можна представити графічно (рис. 5.20). Однак в останні десятиліття біологічна еволюція стала розглядатися з кібернетичних позицій і понять автоматичного регулювання і зворотного зв'язку, що в значній мірі зблизило ці два основних закони розвитку світу.

Крім сказаного основну роль у зазначеному зближенні варто відвести спонтанному формуванню структур у відкритих системах на молекулярному рівні.

Зараз встановлено, що у відкритих системах (рис. 5.21), які постійно одержують із зовнішнього середовища негативну ентропію і речовину, можуть виникати стаціонарні нерівноважні стани з високим ступенем упорядкованості.

Відповідно до термодинаміки нерівноважних процесів нові структури можуть виникати в природі у тих випадках, коли виконуються наступні чотири необхідних умови: 1) система є термодинамічно відкритою, тобто може обмінюватися речовиною m і (або) енергією E із середовищем; 2) динамічні рівняння системи нелінійні; 3) відхилення від

рівноваги перевищує критичне значення; 4) мікроскопічні процеси відбуваються кооперовано (узгоджено).

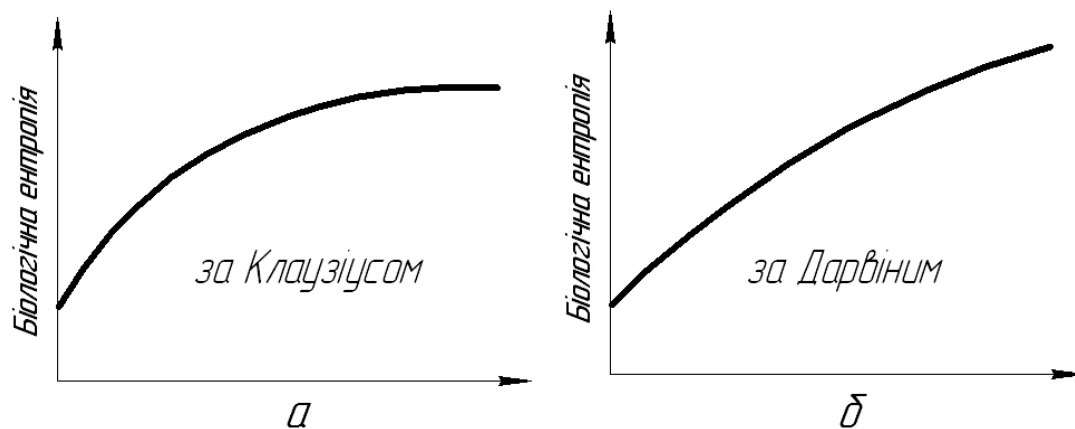


Рис. 5.20 – Ріст безладдя у відповідності з другим законом термодинаміки (а) і ріст ступеня організованості відповідно до закону Дарвіна (б)

Другий закон термодинаміки пов'язаний з першою умовою: у системах, здатних до формування структур, він не порушується, а лише виявляється у більш загальному вигляді. Друга і третя умови вказують, що потрібно відійти від звичних лінійних фізичних уявлень і вступити в нелінійну область, де за певних умов упорядкування може відбутися мимовільно. Четверта умова враховує причинність утворення процесів, що відбуваються на мікроскопічному рівні, за наявності особливих зв'язків, які призводять до спонтанного виникнення структур.

У деяких явищах неживої природи явно відсутні які-небудь ознаки самоорганізації, спостерігається розпад системи і збільшення ентропії. Так, шматок звичайного цукру, виставлений на повітря, через якийсь час випаровується, зникає. Зворотного явища не відбувається, цукор «з нічого» не утвориться. Слід літака в небі, який складається із сконденсованої пари води також незабаром розсіюється, пропадає. Подібних прикладів безліч.

Але от інші приклади. За певних умов з пари води, що знаходяться в повітрі, утворяться (випадуть) сніжинки. Вони мають правильну форму і за структурою більш високу організацію, ніж звичайна пара. Тут у наявності явна самоорганізація. З розплавів металів чи розчинів солей утворюються кристали. Це приклади самоорганізації неживої природи.

Самоорганізація не є універсальною властивістю матерії й існує лише при визначених внутрішніх і зовнішніх умовах. Разом з тим ця властивість не пов'язана з якимось особливим класом речовин.

Вузол тертя, наприклад, м'ясоподрібнювальний комплект вовчка в неживій природі задовольняє вимогам самоорганізації. Він є відкритою

системою. До нього підводиться енергія від електродвигуна, яка обертає ножі. Такі вузли тертя змащуються. Мазильний матеріал – це м'ясний сік, що складається з безлічі однакових елементів, у даному випадку — молекул. У ньому можуть бути міцели, іони металів. Усе це створює умови для самоорганізації нових структур.

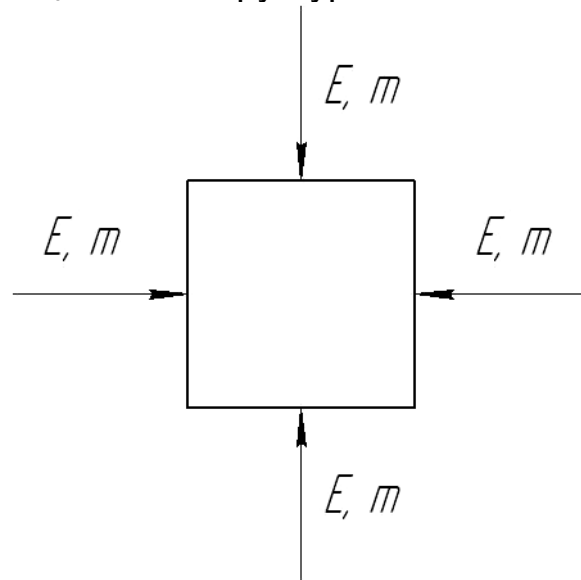


Рис. 5.21 – Потенційна можливість спонтанного утворення структури у відкритій системі

До останнього часу вважалося, що тертя є руйнівним процесом. Зворотне твердження було абсурдом, як і те, що можна створити вузол тертя, який би не зношувався. Однак природа подбала і про машини.

Враховуючи, що в перероблюваному м'ясному середовищі містяться різноманітні хімічно- і поверхнево-активні сполуки, ефективним може бути використання ефекту вибіркового переносу (ВП) [229,237]. Вибірковий перенос забезпечує зменшення інтенсивності зношування певних пар тертя в присутності мастил і поверхнево-активних речовин. При наявності в зоні тертя міді на поверхні сталевих деталей утворюються збагачені міддю шари, деформація яких під дією зсувних напружень відбувається без зміцнення і розвитку втомлювальних тріщин. Але суттєве зменшення інтенсивності зношування і коефіцієнту тертя, внаслідок проявлення ефекту вибіркового переносу, можливе лише за певних умов роботи вузлів тертя і лише для конкретних матеріалів.

Тому, для виявлення раціональних режимів роботи різальних пар ножів і решіток, були проведені триботехнічні випробування матеріалів в умовах, які відповідають параметрам навантаження деталей різального комплексу вовчків [235,237]. Досліди проводили на спеціальній установці, побудованій на базі вертикально-свердлильного верстата, яка моделює роботу пари ніж-решітка вовчка. Досліджувані зразки інструментів виготовляли із сталей 65Г і У8А, які широко використовуються для

виготовлення ножів і решіток. Зразок, який обертася, був виготовлений у вигляді складеного ножа вовчка з робочими різальними пластинами із сталі 65Г (HRC_e 56), завтовшки 5мм, за якими закріплювались різної товщини вставки з бронзи БрАЖ 9-4. Ця бронза була вибрана тому, що вона, згідно санітарно-гігієнічних вимог, допущена до використання в машинах і агрегатах переробної і харчової промисловості при контактуванні з м'ясом. За нерухомий зразок була використана серійна решітка вовчка (сталь У8А, HRC_e 60) з отворами діаметром 3 мм.

Досліди проводили в середовищі м'ясного соку при питомому навантаженні 4,0 МПа і коловій швидкості 1,4 м/с, що відповідає умовам роботи різального комплекту. Лінійне спрацювання зразків Δ оцінювали вимірюванням зміни ширини пластини через рівні проміжки часу протягом 2-х годин випробувань з використанням методу штучних баз [230,237].

Проведені дослідження показали, що спрацювання рухомого зразка і коефіцієнт тертя залежать від співвідношення товщини G сталевих і бронзових пластин (табл. 5.5). Найменше спрацювання відбулося при G=0,6, а мінімальний коефіцієнт тертя μ був при G=0,8.

Для перевірки проявлення ефекту вибіркового переносу ВП і результатів триботехнічних досліджень були проведені дослідження у виробничих умовах на м'ясорізальних вовчках МП-160. На спеціально сконструйованих ножах вовчків встановлювались різальні пластини з сталі 65Г (HRC_e55) завтовшки 4,5 мм, за якими закріплювались бронзові пластини завтовшки 3,5 мм (G=0,77).

Таблиця 5.5 – Залежність спрацювання зразків з сталі 65Г(Δ) і коефіцієнта тертя (μ) від співвідношення товщини бронзової і сталевих пластин (G)

G	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Δ , мкм	18	13	9	6	10	15	25	28	30
μ	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,06	0,08	0,09	0,10

Випробування, під час яких проводили заміри лінійного спрацювання ножів Δ по ширині різальних пластин, здійснювали при переробленні яловичини I і II категорії. Температура вихідної сировини становила 2...4 °С. До складу різального комплекту вовчка, крім двох експериментальних ножів, входили серійні вхідна, проміжна і вихідна решітки. Діаметр отворів вихідної решітки дорівнював 3 мм. Для порівняння випробовувались також складені ножі без бронзових антифрикційних пластин.

Характер зношування різальних елементів ножів при використанні бронзових пластин не змінювався і найбільш інтенсивне спрацювання спостерігалось на периферії ножа. Встановлення бронзових пластин, завдяки прояву ефекту вибіркового переносу, забезпечувало (табл. 5.6), понад двохразове підвищення наробітку вовчків до допустимого зносу ножів (0,2...0,25 мм).

Таблиця 5.6 – Залежність зносу ножів (Δ) від об'єму переробленої сировини (Q)

Q, м ³	Зношування ножів Δ , мм			
	Серійні ножі		Експериментальні ножі	
	на периферії леза	на середині леза	на периферії леза	на середині леза
6	0,12	0,06	0,06	0,02
12	0,17	0,09	0,09	0,03
18	0,21	0,16	0,13	0,06
24	0,23	0,18	0,15	0,09
30	-	-	0,17	0,12
36	-	-	0,19	0,14

Таким чином, проведені дослідження ножів з антифрикційними вставками підтвердили реальну перспективу значного підвищення довговічності деталей різального комплексу м'ясорізальних вовчків завдяки використанню ефекту вибіркового переносу.

5.4.3. Формування сервовитних захисних плівок з використанням плазмового струменя

Способи зниження спрацювання деталей і втрат потужності на тертя при використанні антифрикційних матеріалів у м'ясопереробленні не набули значного поширення. Відомо про використання антифрикційної пластмаси з підкладкою у вигляді металевого диска для виготовлення перфорованої решітки [235,238]. Раціональне також використання м'ясорізальних решіток з бронзовими вставками або ножів, на яких позаду різальних лез розміщені вставки з мідних сплавів [237,238]. Але такі засоби підвищення зносостійкості або не технологічні, або мають ряд інших вад. Так, випробування нами хрестоподібних ножів вовчків з бронзовими вставками показало, що леза ножів у процесі роботи можуть піддаватися руйнуванню від утомленості, а в решітках з бронзовими вставками виникають тріщини і, під тиском фаршу, вони руйнуються. Всі ці негаразди проявляються при одночасному зменшенні коефіцієнта тертя та підвищенні зносостійкості. Тому було прийнято рішення

формувати бронзові антифрикційні вставки плазмовим напиленням [235,241].

Перед напиленням у решітці (рис. 5.22) свердлилися сфероподібні заглиблення, а потім, за допомогою плазми і спеціального екрана, вони заповнювалися бронзою, яка допущена санітарними службами до контакту з м'ясом (БрАЖ-9-4). Технологічний процес плазмового напилення включав такі основні операції: підготовку порошків, налагодження обладнання, механічне оброблення та знежирювання деталей, напилення бронзового порошку на плазмовому напівавтоматі 15ВБ02 [235].

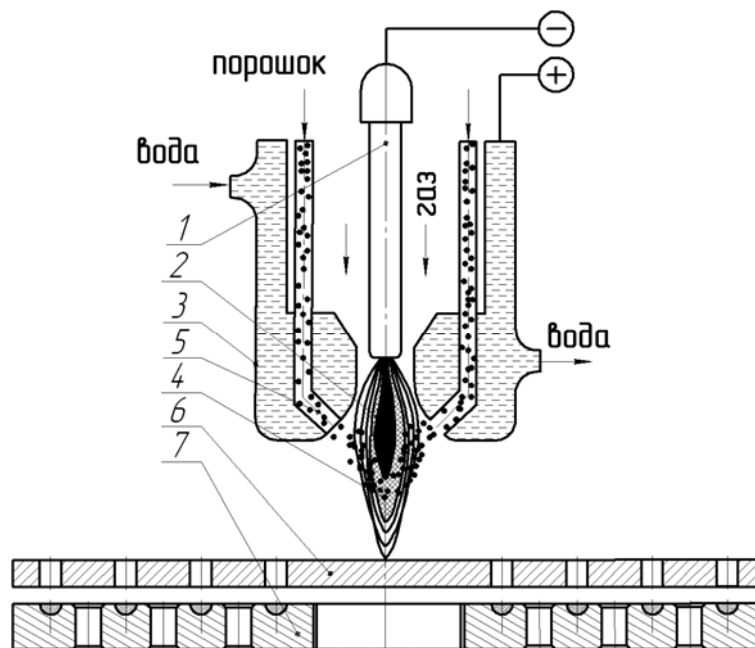


Рис. 5.22 – Схема плазмового напилення м'ясоподрібнювальної решітки: 1 – електрод; 2 – електрична дуга; 3 – сопло; 4 – плазмовий струмінь; 5 – транспортер бронзи; 6 – екран; 7 – решітка

Отвори в решітці можуть мати різний діаметр, в залежності від потрібного технологічного призначення м'ясного фаршу. А заглиблення в решітці (допоміжні отвори), які заповнюються бронзою, мають розміщуватися між основними отворами на концентричних колах так, щоб радіус кожного наступного кола перевищував радіус попереднього на величину радіуса допоміжного отвору (рис. 5.23).

Кількість і діаметр напилених плазмою антифрикційних вставок можуть бути різними, але на концентричному колі i -го радіуса має бути хоча б одна вставка для збереження безперервності утвореної мідної сервовитної плівки на поверхні решітки.

Радіус кожного концентричного кола може вибиратися із співвідношення

$$R_i = R_{i-1} + D_B/n, \quad (5.25)$$

де R_i – радіус першого кола, на якому розміщена i -а вставка; R_{i-1} – радіус найближчого меншого кола, на якому розміщена вставка $i - 1$; D_e – діаметр антифрикційної мідної вставки; n – коефіцієнт, що враховує нерозривність утвореної сервовитної мідної плівки ($n \geq 1$) і залежить від умов роботи різального комплексу та характеристик технологічного середовища.

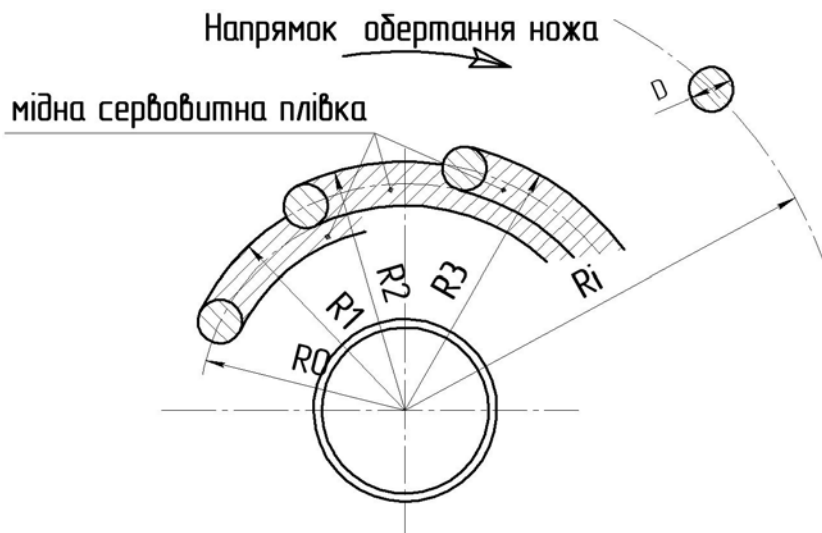


Рис. 5.23 – Схема розміщення напилених плазмою вставок на решітці вовчка

Максимальна кількість вставок на i -у колі обмежена межею міцності матеріалу решітки.

Запропонований спосіб дає можливість підвищити ресурс решітки до переозагострення з 7...8 до 15...20 год, а зносостійкість ножів із сталі 65Г у разі роботи з напиленими решітками зростає на 70% порівняно з ножами, що працюють у парі з серійними решітками із сталі У8, і на 30%, порівняно з ножами з бронзовими вставками (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Середнє лінійне спрацювання різальних лез м'ясоподрібнювальних ножів вовчків

Маса переробленої яловичини 1-ї та 2-ї категорій, т	Знос ножів із сталі 65Г, мм		
	без напилення	з антифрикційною пластиною	в умовах контакту з напиленою плазмою решіткою
10	0,110	0,025	0,010
20	0,175	0,065	0,040
30	0,210	0,085	0,065
40	0,270	0,125	0,095

Ефективність застосування сучасних технологій конструювання, виготовлення, загострення інструментів та використання решіток, напилених плазмою, визначається скороченням потреб м'ясопереробного підприємства в запасних ножах і решітках, завдяки підвищенню довговічності різального комплекту, зменшенню енергетичних затрат на перероблення м'ясопродуктів внаслідок зниження коефіцієнта тертя і покращення різальної здатності м'ясоподрібнювального комплекту, що радикально впливає на якість м'ясопродуктів.

5.4.4. Механізм утворення і захисної дії сервоцитних плівок

М'ясний сік діє при терті як слабка кислота. Атоми легуючих елементів бронзи (залізо, алюміній та ін.) переходять у мастильний матеріал, у результаті поверхня бронзи збагачується атомами міді. Після відходу атомів легуючих елементів з поверхні бронзи деформація при терті викликає дифузійний приплив нових атомів легуючих елементів до поверхні, які потім переміщуються у сік. Таким чином, шар бронзи, який деформується при терті, звільняється від легуючих елементів і стає в основному мідним. У ньому утворюється велика кількість вакансій, частина з них нігілює, утворюючи пори, які заповнюються молекулами соку.

Сік є відновником окису і закису міді, тому поверхня тертя мідної плівки вільна від оксидних плівок, вона дуже активна і здатна до схоплювання зі сталеву поверхню, тому що має вільні зв'язки. В результаті сталева поверхня поступово покривається тонким шаром міді. Оскільки шар міді, який утвориться на бронзовій поверхні, тоншає внаслідок його переносу на сталеву поверхню, то відбувається подальше розчинення бронзової поверхні. Цей процес продовжується доти, поки на обох поверхнях, сталевій і бронзовій, не утвориться шар міді товщиною 1...2 мкм (див. рис. 5.23).

Після того як мідна плівка покриє бронзову і сталеву поверхні, молекули соку вже не зможуть взаємодіяти з бронзою і «витягати» атоми легуючих елементів, процес розчинення бронзи припиняється, і настає сталий режим ВП.

Сік при терті руйнує оксидну плівку на сталевій поверхні (є відновником, як і для міді). Це забезпечує високу міцність зчеплення мідної плівки зі сталеву поверхню. В результаті остання покривається мідною плівкою, і пара тертя сталь - бронза стає парою мідь - мідь.

У процесі притирання у випадку обмеженого об'єму мастильного матеріалу в ньому можуть утворюватися міцели - часточки міді, оточені щільним кільцем молекул соку. Міцели мають всередині негативний заряд, що утримує іони міді в зазорі. Іноді за якимись причинами міцели

виходять із зазору: тоді під дією електричного поля вони попадають у вузькі щілини і там утворюють тонку плівку міді.

Утворення плівки міді на бронзовій поверхні відбувається в результаті електрохімічного процесу — процесу розчинення металу. Відповідно до закону електрохімічної кінетики швидкість анодного розчинення повинна зростати при збільшенні потенціалу, однак у нашому випадку цього не відбувається. Внаслідок утворення сервовитної плівки між анодними і катодними ділянками поверхні бронзи процес розчинення може цілком припинитися, настане сталий режим тертя. Якщо внаслідок деяких причин мідна плівка зруйнується, то знову відбудеться розчинення бронзи, і поверхня буде збагачуватися міддю, поки знову не настане пасивний стан.

Властивості мідної плівки, «народженої» у процесі тертя, інші, ніж у звичайної міді, отриманої відновленням мідних руд. Ця різниця обумовлена умовами утворення плівки. Так, у вузлах тертя різальних комплектів м'ясоподрібнювальних машин плівка міді утвориться з іонів міді, які надходять у м'ясний сік з бронзових пластин або напилених плазмою вставок. Утворюється вона тільки в зоні тертя за наявності мастильного середовища і при невисокій температурі. Механізм її формування ще недостатньо з'ясований, хоча властивості досліджені багатьма сучасними методами.

При терті пари бронза - сталь у середовищі м'ясного соку плівка на поверхнях тертя утворюється в результаті розпаду мідного сплаву (твердого розчину) при низьких температурах, мастильний матеріал і деформації зсуву полегшують дифузійні процеси, чого немає при виплавці міді з руди.

Структуру плівки досліджували різними методами:

1. На електронному мікроскопі вивчали плівку міді на сталі і бронзі, яка утворюється при терті пари бронза - сталь у середовищі м'ясного соку. Фотографії поверхні на електронному мікроскопі EM-7 отримані за допомогою вугільно-срібних реплік. Фотографії дозволили встановити, що сервовитна плівка має мікропористість, причому деякі пори мають огранювання. Це так названі негативні кристали, які утворюються в результаті коагуляції (злиття) вакансій у місцях надлишку наявних вакансій у плівці.

Таким чином, дослідження плівки на електронному мікроскопі показало, що плівка товщиною 1...2 мкм має пухку, пористу структуру. Цей висновок підтверджує наступний дослід. Ретельно промитий і висушений зразок з мідною плівкою на поверхні витримували у вакуумній шафі. В результаті на поверхні «випотівав» сік, поява якого свідчила, що в плівці знаходилися поверхнево-активні компоненти технологічного середовища.

2. Визначення параметра ґратки. Параметр ґратки сервовитної плівки, яка утворилася при терті бронзи по сталі в середовищі м'ясного соку, менший, ніж параметр ґратки бронзи. В міру наближення до поверхні він може зменшуватися аж до значення 0,0354 нм і на більшій глибині наближається до параметра основного металу.

Зміна параметра ґратки в першу чергу свідчить про перерозподіл легуючих елементів у поверхневих шарах сплаву при терті. Дифузійні процеси при терті сприяють глибоким структурним перетворенням у поверхневих шарах твердих тіл і є одними з ведучих ланок у механізмі контактної взаємодії. Закономірності кінетики дифузійних процесів є основою при виборі сплаву для досягнення режиму ВП і стійкості цього ефекту.

3. Радіоізотопний аналіз і метод оже-спектроскопії підтверджують отримані дані про перерозподіл легуючих елементів сплаву при терті. Вони вказують на різке розходження вмісту легуючих елементів у поверхневих шарах (аж до повного їх розчинення при формуванні сервовитної мідної плівки) за різних умов тертя, зокрема при використанні м'ясних соків різної природи. Встановлена наявність на рентгенограмах двох систем дифракційних ліній, які відповідають матеріалам з періодами кристалічних ґраток, які різко розрізняються, що свідчило про існування міжфазної границі, яка розділяє основний матеріал зразка і прилягаючий до нього сервовитний шар. Пошаровий емісійний мікроспектральний аналіз (з використанням лазерного променя) показав, що під сервовитною плівкою на границі зі сталлю є шар оксидів міді, легуючих елементів чи домішок товщиною близько 0,1 мкм.

4. Структуру плівки вивчали за допомогою спеціально розробленого методу «ковзаючого пучка» рентгенівських променів. Промінь направляли до поверхні під малим кутом (не більш 1°), що дозволяло досліджувати поверхневі шари товщиною 0,1 - 0,01 мкм. Дослідження показали, що верхній шар плівки має значні структурні зміни в порівнянні з нижчележачими шарами. За критерій структурних змін приймали істинну (фізичну) ширину ліній на рентгенограмах β , яка для чистих металів і рівноважних твердих розчинів є результуючою середньою величиною блоків і дисперсій пружної деформації кристалічної ґратки (мікреспотворень) і слугує характеристикою густини дислокацій, які містяться в металі. Встановлено, що ширина інтерференційних ліній (200) і (311) міді по глибині зразків після випробувань на тертя змінюється. У шарі товщиною 0,3 мкм ширина ліній з часом зменшується. Максимальна ширина ліній спостерігається не на самій поверхні, а в більш глибокому шарі міді. Таким чином, можна затверджувати, що при ВП у самому верхньому шарі немає скупчення дислокацій, тобто не

накопичуються пошкодження, які призводять до руйнування поверхні. При терті зразків міді зі сталлю в неактивному мастильному матеріалі (вазелиновій олії) крива зміни фізичної ширини рентгенівської лінії міді за глибиною зони деформації при терті не має спаду у верхніх шарах. Тут немає розрядження дислокацій — відбувається нагромадження пошкоджень і, як наслідок, руйнування поверхні.

Фізико-хімічні дослідження структури сервовитної плівки дали підставу висловити припущення, що матеріал плівки знаходиться в стані, подібному розплавленому. Вона не здатна до наклепу, має малі зсувні зусилля, пориста. Плівка у верхній частині не має оксидів, здатна до схоплювання, при терті її часточки можуть переходити з однієї поверхні тертя на іншу, тобто схоплюватися без утворення пошкоджень і збільшення сил тертя. Тертя бронзи по сталі в умовах ВП можна уподібнити ковзанню тіла по льоду, при якому низький коефіцієнт тертя замість води забезпечує плівка розплавленого металу:

Всі м'ясні соки містять поверхнево-активні речовини ПАР, що визначає можливість пластифікації поверхневих шарів матеріалу деталей в результаті ефекту Ребіндера і зниження сил тертя між ними. При звичайному терті оксидні плівки перешкоджають проникненню середовища (і разом з ним ПАР) до металу, чим знижується ефект Ребіндера. В результаті пластичні деформації ділянок контакту охоплюють більш глибокі шари. При ВП оксидні плівки відсутні, і дія ефекту Ребіндера реалізується повною мірою, в результаті деформується лише сервовитна плівка, підповерхневі шари металу деформації не зазнають. Оскільки молекули поверхнево-активних речовин знаходяться в порах сервовитної плівки, не виключається ковзання і всередині плівки за принципом дифузійно-вакансійного механізму, але з малою витратою енергії. Все це значно знижує тертя і зношування.

Продуктами зношування при терті з граничним мащенням є в основному оксиди, які не мають електричного заряду, вільно виносяться із зони тертя і, переміщуючись між контактуючими поверхнями, здійснюють на них абразивну дію. Тому конструктори й експлуатаційники намагаються прийняти всі міри для видалення продуктів зношування з мастильної системи.

За наявності на поверхнях тертя сервовитної плівки продукти зношування складаються з часточок міді; їх поверхня пориста і дуже активна, тому часточки покриваються адсорбційним шаром поверхнево-активних речовин. Такі часточки (міцели) мають електричний заряд і під його дією зосереджуються в зазорах. Крім того, при ВП часточки зношування можуть переноситися з однієї поверхні тертя на іншу і схоплюватися, не викликаючи пошкодження цих поверхонь.

При ВП процеси захоплення матеріалу сервовитної плівки з основою не є шкідливими, як при звичайному терті.

Водневе зношування за масштабами прояву займає одне з перших місць серед усіх видів зношування. Водень при подрібнюванні м'яса утворюється у процесі тертя як продукт розкладання водяних парів, насичених і ненасичених жирних кислот, з'єднувальних та інших тканин м'ясної сировини. Водень легко дифундує в глибину металу, сприяє утворенню зародків тріщин в результаті молізації в дефектах ґратки і, в кінцевому рахунку, викликає руйнування поверхневого шару деталей. Водневе зношування, як правило, супроводжує корозійно-механічне й абразивне зношування робочих органів м'ясоподрібнювальних машин.

Оскільки вивчення водневого зношування тільки почалося, методи захисту від нього для багатьох деталей ще не розроблені, і поки найбільш ефективним захистом є ВП. Утворена при ВП мідна плівка знижує навантаження до рівнів, при яких утворення водню практично не відбувається; крім того, мідна плівка є добрим захистом від проникнення водню в сталь.

Необхідно відзначити, що крім розглянутих факторів особлива будова і специфічні властивості сервовитної плівки (мала густина дислокацій, велика кількість вакансій) також забезпечують у сукупності зменшення сил тертя та інтенсивність зношування.

5.5. Обґрунтування вибору сталей для різальних вузлів шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків)

Машини для подрібнення м'яса і м'ясних продуктів (шнекові (вовчки), кутери, емульситатори, колоїдні млини) – складають близько половини всього діючого обладнання м'ясної промисловості. Зокрема вовчки – одні із основних машин м'ясопереробної індустрії [160, 246]. Якість отриманої продукції прямо залежить від того, наскільки якісно машина наріже м'ясо. Незадовільну роботу вовчка (пом'яте м'ясо, погано подрібнені жилки) не вдається виправити ні на кутері, ні на іншому подрібнювачі.

Принцип подрібнення кускового м'яса, що застосовується у вовчках, не змінюється протягом багатьох десятиліть: м'ясо з приймального бункера подається шнеком через корпус з внутрішніми ребрами до різального вузла, який складається з комплекту з двох або трьох нерухомих ґраток і рухомих ножів, що труться по ґратках. На якість подрібнення м'яса впливають незначні конструктивні особливості вовчків, але більше ступінь зносу різального комплекту і корпусу зі шнеком.

В роботі [192] нами було встановлено відсутність єдиної концепції, обґрунтовуючої використання тих чи інших марок сталей для виготовлення м'ясоподрібнювальних ножів. Тільки на м'ясопереробних

підприємствах м. Києва застосовують різальний інструмент з 11-ти марок сталей. За класами ці сталі можна розділити на групи: вуглецеві, низьколеговані, хромисті і швидкоріжучі. Тому для дослідження зносостійкості були вибрані зразки із сталей У10А, 9ХС, ХВГ, Х6ВФ, Х12Ф1, 55Х6В3СМФ, Х12М, Р6М5, Р18Ф2, які є представниками основних груп інструментальних сталей.

Важливо правильно вибрати сталі для виготовлення інструменту, яким притаманна висока зносостійкість. Вона може бути різною не лише для різних сталей, але і для їх поєднання у парах «рухомий ніж – гратка» при роботі у м'ясному середовищі, яке сприяє встановленню відповідних електродних потенціалів поверхонь тертя та провокує корозійно-механічне зношування інструментів [247].

Дослідженню зносостійкості різальних інструментів м'ясоподрібнювальних машин присвячено незчислена кількість робіт. Серед них треба особливо виділити роботи Чижикової Т.В. [1], Пелєєва А.І. [106], Клименка М.М. [132] та ін., якими започаткований науковий напрямок удосконалення конструкцій м'ясоподрібнювальних інструментів і підвищення їх зносостійкості.

В сучасних умовах стійкість різальних інструментів для подрібнення м'яса підвищують хіміко-термічною обробкою [225], електроіскровим легуванням [160], імпульсно-плазмовим азотуванням [248], обробкою лазером [249] та іншими методами. Важливими є також конструктивна досконалість і технологія виготовлення різальних інструментів – термообробка, шліфування і заточка, від яких прямо залежить зносостійкість [250, 251].

Разом з тим, застосовувати раціональні конструкції різальних інструментів, сучасні методи зміцнення і технології виготовлення доцільно лише тоді, коли достеменно відомі триботехнічні характеристики, притаманні тим чи іншим сталям в процесі зношування у м'ясних середовищах.

Мета цього підрозділу роботи дослідити зносостійкість інструментальних сталей з різним ступеням легування і вибрати найбільш придатні для застосування в різальних вузлах шнекових м'ясопереробних машин.

Випробовувались на зношування зразки із вуглецевої (У10А), низьколегованих (ХВГ, 9ХС), середньо- і високохромистих (Х6ВФ, 55Х6В3СМФ, Х12М, Х12Ф1) та швидкоріжучих (Р6М5, Р18Ф2) сталей у модельному розчині, що складався з м'ясного соку, відпресованого з одного зразка м'язової тканини телятини 2-ї категорії після завершення автолізу (рН5,5), жиру і води у співвідношенні 4:1:5 з додаванням 1% кісткової фракції [252].

Тестування на зношування зразків з інструментальних сталей розміром 30x15x5 мм (рис. 5.24) проводилось в лабораторних умовах за схемою «клин-диск» (рис. 5.25) на машині тертя М-22П конструкції ІПМ НАН України [253].

Зразки кріпили в утримувачі таким чином, щоб робоча площа була нахилена до дотичної циліндричного диска під кутом $2,5^\circ$. Випробовування проводили при швидкості ковзання 2 м/с і навантаженні $P=0,7$ кН. Такий режим наближено відтворює умови тертя інструментів у шнекових м'ясоподрібнювальних машинах (вовчках).

Перед випробовуванням зразки загострювали (шліфували) абразивними кругами. В лабораторії досліджували робочі поверхні лез на наявність зазублин на ріжучій крайці, припалень і вм'ятин (інструментальний мікроскоп МИМ-8), визначали радіус округлення леза (мікроскоп МИС-11 з приставкою РА-4). На мікротвердомірі ПМТ-3 оцінювали мікротвердість структурних складових сталей, а з використанням електронного мікроскопа УЕМВ-100 досліджували їх субмікроструктуру.

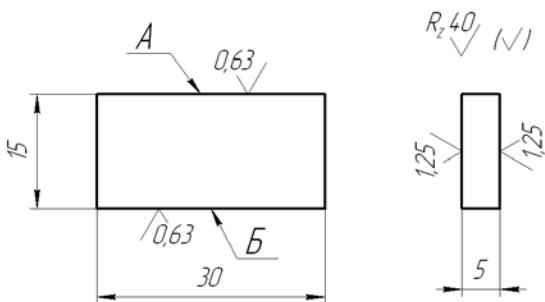


Рис. 5.24 – Зразок для випробування на зносостійкість за схемою «клин-диск»

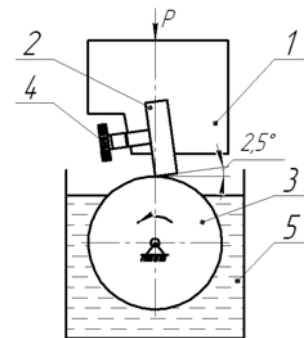


Рис. 5.25 – Схема установки пари тертя «клин-диск»: 1 – змінний утримувач; 2 – зразок; 3 – контртіло; 4 – гвинт; 5 – камера з модельним розчином

Для фінішної обробки тонких ножів і лез сталевих різців найчастіше використовують білий електрокорунд. В останні десятиліття стали більш широко використовувати круги з ельбору, який за твердістю близький до алмазу, але більш теплостійкий. Не конкуруючи з алмазом при обробці твердих сплавів і крихких матеріалів, ельбор показав високу продуктивність при обробці вуглецевих та швидкоріжучих сталей [254,255].

Для заточки ріжучих інструментів, яка забезпечує отримання шорсткості граней $Ra = 0,16 - 0,32$ мкм, найбільш часто використовуються круги з зернистістю: для електрокорундових кругів -40; для алмазних - 60/63 і для ельборових -10 [255]. Такі круги і були прийняті нами в експериментах.

Заточувались загартовані і шліфовані зразки перетином 30x15x5 мм з метою раціонального вибору характеристик круга, оптимальних режимів заточки. В лабораторних дослідженнях зразків установлювались шорсткість граней, ріжучих лез, наявність зазублин, ум'ятин, заокруглення ріжучого леза, наявність припалень і тріщин на гранях.

Встановлено, що мінімальний радіус заокруглення утворюється при заточці алмазним кругом, максимальний - при заточці кругом із ельбору, а проміжне його значення - при заточці кругом з електрокорунду білого. Радіус скруглення ріжучого леза залежить від кута загострення зразків. При куті загострення 50° він знаходиться в межах 1,5-3 мкм. Зі збільшенням кута загострення від 50 до 90° при заточці кругом з ельбору радіус заокруглення зростає в 2-3 рази. Збільшення глибини шліфування також призводить до його збільшення. При заточці периферією круга (верстат ЗГ711) радіус заокруглення більший, ніж при заточці торцем круга (верстат 3672). При збільшенні глибини шліфування від 0,01 до 0,03 мм /подв.хід радіус заокруглення зростає всього на 9...15%. Для ножів з вуглецевих, низьколегованих і швидкоріжучих сталей він менший, ніж для ножів з середньохромистих і високохромистих сталей.

Зі збільшенням глибини шліфування шорсткість задніх граней Ra зростає. Мінімальне значення Ra було у зразків, які шліфовані алмазним кругом, дещо більше - у заточених білим електрокорундом і найбільше - у заточених кругом з ельбору. Поздовжня подача і схема шліфування майже не впливали на шорсткість ріжучих лез.

Відхилення від прямолінійності ріжучих лез в усіх випадках не перевищувало 0,005 мм. Найменші відхилення були отримані при заточці алмазними кругами через їх високу ріжучу здатність [15].

Аналіз впливу схеми шліфування і характеристик шліфувальних кругів на утворення ум'ятин і зазублин на лезах показав більшу імовірність їх утворення при обробці торцем круга і у випадку використання ельборових кругів і кругів з електрокорунду білого [14,15].

Таким чином, використовуючи круги із синтетичного алмазу, непрямолінійність, шорсткість і радіус заокруглення ріжучого леза можна отримати мінімальними, але, досліди показали, що зразки, оброблені синтетичним алмазом і електрокорундом, мають на задній грані значні тріщини і припалення (рис. 5.26).

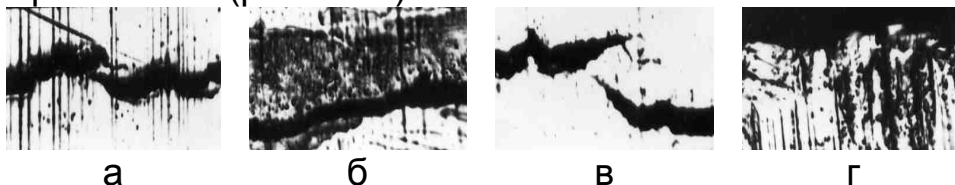


Рис. 5.26 – Тріщини і припалення робочих граней при шліфуванні кругом АСР80/63 Б1 ·100% АПП 200×10×3×32 зразків із сталей: а – У10А, б – 9ХС, в – Х12Ф1, г – Р6М5, ×500

В результаті дослідження мікротвердості прилезових ділянок зразків за методикою, викладеною в [254], при обробці сталей електрокорундовим і алмазним кругами на режимах $V_{кр} = 35$ м/с; $S_n = 12$ м/хв, $t = 0,02$ мм/подв.хід встановлено, що в досліджених зразках можуть бути виділені такі зони: зовнішня - шар вторинного загартування з підвищеною мікротвердістю, прилегла до неї - шар вторинного відпуску з пониженою мікротвердістю і, потім, основний метал.

Поблизу ріжучого леза мікротвердість нестабільна через взаємовплив процесів вторинного загартування і відпуску. У ножів з вуглецевих і середньохромистих сталей зона зміненого ("зіпсованого") матеріалу при заточці електродкорундовим і алмазним кругом поширюється на глибину 30-40 мкм, а при заточці ельборовим кругом - на глибину 20-30 мкм від ріжучої крайки. У ножів з середньохромистих, високохромистих і швидкоріжучих сталей зона вихідного матеріалу знаходиться на відстані 20-30 мкм від ріжучої крайки при їх заточці алмазними і електрокорундовими кругами і 5-15 мкм - при заточці кругами з ельбору (рис. 5.27). Таким чином заточка ельбором є більш перспективною.

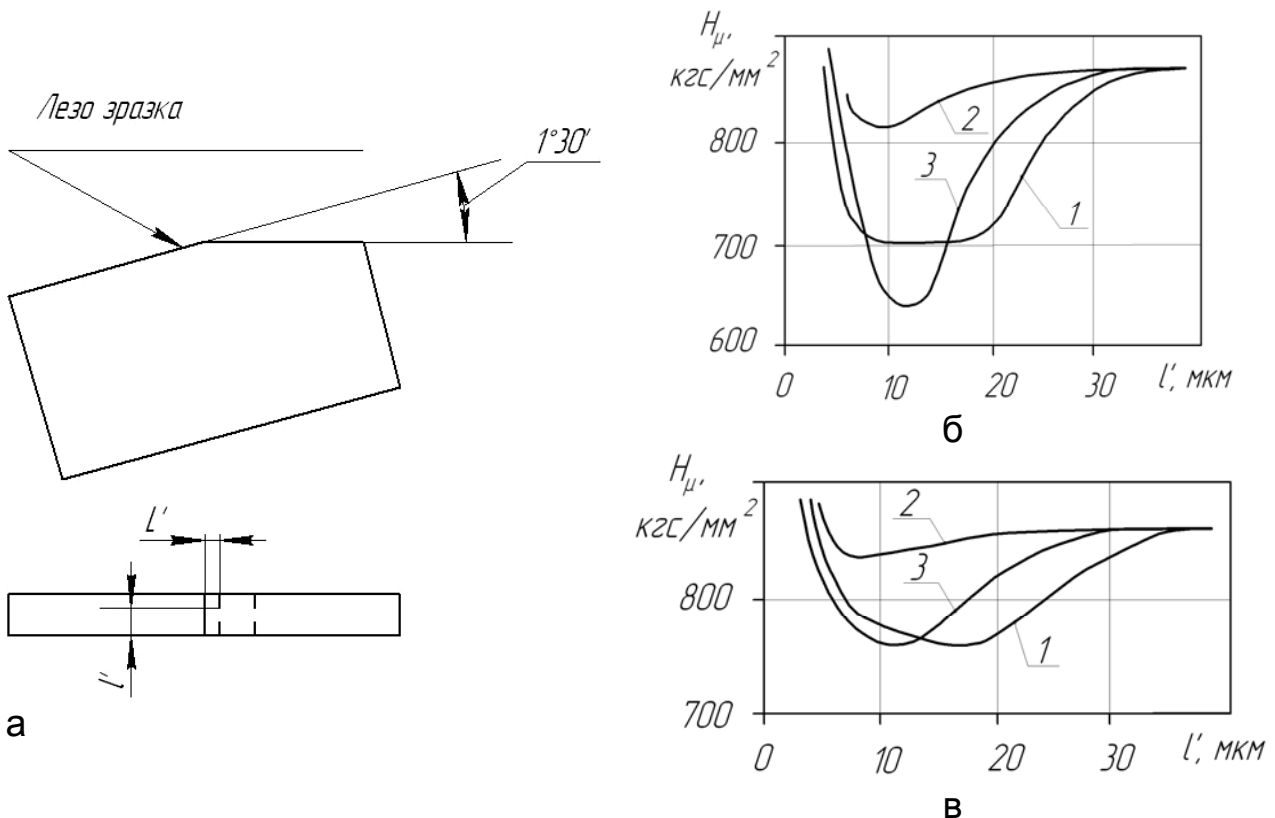


Рис. 5.27 – Розташування площини шліфа і відбитків індентора (а) при вимірюванні мікротвердості ножів із сталі Р6М5 та характер зміни останньої при віддаленні від передньої грані ножа l' і постійній відстані від задньої грані $L=10$ мкм (б) та $L=20$ мкм (в) при загостренні кругами: 1 – електрокорундовим, 2 – ельборовим, 3 – алмазним

Електронні мікрофотографії, виконані на мікроскопі УЕМВ-100 (рис. 5.28), дозволяють стверджувати, що в зоні вихідного матеріалу ножів із сталі ХВГ більша густина карбідів типу Fe_3C з твердістю 860...1250 HV, а також карбідів типу FeW_3C і $Cr_{23}C_6$ з твердістю 1000-1100 HV. В зоні вторинного загартування, через перехід карбідів у твердий розчин, їх щільність дещо зменшується, а твердість зони зростає. Підвищена щільність карбідів і недостатня їх твердість може призвести до низької стійкості ножів із сталі ХВГ. Менша щільність і величина карбідів у середньохромистих сталях (Х6ВФ і 55Х6В3СМФ), а також більш висока їх твердість можуть забезпечити вищу стійкість ріжучих інструментів.

З наведеного аналізу способів фінішної обробки ріжучих інструментів і використавши експериментальний матеріал можна зробити наступні висновки: 1) найбільш якісна заточка забезпечується периферією круга при застосуванні ельбору; 2) для заточки ножів із сталей У10А;ХВГ; 9ХС; Х6ВФ; 55Х6В3СМФ; Х12М; Х12Ф1; Р6М5; Р18Ф2 треба використовувати режими $V_{кр} = 35$ м/с; $S_{позд} = 12-16$ м/хв; $t = 0,01$ мм/подв.хід з наступним 2-3 – кратним виходжуванням і охолодженням 1,5 -2% емульсією з витратою 22-40 л/хв [255, 256].

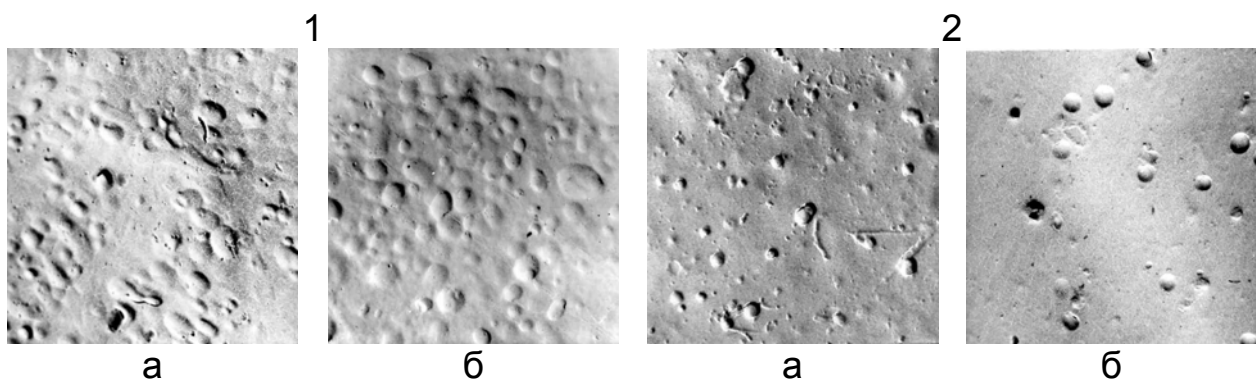


Рис. 5.28 – Зона вихідного металу (а) і вторинного загартування (б) зразків із сталей ХВГ (1) і 55Х6В3СМФ (2) після шліфування кругом Л10Б156 100% ЛЧК 125×10×3×32, ×5000

Заточені ельбором на вибраних режимах зразки піддались випробуванню на зношування у модельному м'ясному середовищі за схемою «клин-диск» (див. рис. 5.25). Раніше нами було доведено [256], що м'ясорізальні ножі виходять з ладу при їх спрацюванні до утворення фаски зносу 0,3 мм. З урахуванням того, що кут загострення зразків був $\delta=90^\circ$, то така фаска виникала при лінійному зносі зразка у напрямку бісектриси кута загострення близько $A_{\mu}=0,15$ мм. Тому, при такому лінійному спрацюванні випробування зразків на зносостійкість припинялись.

На гістограмі (рис. 5.29) показана стійкість зразків при терті з контртілами з різних сталей з номенклатури тих, що були вибрані для досліджень (пройдений шлях тертя до досягнення зносу $A_{\mu}=0,15$ мм).

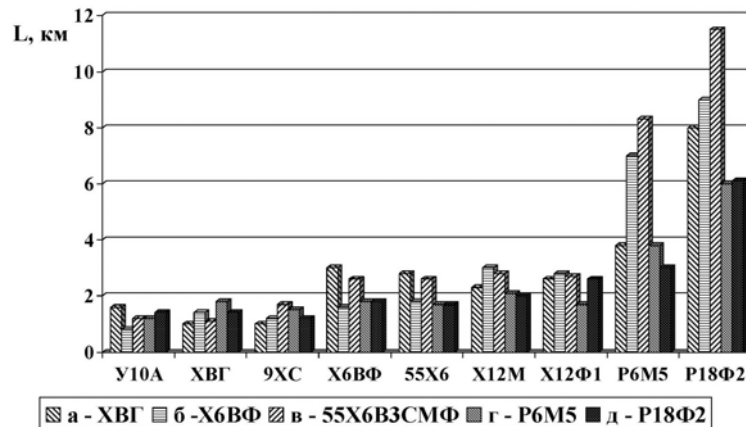


Рис. 5.29 – Шлях, пройдений ріжучими крайками зразків з випробуваних сталей, до утворення фаски зносу $f=0,3$ мм при терті в парі з контртілами із сталей: а – XBG, б – X6BФ, в – 55X6B3CMФ, г – P6M5, д – P18Ф2

Випробовувані сталі для м'ясорізальних інструментів у порядку зростання зносостійкості можна поділити на три групи: 1) низької зносостійкості – вуглецеві та малолеговані; 2) середньої зносостійкості – середньо- та високохромисті, зносостійкість яких в 1,5-2 рази вища від зносостійкості сталей першої групи; 3) високої зносостійкості – швидкорізучі, зносостійкість яких в 5-10 разів вища за зносостійкість сталей першої групи.

Результати лабораторних випробувань були перевірені у виробничих умовах Київського експериментального м'ясопереробного заводу «Дарницький» на вихідних різальних інструментах шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків) типу МП-160 (рис. 5.30).

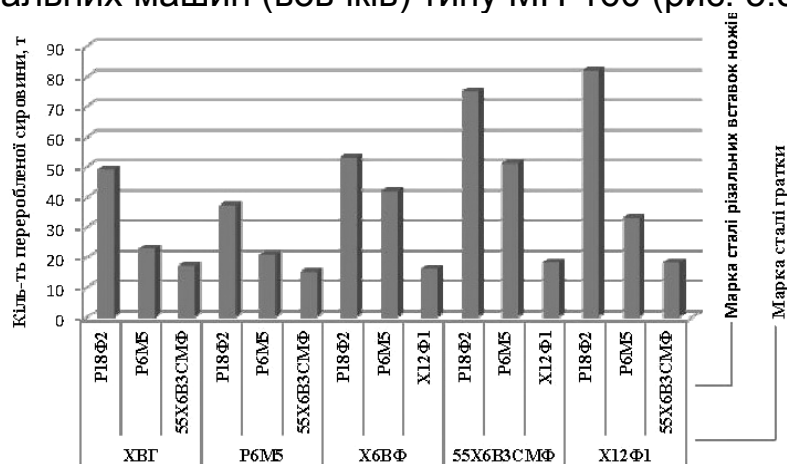


Рис. 5.30 – Результати випробувань на зношування різальних комплектів шнекових м'ясоподрібнювальних машин (вовчків) при подрібненні дефростованої яловичини першої і другої категорії

Випробовування показали досить задовільну кореляцію з результатами лабораторного тестування сталей. Очевидно, що найбільшу зносостійкість мають рухомі ножі з швидкоріжучих сталей при їх застосуванні у парі з ґратками з сталей 55Х6В3СМФ та Х12Ф1, які можуть подрібнювати від 50 до 80 т яловичини.

Виходячи з проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Найбільш перспективними для виготовлення інструментів шнекових подрібнювальних машин є швидкоріжучі, а також середньо- і високохромисті сталі.

2. Малолеговані сталі через карбідну неоднорідність мікроструктури не забезпечують високої стійкості м'ясорізальних інструментів.

3. Найвищої зносостійкості подрібнювальних інструментів можна досягти поєднуючи середнє і високе легування сталей з раціональними режимами загострювання ножів кругами з кубічного нітриду бору.

Розділ 6. Прогнозування і забезпечення надійності м'ясоподрібнювальних машин

6.1. Методика прогнозування показників надійності

Закономірності корозійно-механічного зношування деталей обладнання в технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв АПК є функціями випадкових аргументів, тому що зовнішні фактори (стан середовища, навантаження, швидкість ковзання), характеристики матеріалів (твердість, межа міцності) і умови експлуатації є випадковими величинами. Тому прогнозування надійності машин і апаратів повинно зводитись до визначення імовірності безвідмовної роботи і строку служби. При вирішенні цієї задачі необхідно спиратися на закономірності теорій імовірності та надійності [257-259].

Можна припустити, що корозія і зношування (зміна параметру виробу) відбуваються за лінійним законом:

$$X = K \cdot t, \quad (6.1)$$

де K - швидкість протікання процесу (корозії і зношування), t - час.

Найбільш характерний випадок, коли швидкість зношування або корозії підвладна нормальному закону, тому що вона залежить від великої кількості випадкових факторів: навантаження, швидкості ковзання, температури, складу технологічного середовища тощо. Виходячи з цього можна записати:

$$f_0(k) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(k-K_{cp})^2}{2\sigma_k^2}}, \quad (6.2)$$

де $f_0(k)$ - щільність імовірності; K_{cp} - середнє значення швидкості зношування або корозії (зміни вихідного параметру X); σ_k - середнє квадратичне відхилення швидкості зношування або корозії. При $X=X_{max}$ настає граничний стан, який визначає строк служби виробу $t=T$, як функцію випадкового аргументу K [259]:

$$T = \varphi(k) = \frac{X_{max}}{K} \quad (6.3)$$

Середній строк служби виробу

$$T_{cp} = \frac{X_{max}}{K_{cp}} \quad (6.4)$$

Важливо визначити ресурс обладнання, що піддається зношуванню і корозії за заданою імовірністю безвідмовної роботи. Розв'язок задачі полягає в знаходженні імовірності безвідмовної роботи $P(T)$ по заданій функції $f_0(K)$. Для функцій випадкового аргументу в теорії імовірностей використовується формула [257] :

$$f(T) = f_0(\psi(T)) \cdot (\psi'(T)) \quad (6.5)$$

де $\psi(T)$ - обернена функція $\varphi(k)$, і $\psi(T) = X_{\max} / T$, $\psi'(T) = -(X_{\max} / T^2)$ - похідна цієї функції. Підставляючи ці значення в (6.5) і роблячи перетворення, отримуємо :

$$f(T) = \frac{T_{cp}}{\gamma_K \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{T^2} \cdot e^{-\frac{(T_{cp}-T)^2}{2\gamma_K^2 T^2}}, \quad (6.6)$$

де $\gamma_K = \sigma_K / K_{cp}$ - коефіцієнт варіації (безрозмірна величина).

Для зручності розрахунків введемо безрозмірний час (в долях від T_{cp}):

$$\tau = T / T_{cp} \quad (6.7)$$

Тоді формула прийме вигляд

$$f(\tau) = \frac{1}{\gamma_K \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\tau^2} \cdot e^{-\frac{(1-\tau)^2}{2\gamma_K \tau^2}}, \quad (6.8)$$

де $f(\tau) = f(T)$; $T = \tau \cdot T_{cp}$. Ця формула зручна тим, що щільність імовірності є функцією лише одного безрозмірного параметру γ_K . Для визначення імовірності відмови $F(T)$ необхідно проінтегрувати функцію щільності імовірності :

$$F(T) = \int_0^T f(T) dT = \int_0^\tau f(\tau) d\tau = F(\tau) \quad (6.9)$$

$$Z = \frac{1-\tau}{\gamma_K \cdot \tau}$$

Якщо ввести змінну $Z = \frac{1-\tau}{\gamma_K \cdot \tau}$, то даний інтеграл зводиться до функції Лапласа і, враховуючи, що ймовірність безвідмовної роботи визначається $P_u(T) = 1 - F(t)$, отримуємо :

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{1-\tau}{\gamma_K \cdot \tau}\right), \quad (6.10)$$

де Φ - нормована функція Лапласа.

Формулу (6.10) можна записати в іншому вигляді, виразивши через параметри X_{\max} , K_{cp} і σ_K , які є вихідними у розв'язанні поставленої задачі.

Враховуючи залежності (6.4) і (6.7) отримуємо:

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left(\frac{X_{\max} - K_{cp} T}{T \cdot \sigma_K}\right) \quad (6.11)$$

Розглянута схема розрахунку є дещо ідеалізованою, тому що не враховує розсіювання початкового параметру виробу (точність

виготовлення, твердість матеріалу тощо). З врахуванням цих параметрів рівняння (6.1) запишеться так:

$$X = a + Kt, \quad (6.12)$$

де a - початковий параметр деталі.

Термін служби є функцією двох незалежних випадкових аргументів a і K :

$$T = \frac{X_{\max} - a}{K}, \quad (6.13)$$

У випадку розподілу аргументів a і K за нормальним законом параметр X для кожного значення $t=T$ буде розподілений по такому ж закону з параметрами:

$$X_{cp} = a_0 + K_{cp}T; \quad \sigma_K = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \cdot \sigma_K^2}, \quad (6.14)$$

де a_0 - математичне сподівання; σ_a - середнє квадратичне відхилення випадкового параметру a .

$P_u(T)$ можна визначити, враховуючи, що імовірність безвідмовної роботи виробу дорівнює імовірності того, що параметр X при заданому $t=T$ не вийде за межі максимально допустимого значення X_{\max} :

$$P_u(T) = I_{\text{мов}}(X \leq X_{\max}) \quad (6.15)$$

Тому імовірність безвідмовної роботи чисельно дорівнює площі під кривою щільності розподілу $f(x)$ в межах від $-\infty$ до X_{\max} :

$$P_u(T) = \int_{-\infty}^{X_{\max}} \frac{1}{\sigma_K \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - x_{cp})^2}{2\sigma_K^2}\right) dx = 0,5 + \Phi\left(\frac{x_{\max} - x_{cp}}{2\sigma_K}\right) \quad (6.16)$$

Підставляючи в цю формулу (6.14) отримаємо:

$$P_u(T) = 0,5 + \Phi\left[\frac{X_{\max} - a_0 - K_{cp}T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T^2}}\right] \quad (6.17)$$

При $a_0=0$ і $\sigma_a=0$ ця формула перетворюється в формулу (6.11).

Деталі технологічних машин, які працюють в технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв, одночасно з поступовими відмовами мають і раптові. Причини виникнення останніх пов'язані не лише зі зміною стану деталей, але й з небажаним співвідношенням діючих факторів.

Побудова моделі раптової відмови пов'язана з аналізом умов експлуатації машини, режимів її роботи, можливістю виникнення екстремальних навантажень і активного впливу технологічного середовища. Імовірність безвідмовної роботи у цьому випадку описується експоненційним законом:

$$P_e(T) = e^{-\lambda T}, \quad (6.18)$$

де λ - інтенсивність.

При сумісній дії поступових і раптових відмов імовірність безвідмовної роботи може бути підрахована за теоремою множення імовірностей.

$$P(T) = P_u(T) \cdot P_e(T) \quad (6.19)$$

Використовуючи (6.17) і (6.18) отримаємо:

$$P(T) = \left[0,5 + \Phi \left(\frac{X_{\max} - a_0 - K_{cp} \cdot T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T^2}} \right) \right] \cdot e^{-\lambda T} \quad (6.20)$$

Таким чином, якщо відомі закономірності розподілення T_{cp} , σ , λ , то можна підрахувати імовірність безвідмовної роботи деталі, вузла чи машини в цілому.

В початковий період роботи машини на імовірність безвідмовної роботи в основному впливають раптові відмови, а потім все більшого значення набувають поступові. В деяких випадках фізика відмов настільки складна, що поєднує в собі елементи як зносних, так і раптових відмов. Наприклад, вихід з ладу деталей по причині втоми пов'язаний з розвитком тріщин в зоні місцевої концентрації напружень, технологічного дефекту або початкового пошкодження. При цьому період часу до зародження мікротріщини характеризується ознаками поступової відмови, а процес руйнування – раптової.

Розглянемо приклад використання викладеної методики для розрахунку показників надійності кутера у м'ясопереробному виробництві, який працює в корозійно-активному середовищі – м'ясному фарші з добавками солі і спецій.

Нехай відомі наступні вихідні дані:

– середня швидкість корозійно-механічного зношування чаші кутера $K_{cp}=1$ мм/рік;

– середнє квадратичне відхилення швидкості корозії $\sigma_K = 0,07$ мм/рік ;

– середнє квадратичне відхилення початкового параметру $\sigma_a = 0,2$ мм ;

З умов функціонування кутера визначена допустима величина корозійно-механічного зносу $X_{\max}=2$ мм (товщина захисного покриття на корпусі).

Є потреба розрахувати ресурс чаші кутера по базовій деталі (чаші) при заданій імовірності безвідмовної роботи $P(T)$ від 0,9 до 0,9999.

З формули (6.17) отримаємо для визначення T квадратне рівняння:

$$U_\alpha \cdot \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_K^2 \cdot T} = X_{\max} - a_0 - K_{cp} \cdot T \quad (6.21)$$

Порядок розрахунку полягає в тому, що для заданого значення $P(T)$ по таблицях для квантилей нормального розподілення випадкових величин знаходимо відповідні значення U_α та з рівняння (6.21) визначаємо ресурс T . При $P(T) = 0,5$, квантилі $U_\alpha = 0$, з врахуванням (6.21) і (6.13) отримаємо середній строк служби чаші кутера:

$$T_{cp} = \frac{X_{\max} - a_0}{K_{cp}} \quad (6.22)$$

Таким чином, середній строк служби базової деталі (чаші) кутера дорівнює

$$T_{cp} = \frac{2 - 0}{1} = 2 \text{ роки}$$

Підставивши у формулу (6.21) значення вихідних даних і, розв'язавши квадратне рівняння відносно T , отримаємо формулу для розрахунку по даній квантилі:

$$T = \frac{K_{cp} X_{\max} + \sqrt{K_{cp}^2 X_{\max}^2 + (U_\alpha^2 \sigma_K^2 + K_{cp}^2) \cdot (U_\alpha^2 \sigma_a^2 - X_{\max}^2)}}{K_{cp} - U_\alpha^2 \sigma_K^2} \quad (6.23)$$

Результати розрахунків зведемо в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Залежність ресурсу чаші кутера від імовірності безвідмовної роботи

Імовірність безвідмовної роботи $P(T)$	Квантиль	Ресурс T , років
0,9	1,282	1,701
0,99	2,326	1,476
0,999	3,090	1,319
0,9999	3,719	1,194

З наведених розрахунків виходить, що вибір ресурсу повинен бути достатньо точним, тому що невеликі його зміни можуть значно вплинути на імовірність безвідмовної роботи.

Запропонована методика розрахунку дозволяє на основі апріорної вихідної інформації про стан машин і можливі умови їх експлуатації розрахувати ресурс за необхідної ймовірності безвідмовної роботи, визначити які заходи будуть найефективнішим для підвищення надійності обладнання та кількісно оцінити значимість кожного.

6.2. Ефективні засоби підвищення надійності деталей м'ясоподрібнювальних машин

Під час роботи різальні інструменти м'ясоподрібнювальних машин швидко зношуються, якість фаршу різко знижується, споживана потужність обладнання зростає до 20%. При відновленні різальних властивостей інструментів перешліфовуванням з їх поверхонь

видаляється зміцнений термооброблення чи наплавленням шар металу, а тому, в процесі подальшої експлуатації, інтенсивність зношування помітно зростає, що негативно позначається на якості фаршу і збільшує енергозатратність процесу. Відсутність якісних м'ясорізальних інструментів спричиняє часті зупинки обладнання, що, інколи, призводить до простоїв м'ясопереробних ліній, обумовлює псування напівпродуктів. Тому підвищення зносостійкості і довговічності різальних інструментів, забезпечення можливості відновлення їх працездатності позитивно впливає на показники надійності м'ясоподрібнювальних машин і є важливою народногосподарською задачею.

Нині низька зносостійкість робочих органів технологічного м'ясоподрібнювального обладнання, зокрема, м'ясорізальних інструментів не забезпечує належного рівня його експлуатаційної надійності [236]. Враховуючи сучасні тенденції розвитку м'ясної промисловості, направлені на покращення якості продукції, підвищення властивостей надійності машин і агрегатів, а також на інтенсифікацію виробничих процесів, задача підвищення зносостійкості деталей м'ясоподрібнювального обладнання є досить актуальною [237,238,239].

Розв'язати її можна завдяки вибору перспективних захисних покриттів для зміцнення робочих поверхонь різальних інструментів м'ясоподрібнювального обладнання з урахуванням властивостей перероблюваної сировини.

У промисловості все частіше застосовуються інструментальні матеріали з покриттям, які є типовими композитами, що мають високу зносостійкість у поєднанні з задовільною міцністю, ударною в'язкістю, тріщиностійкістю. Застосування захисних покриттів дає можливість більш повно використовувати фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів, підвищувати працездатність і основні показники надійності різальних інструментів при обробці різноманітних матеріалів [240].

Застосовувані для м'ясорізальних інструментів покриття повинні мати високу адгезійну та когезійну міцність, твердість, чинити достатній опір корозійно-механічному спрацюванню, зберігати працездатність у широкому діапазоні температур, не мати значних дефектів структури. З огляду на основне призначення, покриття для м'ясорізальних інструментів повинні мати твердість, яка в 1,5-2 рази перевищує твердість матеріалу основи, низьку схильність до фізико-хімічної взаємодії з оброблюваною сировиною, мінімальну відмінність кристалічних ґраток покриття і основи [238].

Властивості захисних покриттів суттєво залежать від вибору методу і режимів їх формування на різальних інструментах. Наприклад, від температури, за якою відбувається формування покриття, залежить його структура та міцність адгезії з основою. Матеріали покриття та

інструменту не повинні створювати крихких інтерметалідів при термомеханічному навантаженні, яке виникає при різанні.

Проведені дослідження по зміцненню різальних інструментів нітридами, карбідами, боридами й оксидами металів показали, що вони мають високу твердість, теплостійкість, хімічну стійкість і зносостійкість [241].

Для захисту інструментальних матеріалів широко застосовують покриття на основі титану, серед яких найбільш розповсюджені покриття нітридом титану (TiN), що утворюється в результаті реакції Ti з N₂ чи NH₃, а також покриття карбідом титану (TiC) [242].

Фірма «Sandvik Coromant AG» вперше почала випуск інструментальних твердосплавних пластин з покриттям з TiC, TiC-Al₂O₃, а також широко використовує різні композиції TiC, TiN, ZrC, ZrN, HfC, HfN і Al₂O₃ для зміцнення різального інструменту.

Вперше такі зносостійкі покриття були отримані шляхом хімічного осадження за високих температур (950-1050°C) з парогазового середовища (рис. 6.1). Цей процес прийнято скорочено називати CVD (Chemical Vapor Deposition). Варто відмітити, що ця технологія широко застосовується не лише для нанесення зносостійких покриттів на різальні інструменти, але також в інших областях техніки, де потрібно отримати на деталях плівки з кристалічних матеріалів із заданою структурою.

Покриття з TiC-TiN, TiN і HfN, нанесені на твердосплавні пластини, перспективні для використання у різальних комплектах м'ясопереробних машин, перешкоджають утворенню крихкої η-фази (Co₃W₃C) на поверхні твердого сплаву. Відомі покриття з TiN, (Ti,Al)N, (Ti,Cr,Al)N Mo₂N, Cr₂O₃, які широко використовуються для нанесення на тверді сплави та швидкоріжучі сталі (рис. 6.2) [243]. Ефективність застосування покриттів залежить від оброблюваного інструментом матеріалу.

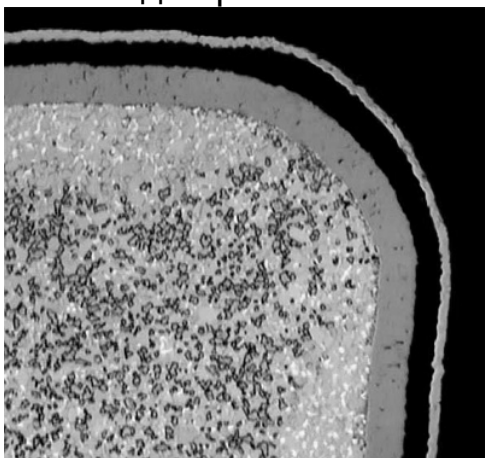


Рис. 6.1 – Типова структура покриття, осадженого за технологією CVD на твердому сплаві

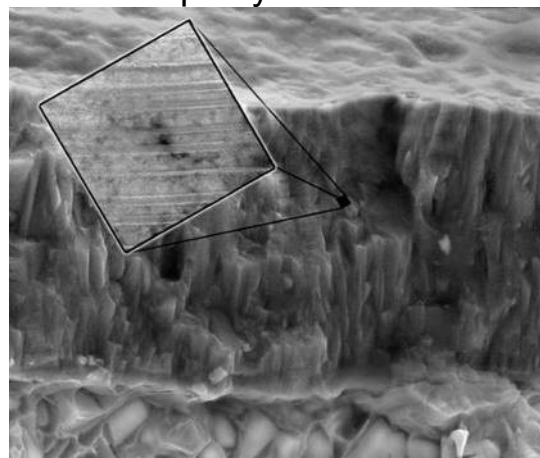


Рис. 6.2 – Структура зносостійкого покриття (Ti,Al)N

Для захисту робочих поверхонь різальних інструментів часто використовують покриття з ZrO_2 , рідше - з карбідів Nb, крім того відомі випадки застосування покриттів з VC, TiB_2 , B_4C , SiC, SiO_2 , Si_3N_4 . Використання композиційного покриття (Ti-Zr)-(Ti-Zr)N дозволяє збільшити зносостійкість, мікротвердість, опір пластичному деформуванню зміцненої поверхні, збільшити теплостійкість інструментів з швидкоріжучої сталі, і зменшити зношування при різанні інструментом з твердого сплаву [244].

Найбільш поширеними композиціями для зміцнюючих покриттів є карбіди та нітриди титану, цирконію, гафнію, а також оксиди алюмінію та хрому.

Зносостійкі покриття на різальних інструментах зазвичай складаються із сполук, які є дуже твердими і крихкими. Одним із способів зниження крихкості таких покриттів є зменшення їх товщини. Високі міцнісні властивості тонких покриттів пов'язані з тим, що крихкі властивості, які притаманні твердим матеріалам, не проявляються при їх малій товщині. Разом з тим, тонкі покриття мають малу довговічність в умовах, наприклад, абразивного зношування, яке притаманне інструментам, що подрібнюють м'ясну сировину з вкрапленням дрібних кісток. Тому застосування принципу багат шаровості захисних покриттів дозволяє нанести покриття необхідної товщини, запобігши збільшенню крихкості поверхневого шару.

Багат шарові покриття, як правило, є багатофункціональними. Вони поєднують високу твердість, зносостійкість, опір окиснюванню та фізико-хімічній взаємодії з оброблюваним матеріалом, мають малий коефіцієнт тертя, підвищують стійкість до абразивного зношування. Кожний із шарів у багат шаровому покритті може виконувати різні функції. Проміжні шари можуть поступово змінювати коефіцієнт термічного розширення і модулі пружності у напрямку від основи до поверхневого шару. Поєднання різних способів поверхневого зміцнення різальних інструментів дозволило наносити дво- і багат шарові покриття [244].

Для інструментальних твердих сплавів часто застосовують двох шарові покриття $TiC-Al_2O_3$, Al_2O_3-TiC , Al_2O_3-TiN , $TiN-TiC$, $TiC-TiN$. Двох шарове покриття з зовнішнім шаром із нітриду титану істотно підвищує стійкість різальних інструментів у порівнянні з одношаровим TiN -покриттям. Найбільшу стійкість, за інших рівних умов різання твердосплавним інструментом, мають покриття $TiC-TiCN-TiN$ і $TiC-Al_2O_3$. Ефект теплового захисту основи інструментів з швидкоріжучих сталей дає проміжний шар Al_2O_3 через його низьку теплопровідність [242,243].

На підставі аналізу матеріалів покриттів для зміцнення різальних інструментів можна зробити висновок, що в даний час у розробці матеріалів для покриттів спостерігаються два підходи. Перший - полягає

у створенні багат шарових покриттів. Кожен шар у таких покриттях виконує власну функцію і забезпечує поступовий перехід фізико-механічних властивостей покриття від поверхні до основи. Другий - полягає у створенні багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині покриття. Разом з тим, ці методи значно підвищують вартість технологій отримання зносостійких покриттів і знижують рівень надійності покриття, тому що брак в одному із його шарів призводить до зниження якості всього покриття.

Іонне азотування деталей та інструментів. Останнім часом в промисловості для отримання захисних покриттів використовується порівняно новий спосіб – іонне азотування (азотування у тліючому розряді), який має ряд переваг перед стандартним пічним азотуванням.

Досліди показали, що зносостійкість сталі 38ХМЮА після іонного азотування в аміаку в 2...3 рази вища, ніж після газового азотування. Крім підвищення твердості і товщини зносостійкого шару іонне азотування, у порівнянні з газовим, підвищує зносостійкість сталей на 20...50%. Відмічається також суттєве (у 2...8,5 рази) підвищення зносостійкості азотованих низьколегованих інструментальних сталей. Зносостійкість азотованих сталей в 1,5...4 рази вища від загартованих, цементованих, нітроцементованих і ціанованих сталей [236,238].

Іонне азотування дозволяє підвищити довговічність деталей, які експлуатуються у кислих і слабокислих середовищах, у тому числі і в середовищі м'ясного соку в 2...3 рази. Зносостійкість азотованих вуглецевих сталей у дистильованій воді в 4...10 разів вища, ніж покращених, нормалізованих і цементованих [236,238]. Все це стає можливим завдяки високій твердості азотованих шарів (рис. 6.3).

Робіт, присвячених дослідженню довговічності азотованих в тліючому розряді матеріалів в технологічних середовищах м'ясопереробної промисловості, надзвичайно мало. Не виявлено також даних про вплив виникаючих в результаті іонного азотування залишкових напружень на довговічність деталей, які працюють в умовах корозійно-механічного зношування в технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв.

При терті в корозійно-активних м'ясних середовищах поверхні інструментів повинні мати не лише високу зносо- і корозійну стійкість, але також високий опір електрохімічній корозії. Корозійна стійкість азотованої поверхні збільшується з підвищенням вмісту азоту в сталі, тобто видалення найбільш багатой азоту ε-фази знижує корозійну стійкість азотованих деталей. Відомо також, що максимальна корозійна стійкість спостерігається у тому випадку, коли всередині ε-фази з високим вмістом азоту розсіяна γ'-фаза [245].

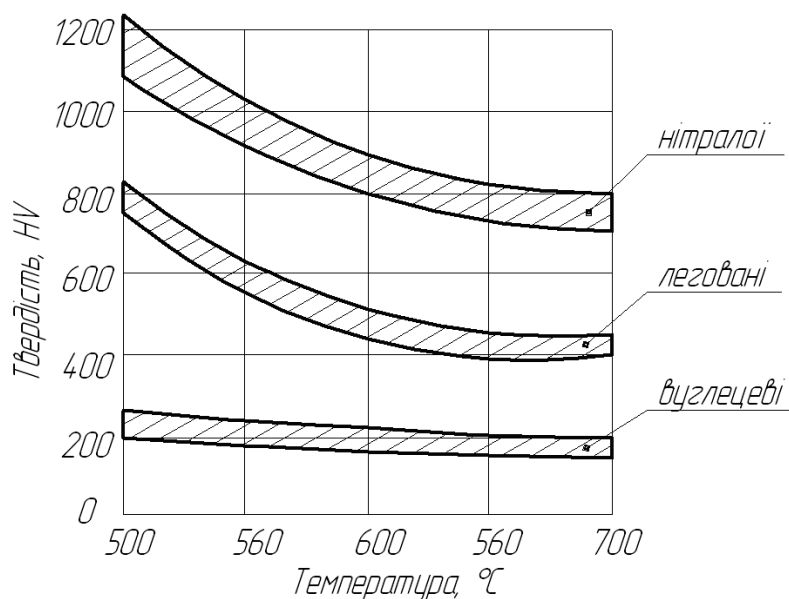


Рис. 6.3 – Залежність твердості азотованого шару від температури азотування і класів сталей [245].

Таким чином, літературні дані про властивості азотованих інструментальних матеріалів недостатні, щоб оцінити їх стійкість в технологічних середовищах м'ясопереробних виробництв. Тому необхідне подальше комплексне вивчення механізму корозійно-механічних процесів, які відбуваються на азотованих поверхнях матеріалів. Такі дані про зв'язок інтерактивності корозійно-механічного зношування зі структурою матеріалів і покриттів необхідні для їх обґрунтованого вибору.

Лазерне, електроіскрове, плазмове і детонаційне зміцнення. Лазерне зміцнення інструменту полягає в потужному імпульсному (або безперервному) впливі світлового випромінювання з надзвичайно високою густиною енергії, що викликає локальні миттєві нагрівання його поверхні до високих температур, які перевищують не тільки температури структурно-фазових перетворень у металі, але і температуру плавлення. При високих швидкостях наступного охолодження на поверхні інструмента формується дрібнозерниста або навіть псевдоаморфна структура, що має підвищену (на 20...30%) твердість [237]. Лазерне зміцнення дозволяє проводити як поверхневе гартування без нагрівання основної частини різального інструменту і без застосування гартувальних середовищ, так і поверхневе легування, а також можливе поєднання цих процесів. Лазерна обробка дозволяє зміцнювати різальний інструмент з вуглецевих, легованих і швидкоріжучих сталей і твердих сплавів скануючим електронним променем. Оплавлення і швидке охолодження інструментальних і швидкоріжучих сталей

найчастіше забезпечує утворення на їх поверхнях мартенситної структури.

Електроіскрове легування є одним з перспективних способів зміцнення робочих поверхонь інструментів. Сутність електроіскрової обробки полягає у легуванні поверхневого шару різального інструменту матеріалом вібруючого електрода при іскровому розряді в повітряному або технологічному (газовому чи рідкому) середовищі. В результаті взаємодії електрода з технологічним середовищем та з матеріалом різального інструменту, в поверхневих шарах утворюються високодисперсні нітриди, карбіди, карбонітриди тощо. Нанесення покриття не супроводжується розігріванням тіла інструмента через короткочасність імпульсів іскрового розряду, що дає можливість зміцнювати різальний інструмент практично з усіх інструментальних матеріалів [238].

Плазмовими методами іонного осадження називаються методи, у яких для утворення іонного потоку на основу використовується газовий розряд при розрідженні у технологічній камері. Нагрівання матеріалу, що випаровується і створює іонний потік, проводиться електронно-променевим способом із застосуванням газорозрядної гармати. Процес плазмового напилення, поєднаний з цільовими хімічними перетвореннями, є одним з методів, за допомогою якого можна отримати новий клас покриттів, які можуть мати синтезовані у плазмі нітриди, карбіди, оксиди [236,238].

Детонаційний метод напилювання полягає в збагаченні часток, які напилюють, продуктами детонації, їх розігріванні, прискоренні і викиданні через дуло детонаційної гармати на поверхню інструмента. Процес формування детонаційних покриттів в основному полягає в розтіканні і кристалізації рідких часток по поверхні основи. В результаті одиничного циклу формується покриття товщиною 5-6 мкм. Температура осадження покриття не перевищує 200°C [236].

З метою підвищення якості та усунення експлуатаційних недоліків покриттів в технологіях їх формування спостерігаються дві основні тенденції - розвиток багатоопераційних процесів зміцнення та нанесення багат шарових і багатофункціональних покриттів.

Захисні покриття дискретного типу. Для підвищення зносостійкості інструментів різної форми на їх робочих поверхнях створюють ділянки з компактним розміщенням більш твердих матеріалів у м'якшій матриці з регулярним рельєфом, геометричні параметри якого можуть змінюватись у широких межах. Для інструментів, які працюють у важких умовах, як інструменти м'ясоподрібнювальних машин, пропонується застосовувати саме захисні покриття дискретного типу і

створювати на їх основі композиційні структури з високою зносостійкістю [245].

Технологія формування покриттів дискретного типу полягає в тому, що суцільний шар покриття замінюють переривчастим (фрагментованим). Такі композиції дозволяють зберегти екрануючу функцію суцільних покриттів і, одночасно з цим, уникнути таких недоліків покриттів суцільного типу, як когезійне розтріскування та адгезійне відшарування. Застосування покриттів дискретної структури на різальних інструментах показали їх високу експлуатаційну ефективність. Навіть при експлуатації у важких умовах різальний інструмент з дискретними нітридтитановими покриттями забезпечує значно більше підвищення зносостійкості, ніж з суцільними [245].

Крім того, дискретна структура поверхневого шару забезпечує проникнення змащувального середовища в зону тертя, що сприяє утворенню зносостійких вторинних структур та охолодженню робочих поверхонь інструментів. Утворений мікрорельєф призведе до локалізації продуктів зношування в заглибленнях та виключить їх попадання в перероблювальний м'ясопродукт.

Не існує загальної концепції, яка б чітко визначала необхідні фізико-механічні та геометричні характеристики покриттів дискретного типу, що забезпечують отримання високих показників зносостійкості робочих поверхонь інструментів з покриттями. Крім того, зовсім не досліджений вплив конструкції та типу покриття на працездатність робочих поверхонь м'ясорізальних інструментів, які працюють у важких умовах експлуатації і піддаються дії корозійно- і поверхнево-активних м'ясних середовищ.

Виходячи з викладеного, можна зробити наступні висновки:

– Розмаїття машин для подрібнення м'ясопродуктів, велика номенклатура інструментів, відсутність глибоких досліджень впливу сировини на їх зносостійкість не дозволяє розробити науково-обґрунтовані рекомендації щодо їх захисту від спрацювання за допомогою покриттів. Виготовлювачі м'ясоподрібнювальних машин для оброблення однакової за фізико-механічними властивостями сировини застосовують різні за профілем і формою різальні інструменти та різні за характеристиками захисні покриття, що свідчить про відсутність єдиного підходу до оптимізації їх форми і властивостей.

– Корозійно-механічне зношування інструментальних матеріалів, захищених покриттями, в технологічних середовищах м'ясоподрібнювальних машин – це складний комплекс механічних, фізичних, електрохімічних та інших процесів, які супроводжують деформацію і руйнування поверхонь тертя. Механізм спрацювання таких інструментів з покриттями недостатньо вивчений.

- Для правильного вибору перспективних захисних покриттів потрібно змоделювати умови роботи м'ясорізальних інструментів, дослідити кінетику спрацювання покриттів у технологічних м'ясних середовищах і надати науково-обґрунтовані рекомендації щодо основних властивостей захисних покриттів, придатних для зміцнення інструментів.

6.3. Захист м'ясоподрібнювального обладнання від дії соляних розчинів

Проблема надійності і довговічності обладнання є однією з основних, що визначає ефективність роботи будь-якого виробництва. Для підприємств переробних і харчових галузей, зокрема м'ясопереробних, вона набуває особливого значення, тому що велика кількість процесів тут відбувається за присутності технологічних рідин, більшість з яких є корозійно- і поверхнево активними. Для роботи в таких умовах потрібні матеріали із складним комплексом фізико-механічних властивостей, які характерні для евтектичних покриттів на нікелевій основі системи Ni-Cr-B-Si [119]. Однак, ці сплави не вирізняються високою зносостійкістю, а наявність у їх структурі великої кількості нікелю унеможлиблює їх використання у контакті з м'ясною сировиною. Перспективними для зміцнення обладнання м'ясопереробної галузі можуть бути евтектичні покриття на основі заліза [260, 261], які не є канцерогенами.

Значна кількість деталей обладнання переробної промисловості працюють у контакті з розчинами кухонної солі різної концентрації, що призводить до їх інтенсивного корозійно-механічного спрацювання. Перспективними для захисту деталей від корозійно-механічного зношування є евтектичні покриття на основі заліза, нанесені газотермічним напиленням і наплавленням [119]. Разом з тим, поведінка цих покриттів в умовах зношування в соляних електролітах не вивчена, що унеможлиблює цілеспрямоване застосування їх для підвищення довговічності технологічного обладнання.

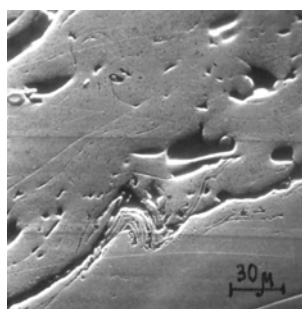
Мета цього підрозділу – встановлення характеру взаємодії перспективних евтектичних покриттів на конструкційній сталі 45 з агресивним 3% розчином кухонної солі під час тертя в умовах одночасного впливу середовища і механічних навантажень.

Дослідженню піддавали покриття на залізній основі (табл. 6.2) [260].

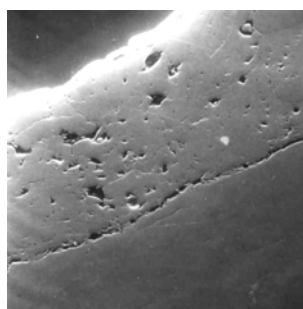
Мікроструктура покриттів, нанесених плазмовим струменем на конструкційну вуглецеву сталь 45, визначалась методом растрової електронної мікроскопії і мала шарувату будову з деякою кількістю мікропустот (рис. 6.4).

Таблиця 6.2 – Вплив питомого навантаження на величину зміщення стаціонарних потенціалів при терті і зачищуванні покриттів

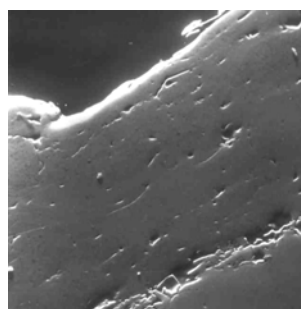
№ покриття	Фазовий склад покриттів	$\varphi_{ст}, В$	Питоме навантаження, МПа	$\varphi_{ст}^{\text{фазач}}, В$	$\varphi_{тр}^{\text{фазач}}, В$
1	$\alpha\text{-Fe}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}+\text{Fe}_2\text{B}$	-0,531	0,35	0,234	0,075
			0,70	0,268	0,099
			1,40	0,284	0,052
2	$\gamma\text{-(Fe,Ni)}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}$	-0,313	0,35	0,404	0,119
			0,70	0,413	0,133
			1,40	0,417	0,150
3	$\gamma\text{-(Fe,Cr)}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}$	-0,470	0,35	0,335	0,075
			0,70	0,356	0,103
			1,40	0,374	0,086
4	$\gamma\text{-(Fe,Ni,Mn)}+\alpha\text{-(Fe,Cr)}+\text{Fe}_{0,4}\text{Mn}_{3,6}\text{C}+\text{Fe}_3\text{C}$	-0,332	0,35	0,454	0,104
			0,70	0,491	0,116
			1,40	0,516	0,124



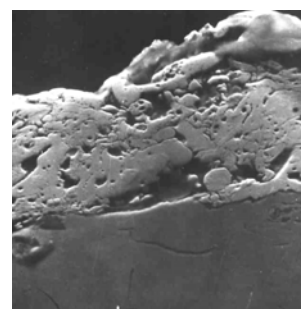
№1 ×300



№2 ×135



№3 ×155



№4 ×630

Рис 6.4 – Мікроструктура евтектичних захисних покриттів (номерація покриттів відповідає табл. 6.2)

Експерименти проводили на установці торцевого тертя за схемою, реалізуючою зачищення поверхні металевого електроду в 3-відсотковому соляному розчині – електроліті, з використанням потенціостатичного методу, який застосовувався як для дослідження електрохімічних процесів, що відбуваються при терті на поверхні, так і для управління їх зношуванням [216, 262]. В якості контртіла, що зношувало покриття, застосовували шліфувальний круг марки 24A25НСМ16К5Б. Випробування проводили за швидкості ковзання 0,8

м/с (по центру зразка діаметром 6 мм) і питомого навантаження 0,35; 0,70; 1,40 МПа.

Стаціонарні електродні потенціали покриттів визначали за допомогою потенціостата П8527М в статичних умовах ($\varphi_{ст}$), при терті ($\varphi_{тр}$) і при зачищуванні поверхні ($\varphi_{зач}$) – за максимального негативного значення $\varphi_{тр}$ в початковий період зношування. Поляризаційні криві знімали при різному питомому навантаженні. В якості електрода порівняння використовували стандартний хлорсрібний електрод ЕВЛ-1М1. Поляризаційні криві отримували потенціостатичним методом із швидкістю розгортання потенціалу 0,5 мВ/с. Розгортання потенціалу включали через 30 хв після початку досліду, коли наставала відносна стабілізація моменту тертя і потенціалу $\varphi_{тр}$. З метою підвищення відтворюваності результатів, поляризацію зразка здійснювали при розгортанні потенціалу з катодної області в анодну. Величина заздалегідь заданого потенціалу складала 0,9...1,1 В.

Зносостійкість покриттів оцінювали гравіметричним методом з похибкою 0,0002 г за величиною зносу за 30 хв. випробувань. Стаціонарні потенціали $\varphi_{ст}$ заздалегідь припрацьованих абразивним кругом при навантаженні 0,7 МПа евтектичних покриттів вимірювали через 5 хв. після занурення зразків в електроліт.

Характер зміни потенціалів в початковий період занурення («розблагорожування» внаслідок розчинення оксидної плівки, що утворилася на повітрі) і їх величина свідчать, що ці покриття в 3%-му розчині хлористого натрію знаходяться в активному стані (див. табл. 6.2). Потенціали $\varphi_{ст}$ покриттів 2 і 4 набагато позитивніші за потенціал $\varphi_{ст}$ покриття 1.

Зачищування поверхонь покриттів абразивним кругом призводить до різкого зміщення їх потенціалів $\varphi_{ст}$ в область негативних значень, що викликане різким прискоренням анодних процесів внаслідок руйнування поверхневих плівок та інтенсивної пластичної деформації.

Збільшення навантаження до 1,4 МПа призводить до значного розблагорожування потенціалів тертя. Мабуть, з ростом навантаження, більшою мірою проявляється механохімічний ефект, що призводить до значного збільшення швидкостей проходження анодних процесів, про що свідчить істотне зміщення анодних поляризаційних кривих в область великої густини струму (рис. 6.5). Катодні процеси, якщо судити за поляризаційними кривими, прискорюються у меншій мірі.

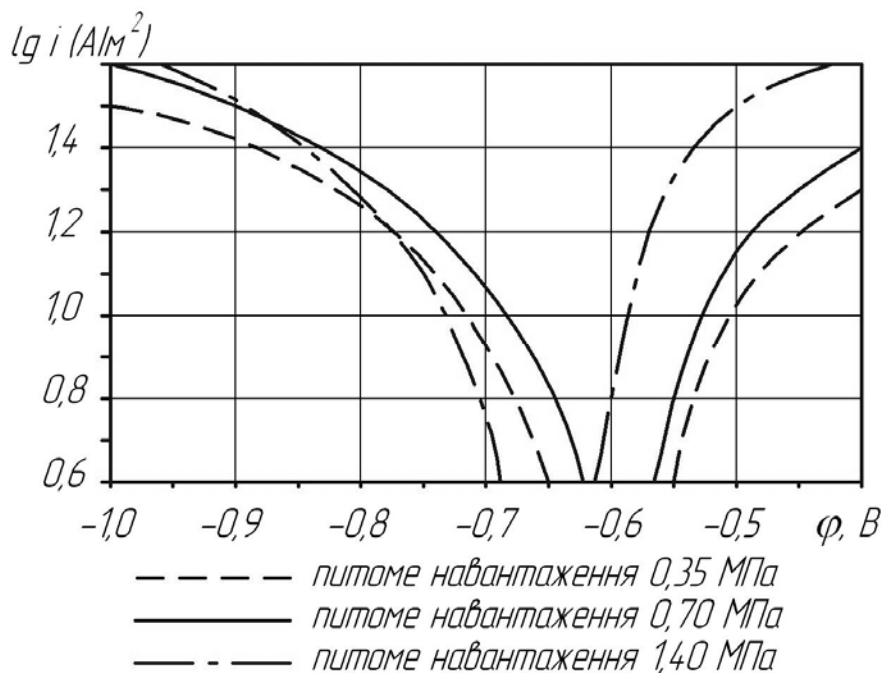


Рис. 6.5 – Поляризаційні криві для покриття 2, зняті при терті з різним питомим навантаженням

Вплив навантаження на швидкість проходження корозійних процесів при терті оцінювали за струмами саморозчинення, знайденими екстраполяцією потенціодинамічних поляризаційних кривих [216], знятих при малій швидкості розгортання потенціалу. З підвищенням навантаження корозія всіх досліджених вивчених покриттів підсилюється (рис. 6.6).

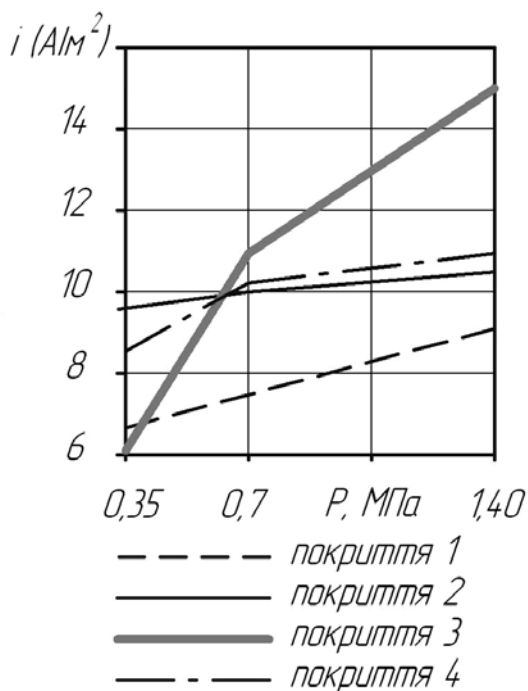


Рис. 6.6 – Вплив питомого навантаження на густину струму саморозчинення при терті покриттів (номери відповідають табл.6.2).

Найбільшою зносостійкістю за відсутності зовнішньої поляризації (при $\varphi_{тр}$) відрізняється покриття 3 (рис. 6.6). Порівняння зносу покриттів з їх струмами саморозчинення, визначеними екстраполяцією поляризаційних кривих, знятих при тому ж режимі тертя, показало, що у порядку збільшення струмів саморозчинення покриття розташовуються в ряд 1, 2, 4, 3, а за збільшенням зносу – в ряд 3, 1, 2, 4.

Поляризація фрикційного контакту, що полягає у зміщенні потенціалу тертя в катодну (до φ_k) і в анодну (до φ_{a1} , і φ_{a2}) області (рис. 6.7), істотно впливає на процес корозійно-механічного зношування евтектичних покриттів.

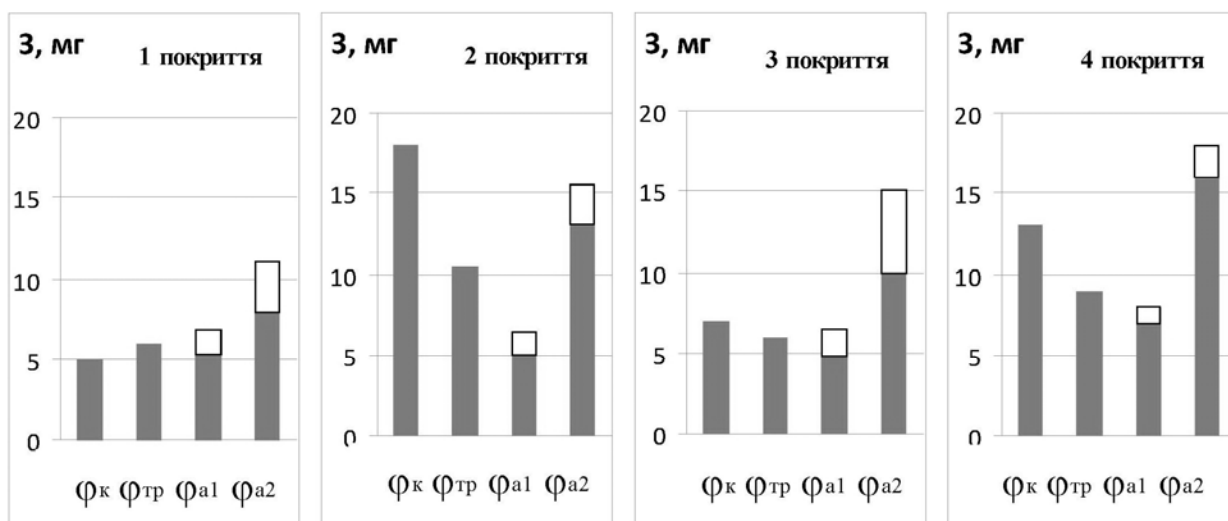


Рис. 6.7 – Залежність зносу покриттів 1, 2, 3 і 4 від електродного потенціалу при терті з питомим навантаженням 0,7 МПа. Виділені білим кольором ділянки – втрати маси внаслідок електрохімічного розчинення.

Для покриттів 1, 3, 4 $\varphi_k = -1,0$ В; $\varphi_{a1} = -0,4$ В; $\varphi_{a2} = -0,1$ В.

Для покриття 2 $\varphi_k = -0,9$ В; $\varphi_{a2} = -0,4$ В; $\varphi_{a2} = 0,0$ В.

Катодна поляризація неоднозначно впливає на зносостійкість. Для покриттів 2, 3, 4 спостерігається збільшення зносу відповідно в 2,3; 1,2; 1,4 рази з підвищенням густини струму поляризації від 30 до 38 А/м². Зносостійкість покриття 1, на відміну від інших, за густини струму 35 А/м² збільшується на 20%.

Зміна зносостійкості за катодної поляризації пов'язана, імовірно, з депасивацією поверхонь покриттів в результаті електрохімічного відновлення утворених при терті оксидних та інших плівок. При цьому змінюється будова плівок, зменшуються їх товщина і змащувальна дія.

Поляризація анодним струмом при $\varphi_{a1} = -0,4$ В знижує знос покриттів 2 і 4 в середньому на 20% за густини струму 30 і 38 А/м² і трохи (на 10%) збільшує знос покриттів 1 і 3 за густини струму, відповідно, 48 і 62 А/м². Анодна поляризація зони тертя підсилює процес адсорбції на поверхні

тертя іонізованих молекул кисню і аніонів хлору, полегшує іонізацію металу і утворення фазових плівок.

Для наближеної оцінки вкладу чисто електрохімічного розчинення в спрацювання покриттів при корозійно-механічному зношенні в умовах контрольованого анодного потенціалу втрати маси внаслідок проходження струму визначали за законом Фарадея

$$\Delta m = (A \cdot Q) / z \cdot F, \quad (6.24)$$

де Δm – маса металу, що розчинився, г; A – атомна маса металу; Q – кількість пропущеної електрики, К; z – валентність іона металу; $F = 965\,000$ К – число Фарадея. При цьому приймали наступні допущення. Оскільки основним компонентом покриттів є залізо, то враховували розчинення тільки атомів заліза ($A=56$). Судячи з поляризаційних кривих (див рис. 6.5), реакція плине в активній області, а в цьому випадку в розчин переходять двоховалентні іони заліза ($z=2$) [263]. Вихід реакції за струмом приймали рівним 100%.

Доля електрохімічних втрат маси в загальній величині зносу при φ_{a1} для покриттів 1, 2 і 4 складає в середньому 10%, а для покриття 3 дорівнює 16%. Порівняно невелике збільшення зносу покриттів 1 і 3 при зміщенні потенціалу до φ_{a1} співрозмірне з втратами маси внаслідок електрохімічного розчинення (див. рис. 6.7).

Зменшення зносу покриттів 2 і 4 при φ_{a1} пов'язане з формуванням досить щільних поверхневих плівок, що краще чинять опір абразивній дії, ніж плівки, які утворюються при $\varphi_{тр}$. Відмітимо, що для підтримки заданого потенціалу φ_{a1} на покриттях 2 і 4 необхідна значно менша густина струму, ніж для покриттів 1 і 3.

Подальше зміщення потенціалу в анодну область до φ_{a2} (приблизно на 0,6 В у порівнянні з $\varphi_{тр}$ покриттів) призводить до сильного підвищення зносу усіх покриттів – по порядку їх номерів на 65, 40, 165 і 100%. Доля електрохімічних втрат у загальній величині зносу для всіх покриттів збільшилася, але найбільше для покриттів 1, 3 і найменше для покриттів 2, 4 (у порядку зростання номерів покриттів вона склала 35, 16, 34 і 15 %).

Майже увесь приріст зносу покриття 1 і більше половини приросту зносу покриття 3 забезпечується електрохімічним розчиненням. Істотне збільшення зносу покриттів 2 і 4 при струмах поляризації, приблизно удвічі менших, ніж струми поляризації покриттів 1 і 3, ніяк не можна пояснити лише підвищенням долі чисто електрохімічного розчинення. Не виключено, що при значній анодній поляризації в умовах активації поверхні покриттів пружньо-пластичними деформаціями проявляється хемомеханічний ефект [214]. Узагальнити отримані дослідні дані можна так:

1. Результати випробувань на зношування в умовах контрольованого потенціалу дозволяють зробити висновок про можливість керування процесом корозійно-механічного зношування евтектичних покриттів шляхом регулювання потенціалу зони тертя поляризацією від зовнішнього джерела струму.

2. Ефект зниження зносу покриттів 2 і 4 в результаті анодної поляризації фрикційного контакту (потенціал φ_{a1}), що проявляється при порівняно малій густині струму, представляє практичний інтерес як варіант анодного захисту в умовах тертя деталей технологічного обладнання м'ясопереробної галузі.

3. Посилення анодного розчинення металу, що знаходиться в активному стані, не обов'язково інтенсифікує корозійно-механічне зношування. У цьому випадку навіть може збільшуватись зносостійкість. Зміщення потенціалу тертя покриття в область, в якій проявляється такий позитивний ефект, можна здійснити не лише поляризацією від зовнішнього джерела струму, але також зміною складу і структури покриття, підбором матеріалу контртіла пари тертя, зміною режиму тертя і складу технологічного середовища.

4. Досліджені ефекти можуть бути застосовані для підвищення надійності і довговічності технологічного обладнання м'ясопереробних підприємств.

Післямова

Розглянута у монографії структура м'яса і м'ясопродуктів, як природних біополімерів, дозволила створити фізичні моделі її складових і, на цьому підґрунті, дослідити процеси їх деформування і руйнування під час подрібнення, що є основою для конструювання ефективних м'ясоподрібнювальних інструментів.

Загальні принципи моделювання процесів подрібнення біополімерів м'яса створюють теоретичну основу для розробки способів синтезу принципів схем і проектування подрібнювального обладнання для переробки сировини з різними реологічними та фізико-хімічними властивостями. Класифікація подрібнювального обладнання, зокрема за структурою матеріальних потоків, дозволяє оцінити енергетичну ефективність машин, вибрати і запроектувати найбільш енергоефективні.

Робота м'ясоподрібнювального обладнання може бути високоефективною лише у разі забезпечення належного рівня його надійності, який прямо залежить від взаємодії робочих органів з сировиною. Неоднозначний вплив м'ясної сировини з різним ступенем автолізу на рух дислокацій у м'ясорізальних інструментах спонукає до пошуку матеріалів, захисних покриттів і засобів фізичного впливу на деталі технологічних машин для підвищення їх опору спрацюванню.

В роботі запропоновані деякі ефективні способи впливу на зносостійкість м'ясорізальних інструментів, але загальний арсенал перспективних засобів їх захисту від спрацювання далеко не вичерпний і їх пошук – це ті підвалини, на яких має базуватись надійність м'ясоподрібнювальних машин. Перспективними можуть бути евтектичні, кластерні, іонно-плазмові, дискретні покриття у поєднанні з електричним зарядженням деталей обладнання.

Робота у напрямку дослідження методів і засобів підвищення ефективності і зниження енергозатратності м'ясоподрібнювального обладнання має бути продовжена з урахуванням закономірностей фізико-хімічної механіки матеріалів, електрохімії, фізики твердого тіла та ін.

Автор вдячний Лауреату державної премії України, заслуженому діячу науки і техніки України, докт. техн. наук (спеціальність 05.18.12), професору Сукманову В.О., Лауреату державної премії України, заслуженому працівнику освіти України, докт. техн. наук (спеціальність 05.18.12), професору Тарану В.М. та докт. техн. наук (спеціальність 05.05.11), професору Фришеву С.Г. за рецензування цієї наукової праці, зроблені зауваження і побажання і чекатиме на відгуки читачів.

Література

1. Антипов С.Т., Кретов И.Т., Остриков А.Н., Панфилов В.А., Ураков О.А. Машины и аппараты пищевых производств. М.: Высш. шк., 2001. С. 29-31.
2. О необходимости развития отечественного машиностроения для мясопереработки [Электронный журнал] / Пеленко В.В., Зуев Н.А., Азаев Р.А., Янцевич А.А., Кузьмин В.В., Ольшевский Р.Г. Процессы и аппараты пищевых производств. С-Пб.: 2008. № 1. С. 20-24.
3. Комиссаров С.С. Исследование процесса измельчения мясного сырья в волчках и разработка ножевых головок [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. М.: 2003 – 159 с.
4. Соловьев Б.М. Восстановление и защита поверхностей деталей машин перерабатывающей промышленности. Обзорная информация. - М: АгроНИИТЭИПП, 1987. – 42 с.
5. Новицкий А.Е. Повышение долговечности деталей оборудования молочной промышленности, подверженных коррозионно-механическому изнашиванию [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.14. К.: 1984 – 244 с.
6. Рудык А.Е. Повышение долговечности деталей узлов трения технологического оборудования сахарных заводов [Текст]: Дис....канд. техн. наук: 05.02.14. – К.: - 1986. – 235 с.
7. Прейс Г.А. Повышение износостойкости деталей оборудования предприятий пищевой промышленности. К., Машгиз, 1963, 282 с. с ил.
8. Прейс Г.А. Повышение износостойкости деталей оборудования сахарных заводов [Текст] / Г.А. Прейс, Н.А. Сологуб К., «Техника», 1966, 138 с.
9. Зинко Б.М. Исследование износостойкости деталей технологического оборудования сахарных заводов, упроченных пластическим деформированием поверхностного слоя. Автореферат кандидатской диссертации. К., КТИПП, 1969, 31 с.
10. Смертяк Ю.Л. Исследование долговечности сальниковых уплотнений центробежных насосов свеклосахарных заводов. Автореферат кандидатской диссертации. К., КТИПП, 1869, 17 с.
11. Сологуб Н.А. О роли сахарозы в процессах трения и изнашивания металлов [Текст] / Н.А. Сологуб, Б.П. Штефан. Минск, ЦНТЭлегмаш, 1968, с. 16-22.
12. Сологуб Н.А. О склонности металлов к схватыванию в химически активных средах. [Текст] / Н.А. Сологуб, Б.П. Штефан // В сб."Повышение износостойкости и срока службы машин", К., УкрНИИНТИ, 1970, вып.3, с.149-153.

13. Штефан Б.П. Исследование некоторых электрических явлений при трении металлов в химически активных средах. [Текст] / Б.П. Штефан, Г.А. Прейс, Н.А. Сологуб, // В сб. "Проблемы трения и изнашивания", К., "Техника", 1971, вып.1, с.110-113.

14. Кособудский В.А., Механизм накопления остаточных напряжений с высоким градиентом в поверхностных слоях обкатываемых деталей машин. [Текст] / Кособудский В.А., В.Г. Динзвич // В сб. "Детали машин", К., "Техника", 1972, вып. 15, с. 75-77.

15. Загальні технології харчових виробництв [Підручник] / А. І. Українець, М. М. Калакура, Л. Ф. Романенко, В. А. Домарецький, Л. М. Мельник, О. О. Василенко, П. Л. Шиян, Л. М. Хомічак. — К. : Університет «Україна», 2010. — 814 с. ISBN 978-966-388-318-2.

16. Технологія м'яса та м'ясних продуктів: Підручник / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.; За ред. М.М. Клименка. — К.: Вища освіта, 2006. — 640 с: іл.

17. Клименко М.М. Теория процесса резания мяса и совершенствование машин и линий для измельчения сырья в производстве колбасных изделий: Дис. ... докт. техн. наук: 05.18.12. К.: 373 с. с ил.

18. Анатомия домашних животных / Акаевский А.И., Юдичев Ю.Ю., Михайлов Н.В., Хрусталева И.В. – М.: Колос, 1984. – 543 с.

19. Анатомия и гистология мясопромышленных животных / Н.А. Лебедева, А.Я. Бобровский, В.Н. Писменская и др. – М.: Агропромиздат, 1985. – 368 с.

20. Скалинский Е.И., Белоусов А.А. Микроструктура мяса. – М.: Пищевая пром.-сть, 1978. – 175 с.

21. Технология мяса и мясopодуктов / Соколов А.А., Павлов Д.В., Большаков А.С. и др. / - М.: Пищевая пром.-сть, 1970. – 740 с.

22. Соловьев В.И. Созревание мяса. – М.: Пищевая пром.-сть, 1966. – 340 с.

23. Клименко М.Н. Исследование процесса измельчения мяса лезвием: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1965. – 198 с.

24. Пелеев А.И. Пути механизации обвалки мяса.[Текст] / А.И. Пелеев, Б.Г. Грачев //– М.: ЦИНТИПИЩЕПРОМ, 1960. – 67 с.

25. Семенов М.П. Исследование процесса резания некоторых пищевых продуктов на технологическом оборудовании. Дис. ... канд. техн. наук, Киев, 1977. – 166 с.

26. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машгиз, 1962. – 574 с.

27. Куюмджиєв К.Н. Совершенствование процесса резания шпика с целью его интенсификации и модернизации оборудования: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1984. – 202 с.

28. Скалинский Е.И., Белоусов А.А. Микроструктура мяса. – М.: Пищевая пром-сть, 1978. – 175 с.
29. Гастаев В.А. Краткий курс сопротивления материалов. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
30. Каминский А.А., Гаврилов Д.А. Механика разрушения полимеров. – Киев: Наук. думка, 1988. – 224 с.
31. Косой В.Д., Малышев А.Д., Юдина С.Б. Инженерная реология в производстве колбас. – М.: «Колос С», 2005 – 264 с.
32. <http://www.ebio.ru> Электронный учебник «Биология».
33. <http://www.wikipedia.org/> Википедия – свободная энциклопедия.
34. Косой В.Д. Совершенствование процесса производства вареных колбас / В.Д. Косой, - М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1983. - 272 с.
35. Сухенко В.Ю. Механіка біополімерів м'яса [Текст] / В.Ю. Сухенко /Науковий вісник НУБіП України. – Київ: Вид-во НУБіП України, Вип. 144, ч.3. – 2010 – С. 290-302.
36. Сухенко Ю.Г. Трансформація властивостей фаршу в процесі виготовлення варених ковбас [Текст] / Ю.Г. Сухенко, В.Ю. Сухенко, Т.М. Жеведь /Науковий вісник НУБіП України. – Київ: Вид-во НУБіП України, Вип. 144, ч.3. – 2010 – С. 311-315.
37. Косой В.Д. Совершенствование процесса производства варенных колбас [Текст] / В.Д. Косой. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. – 272 с.
38. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов [Текст] / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 216 с.
39. Сидоряк А.Н. Совершенствование процесса измельчения мяса: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Сидоряк Александр Николаевич; Моск. гос. ун-т приклад. биотехнологии. - Москва. - 177с.: РГБ ОД, 61 07-5/3923.
40. Алексеев В.М. Оборудование для измельчения мяса: Экспресс-информация / В.М. Алексеев, Н.Г. Бандуркин, Н.Ф. Генералов // ЦНИИТЭИмясомолпром. - Сер. Мясная Промышленность. Зарубежный опыт, 1984. - Вып.11.
41. Технология мяса и мясопродуктов: учебник для студентов высших учебных заведений по специальности "Технология мяса и мясных продуктов" / [А.А. Соколов, Д.В. Павлов, А.С. Большаков и др.]; под общ. ред. А.А. Соколова. - М.: Пищевая промышленность, 1970.: 740 с.
42. Соколов А.А. Физико-химические и биохимические основы технологии мясопродуктов / А.А.Соколов // Пищевая промышленность. - М.: ВНИИМП, 1965.: 490 с.

43. Тиняков Г.Г. Гистология мясопромышленных животных / Тиняков Г.Г. // Пищевая промышленность. - М., 1978.: 416 с.
44. Клименко М.Н. Исследование структурно-механических свойств мяса / М.Н. Клименко, А.И. Пелеев // Изв. Вузов СССР. - М.: Пищевая технология, 1966. - № 2.: 310 с.
45. Александер Р. Биомеханика: Пер.с английского / Р. Александер. - М.: МИР, 1980. - 340с.: ил.
46. Баранов А.Ф. Исследование структурно-механических свойств мяса говядины: Дис... канд. техн. наук 05.18.12 / А.Ф. Баранов. - М.: МТИММП, 1975. - 180 с.
47. Бранков Г. Основы биомеханики: Перевод с болг. В. Джупанова / Георги Бранков. - М.: Мир, 1981. - 254с.: ил.
48. Нейберг Г. Теория концентрации напряжений в призматических стержнях, работающих в условиях сдвига, для любого нелинейного закона, связывающего напряжения и деформации: Сб. переводов иностр. статей / Г. Нейберг. - М.: Механика, 1961. - № 4.: С. 36-43.
49. Кулешев Б.В. Исследование импульсного резания и структурно-механических свойств костной ткани с целью разработки соответствующего оборудования: Дисс. канд. техн. наук 05.18.12 / Б.В. Кулешев. - М.: МТИММП, 1979. - 194с.
50. Николаев Б.А. Исследование структурно-механических свойств мяса методом растяжения / Б.А. Николаев, А.Ф. Баранов // Мясная индустрия СССР. - 1976. - № 6. - С.35-37.
51. Кулманова Н. Механические свойства говяжьего мяса при замораживании / Н. Кулманова // Мясная индустрия. - 1969. - № 1. - С.17-21.
52. Познышев А.Н. Исследование способов и режимов резания мяса с учетом его структуры: Дисс. канд. техн. наук 05.18.12 / А.Н. Познышев. - М.: МТИММП, 1973. - 143с.
53. Стабников В. Н., Попов В. Д., Лысянский В. М. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников, В. Д. Попов, В. М. Лысянский. — М. Пищевая промышленность, 1976. - 743.
54. Кирпичёв В. Н. О подобии при упругих явлениях / В. Н. Кирпичёв. — ЖРФХО 1982, 1, вып. 9, часть физическая, с. 157 - 178.
55. Kick F. Der Gesetzt der proporzionalen Widerstand, Leipzig, 1885.
56. Stadler, Grauding analyses and Their applications. Traus. fhst. jf Min and Met (British) 19,471, 1910-1911.
57. P. von Rittinger. Lehrbuch der Aufbereitungskunder. Berlin, 1867. Bell g. w. anfhvestion on Rock erusting made of Mc/ Yill Uniwersity. Transact. Americ. inst. Min and Met. Eng.,133, 57, 1918.
58. Der Mar, Eng. and Min gam/ Pres, 94, 1129, 1214.

59. Gates A, Application of the Crushing, surface Diagram. Eng. and Min gausn. Press, 97, 795 (1914); 95; 1039 (1913).
60. Cross G., Simmerlaus R. Crustung and Grunding sitodier of Ouarz. Report of investgation. -Bureau of 2/ines., USA, s2880, 1928.
61. Bakal A. and Hayakawa K. Heat transfer during freezing and thawing of foods. Adv. Food Res. 20, New York, 1973, 217-256 с.
62. Ребиндер Н. А. Понизители твёрдости в бурении / Н. А Ребиндер. — М. — Л.: Изд-во А Н СССР, 1944. - 200 с.
63. Haultain H. E. A Constribution to the Kick versuz Rittinger Dispute. Trans. Americ Inst, of Min. and Met. Eng., 69, 183 (1923).
64. Bond P. Y. The Third Teoru of Comminution Mining Eng.,May.1952, р. 138-149.
65. Желиговский В.А. Экспериментальная теория резания лезвием / В.А. Желиговский // Труды МИМЭСХ. Вып. 9. М., 1940, 27 с.
66. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник // М.: Машиностроение. 1975. - 311 с.
67. Романов А.А. Механизация производства рыбной продукции. - М.: Пищевая промышленность, 1974.-200 с.
68. Роговая А.Б. и др. Комплексное использование рыбного и растительного сырья для создания продуктов повышенной пищевой и биологической ценности. // Роговая А.Б., Левинтон Ж.Б., Химии Т.Д., Ятченко Е.А. // Питание: здоровье и болезнь. - М., 1990. - с. 171.
69. Гмотинский В.Г., Флиорент Г.И. Теоретические основы инженерного прогнозирования. - М.: Наука, 1973.-303 с.
70. Шуляк В.А. Научно-практические основы создания комбинированных агрегатов для сушки и механотермической обработки пищевых материалов: Автореф. дисс. докт. техн. наук / Могил. гос. универс. продов. - Могилев, 2005. - 42 с.
71. Брок Д. Основы механики разрушения. Перевод с английского -М.: Высшая школа, 1980г. - 366 с.
72. Сидоряк А.Н. Совершенствование процесса измельчения мяса [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. М.: 2007 с. 176 с ил.
73. Ильюшин А.А. Пластичность, основы общей математической теории. -М.: Издательство АН СССР. 1963 г. - 180 с.
74. Vincent M. Etude experiaientale et theorigue de l'orientation de fibres dans des ecoulements de polymeres charges / M. Vincent, J.F. Agassant. - Paris, 1984.
75. Разрушение твердых полимеров / Под ред. Б. Роузена; Пер. с англ. - М.: Химия, 1971.-523 с. 94.
76. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / А.И. Биргер, Б.Ф.Шорп, Г.Б. Иосилевич. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1979. - 702 с.

77. Kapsalis J. G., Walker T. E., Wolf M. I. *Texture Stud.*, 1970, 1, p. 464.
78. Огибалов П.М. *Механика полимеров* / П.М. Огибалов, В.А. Ломакин, В.П. Кишкин. - М.: Изд-во МГУ, 1975. - 518 с.
79. Эпнер Ф. *Колбасное производство* / Ф. Эпнер. - СПб., 1987. - 112 с.
80. Степанов Г.В. *Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок* / Г.В. Степанов. - Киев: Наукова думка, 1979.-268 с.
81. Клименко М.Н. Влияние скорости измельчения мяса на конечную температуру измельченного продукта / М.Н. Клименко // Сб. науч. тр. МТИММП.-1969.-С 23-29.
82. Пелеев А.И. Износ инструмента в процессе резания мяса / А.И. Пелеев, М.Н. Клименко; ЦИНТИпищепром// *Мясная и птицеперерабатывающая пром-сть: Науч.-техн. информ.*, - М., 1966. - С. 4-7. - (Вып. 5).
83. Построение математической модели и алгоритма расчета оптимальной рецептуры вареных колбас заданного химического состава / Р.М. Салаватулина, Л.К. Лозович, А.Н. Печникова // *Мясная индустрия СССР.*- 1985.-№ 12.-С. 38.
84. *Политехнический словарь* / Под ред. И.И. Артоболевского. - М.: Сов. энциклопедия, 1977. - 245 с.
85. Гольберг И.И. *Механическое поведение полимерных материалов* / И.И. Гольберг. - М.: Химия, 1970. - 190 с.
86. Юрков С.Г. Импульсное резание мясокостного сырья / С.Г. Юрков, Б.В. Кулишев // *Мясная индустрия СССР.* - 1978. - № 9. - С. 35-38.
87. Hejer W. Ein Knechme gerat zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Gelen / W. Hejer, H. Krause // *Pheologie und Textur der Lebensmittel.* - Dresden, 1984. - S. 24-25.
88. Степанов Г.В. *Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок* / Г.В. Степанов. - Киев: Наукова думка, 1979.-268 с.
89. Astarita G. *Principles of non-newtonian fluid mechanics* / G. Astarita, G. Marrucci // McGraw-Hill. Book Company. - 1974. - P. 310.
90. Ивашов В.И., С.Г. Юрков, Б.Н. Дуйденко и др. Динамическая диаграмма «напряжение - деформация» для мягких коллагенсодержащих материалов // *Мясная индустрия СССР.* - 1982г. № 6. - с. 39 - 41.
91. Филоненко- Бородич М.М. *Теория упругости.* М-Л.: Гостехиздат, 1947 г. 300 с.

92. Комиссаров С.С. Исследование процесса измельчения мясного сырья в волчках и разработка ножевых головок [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. М.: 2003 с. 159 с ил.

93. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. - М.: Наука, 1979. - 744 с.

94. Крагельский Н.В. Основы расчетов на трение и износ / Н.В. Крагельский, М.Н. Добычик, В.С. Комбалов. - М.: Машиностроение, 1977.-525 с.

95. Лебедев И.Н. Исследование вибрационного резания пищевых продуктов с целью интенсификации процесса и улучшения его качества: Дис. ... канд. техн. наук/ И.Н. Лебедев. - Киев, 1981. - 210 с.

96. Глебов С.Ф. Теория наивыгоднейшего резания металлов / С.Ф. Глебов. - М.: Госмашиздат, 1933. - 115 с.

97. Пелеев А.И. К теории машинной обработки мяса. Исследование процесса трения скольжения мяса по стали / А.И. Пелеев, М.Н. Клименко // Мясная индустрия СССР. - 1966. - № 5. - С. 45-47.

98. Отчет по теме: Исследование процесса износостойкости мясорезущих органов машин с контактирующим режущим механизмом. - Киев, КТИГТП, 1981.-60 с.

99. Grabein P. Untersuchungen zum Einflup verschiedenen Parameter auf den Energieverbrauch eines Schneidmischers / P. Grabein, H. Raeuber // Fleischwirtschaft. - 1989. - Н.3. - S. 423-426.

100. Vincent M. Etude experiaientale et theorigue de l'orientation de fibres dans des ecoulements de polymeres charges / M. Vincent, J.F. Agassant. - Paris, 1984.

101. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие / Под ред. Р.А. Макарова. - М.: Машиностроение, 1975. - 287 с.

102. Объективная оценка качества мяса и мясных продуктов реологическими методами: Обзор, информ. / Т.Е. Лимонов, СИ. Суханова, О.П. Боровикова, А.В. Горбатов; ЦИНТИиТЭИМММП. - М., 1975. - 26 с.

103. Ржаницын А.Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени / А.Р. Ржаницын. - М.: Машгиз, 1949. - 190 с.

104. Партон В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. - М.: Наука, 1985. - 504 с.

105. Рекач В.Г. Руководство к решению задач по теории упругости / В.Г. Рекач. - М.: Высш. шк., 1966. - 227 с.

106. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 519 с.

107. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов. – М.: Химия, 1970. – 190 с.
108. Технологія м'яса і м'ясних продуктів: Підручник / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.; За ред. М.М. Клименка. – К.: Вища освіта, 2006. – 640 с.
109. Віннікова Л.Г. Теорія і практика переробки м'яса. – Ізмаїл: СМНЛ, 2000. – 172 с.
110. Корнюшко Л.М. Оборудоване для производства колбасных изделий. Справочник. – М.: Колос, 1993. – 304 с.
111. Машины та обладнання переробних виробництв: Навч. посібник / О.В. Дацишин, А.І. Ткачук, Д.С. Чубов та ін.; За ред. О.В. Дацишина. – К.: Вища освіта, 2005. – 159 с.
112. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, т.1, т.2, 1976. – 576 с.
113. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругости пластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
114. Слепян Л.И. Механика трещин. – Л.: Судостроение, 1981. – 296 с.
115. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
116. Чижова Т.В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 302 с.
117. Приборы и системы для измерения вибрации, шума, удара. Справочник. В 2-х кн. Под ред. В.В. Клюева. – М.: - Машиностроение, кн.1, 1978. – 448 с.
118. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. Пер. с англ. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963 – 535 с.
119. Сухенко Ю.Г. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості [Текст] / Ю.Г. Сухенко, О.І. Некоз, М.С. Стечишин – К.: Елерон, 1993. – 107 с.
120. Сухенко В.Ю. Застосування плазмового напилення для підвищення довговічності м'ясорізальних вовчків [Текст]/ В.Ю. Сухенко, В.М. Таран, Ю.Г. Сухенко // Харчова промисловість. Міжвідомчий тематичний наук. зб. – К.: УДУХТ, вип. 45, 2000. – С. 229-234.
121. Пелеев А.И. Определение зависимости давления истечения мяса через решетки от диаметра отверстий, скорости истечения и степени деформации [Текст] // А.И. Пелеев, С.А. Пелеев // Мясная индустрия СССР. - 1973. -№5.-С. 31-32.
122. Горяев В.В. Совершенствование конструкций и методики расчета режущего механизма волчков: [Текст] // дис. ... канд. техн. наук. - М.: МТИММП, 1989.-185 с.

123. Андрищенко А.Г. Исследование эксплуатационных и конструктивных параметров волчков малой производительности с целью их совершенствования: дис. ... канд. техн. наук. [Текст] — М.: МТИММП, 1979.

124. Максимов Д.А. Исследование процесса истечения мяса через решетку волчка [Текст] // Д.А. Максимов, И.М. Тамбовцев, О.И. Якушев // Проблемы совершенствования холодильной техники и технологии: Сборник научных трудов. Выпуск №4 — М.: МГУПБ, 2008. — С.137 — 141.

125. Пат. 70749 Российская Федерация, МПК⁷ А 22 С 17/00. Устройство для измельчения пищевых продуктов / Якушев О.И., Ивашов В.И., Сидоряк А.Н., Максимов Д.А.; - заявл. 20.06.2007; опубл. 20.02.2008, Бюл. №5. — 2 с.

126. Семенов А.П. Металлофторопластовые подшипники. [Текст] // Семенов А.П., Савинский Ю.Э. — М.: Машиностроение, 1976. — 300 с.

127. Сухенко Ю.Г. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості. [Тест] // Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С. — Київ: Елерон, 1993. — 107 с.

128. Косой В.Д. Совершенствование процесса производства вареных колбас [Текст]/. Косой В.Д. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1985. — 271 с.

129. Дорохов В.П. Разработка рационального режима процесса измельчения мясного сырья при получении фарша для сырокопченых колбас: [Текст] Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / В. П. Дорохов. - М.: МГУПБ, 2006. -198 с.

130. Сидоряк А.Н. Совершенствование процесса измельчения мяса: Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук [Текст] / А. Н. Сидоряк. - М.: МГУПБ, 2007. -177 с.

131. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности [Текст]/. Пелеев А.И. — М.: Пищевая промышленность, 1971. - 519 с.

132. Клименко М.Н. Развитие теории резания мяса и совершенствование машин для измельчения сырья в производстве колбасных изделий: Дис. д-ра. техн. наук [Текст] / М.Н. Клименко. К.:, 1990 - 380 с.

133. Косой В.Д. Научные основы совершенствования и оптимизации процессов производства вареных колбас методами инженерной реологии. Дис. д-ра. техн. наук [Текст] / В.Д. Косой. - М.: МГУПБ, 1984. — 544 с.

134. Генин Э.С. Основные направления создания оборудования для мясной промышленности / Э.С. Генин // Мясная индустрия СССР. - 1987. - № 6.-С. 1-4.

135. Клименко М.Н. Оценка качества среза пищевых продуктов / М.Н. Клименко, И.Н. Лебедев // Пищевая промышленность: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1983.- Вып. 29. - С. 25-27.
136. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов. - М: Паука, 1977. - 304 с.
137. Чижикова Т.В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов / Т.В. Чижикова. - М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1982. - 302 с.
138. Sooblom, Peter O., Hartness, J. Timothy Cordell, Tobey M. On low-velocity impact testing of composite materials. // J. Compos, mater. - 1988. с. 1. -Р. 30-52.
139. Vincent M. Etude experiaientale et theorique de l'orientation de fibres dans des ecoulements de polymeres charges / M. Vincent, J.F. Agassant. - Paris, 1984.
140. Резание пищевых продуктов на технологическом оборудовании / Н.А. Буренков, М.Н. Клименко, А.П. Жучков, М. П. Семенов Н Пищевая промышленность: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1977. - № 23. — С. 83-87.
141. Сорокина Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокина. - М.: Госстрой, 1960, - 240 с.
142. Ландау Л.Д. Механика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. -М.:ГИТТЛ, 1954,- 194 с.
143. Реотест 2. Инструкция о применении.
144. Точек А. Моделирование механических свойств мышечной биоткани как объекта переработки в мясной промышленности: Автореф. дис... канд. техн. наук / А. Точек. - М., 1987. - 19 с.
145. Клименко М.Н. Развитие теории резания мяса и совершенствование машин для измельчения сырья в производстве колбасных изделий: Дис... д-ра. техн. наук / М.Н. Клименко. - Киев, 1990 - 380 с.
146. Горбатов А В. Реология мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов. . - М.: Пищ. пром-сть, 1979. - 384 с.
147. Конструирование и изготовление режущего инструмента / Под ред. Н.В. Успенского. - М.: Машгиз, 1954. - 604 с.
148. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. - М.: Высш. шк., 1969,-608 с.
149. Місяць В.П. Основи побудови математичних моделей процесів подрібнення матеріалів // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2000. - №5. - С. 34-37.
150. Скиба М.Є. Обладнання для переробки відходів. Навчальний посібник. - Хмельницький.: ХДУ, 2004. - 90 с.
151. Місяць В.П. Математичне моделювання матеріальних потоків в механічних пристроях для подрібнення полімерів // Вісник

Хмельницького національного університету. - 2006. - № 2 Т1. - С. 180-184.

152. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. - М.: Наука, 1976. – 500 с.

153. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. - М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.

154. Сухенко В.Ю. Структурно-механічне моделювання м'яса [Текст] // В.Ю. Сухенко К.: Продовольча індустрія АПК ВП «Паралель». 2012. – С. 30-32.

155. Місяць В.П. Принципи побудови узагальненої математичної моделі процесу подрібнення полімерних матеріалів // Вісник ДАЛПУ. - 1999. - №2. - С. 74-78.

156. Місяць В.П. Аналітичне визначення складових видів деформації полімерів при подрібненні // Вісник КНУТД. – 2007. - №4. - С. 27-31.

157. Місяць В.П., Бурмістенков О.П., Гладчук О.З. Моделювання процесів руйнування полімерних матеріалів при подрібненні // Вісник КНУТД. – 2007. - №3. - С. 40-45.

158. Карташев Э.М., Бартенев Г.М. Процессы разрушения полимеров в хрупком и квазихрупком состоянии // Высокомогл. соедин. – 1981, 23А. - № 4. - С. 904-911.

159. Сухенко Ю.Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник / Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко; під ред. професора Сухенка Ю.Г. - К.: НУХТ, 2010. - 547с.

160. Чижикова Т.В. Перспективы повышения эксплуатационной надежности режущих инструментов в мясной промышленности [Текст] / Т.В. Чижикова. - М.: Легкая промышленность, 1987. – 180 с.

161. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва: навч. посіб. для студ. вищих техн. та аграр. навч. закладів/ П.С.Берник, З.А.Стоцько, І.П.Паламарчук, В.В.Яськов; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Л.: НУЛП, 2004. – 336 с.: іл.

162. Боуден Ф. Влияние электрического потенциала по поверхности на трение [Текст] // Сборник "Трение и граничная смазка". - М.:, 1953. - С.67-73.: с ил.

163. Волькенштейн Ф.Ф. Физико-химия поверхности полупроводников. [Текст] Ф.Ф. Волькенштейн; М.:, Наука, 1978, 899 с. с ил.

164. Каданер Л. И. Защитные пленки на металлах [Текст] / Л. И. Каданер. - Харьков : Изд-во Харьк.ун-та, 1956. - 283 с. : ил.

165. Оше Е.К. Метод определения характера и степени отклонения от стехиометрии поверхностных окислов на металлах в растворах

электролитов / Е.К. Оше, И.Л. Розенфельд // Сб. «Новые методы исследования коррозии металлов». - М.: Наука, 1956. - С.35-46.

166. Алёхин В.Д. Некоторые особенности микропластической деформации поверхностных слоев полупроводниковых кристаллов при температурах ниже и выше температурного порога хрупкости: [Текст] / В.Д. Алехин, М.Л. Шоршоров, Г.Г. Алиев и др. // В сб. "Металлофизика", К., «Наукова думка», 1973, вып. 44, С.41-42.

167. Фридель Ж. Дислокации: [Монография] / Ж. Фридель; Перевод с английского под редакцией А.Л.Ройтбурда. - М.: Мир, 1967. - 648с.: с ил.

168. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций: [Монография] / С. Амелинкс; Перевод с английского В.М.Кардонского. - М.: Мир, 1968. - 440с.

169. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: [Справочник] / В.С. Коваленко. - М.: Металлургия, 1970. - 134с.

170. Набарро Ф.Р.Н. Пластичность чистых монокристаллов [Текст] / Ф.Р.Н. Набарро, З.С. Базинский, Д.Б. Холт. Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1967. - 216 с. с ил.

171. Бернер Р. Пластическая деформация монокристаллов [Текст] : пер. с нем. / Р. Бернер, Г. Кронмюллер ; ред. А. Н. Орлов. - М. : Мир, 1969. - 272 с. : ил.

172. Заяс Ю.Ф. Качество мяса и мясопродуктов [Текст]: Publisher / Ю.Ф. Заяс. - М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1981. - 480с.

173. Новицкий А.Е. Микротрибометр для исследования электрохимических процессов при деформации поверхностного слоя металлов [Текст] / А.Е. Новицкий, М.А. Сологуб; Мин. высш. и ср. спец. обр-ния // Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб. - К.: Техніка, 1981. - Вып.19, 1-109. - С.58-60.

174. Хирт Д.П. Теория дислокаций: [Учебник] / Д.П. Хирт, И. Лотте; Под ред. д.ф.-м.н. Э.М. Надгорного и д.ф.-м.н. Ю.А. Осипьяна. - М.: Атомиздат, 1972. - 600с.: с ил.

175. Дьяченко Е.В. Метод определения глубины наклепанного слоя металла без разрезания изделия : [Текст] // сб. «Качество поверхности деталей машин», М.:, изд-во АН СССР, 1951, Л.1, С.87-102.

176. Костецкий Б.И. Механохимические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.С. Натансон, Л.Л. Бершадский. - М.: Наука, 1972. - 170с.: с ил.

177. Прейс Г.А. Повышение износостойкости деталей оборудования сахарных заводов: [Монография] / Г.А. Прейс, М.А. Сологуб. - К.: Техніка, 1966. - 138с.: с ил.

178. Гутман Э.М. О кинетике катодных и анодных реакций деформированной стали в кислых электролитах: [Текст] // Физика, химия, механика материалов. 1968. - Т.4, № 1.-С. 87-88.

179. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин: [Монография] / М.А. Балтер; 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1978. - 184с.

180. Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел: [Монография] / Ф. Боуден, Д. Тейбор; Пер. с англ. Под ред. д-ра техн. наук И. В. Крагельского. - М.: Машиностроение, 1968. - 543с.: с ил.

181. Назаренко П.В. Исследование влияния упруго-пластических деформаций и структурных изменений на процессы внешнего трения и износостойкость. Автореферат дисс...докт. техн. наук. – К.: КИИГА, 1973. – 49 с.

182. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании: [Текст] / С.Н. Постников. - Горький: Волго-Вятское книжное изд-во, 1975. - 280с.: с ил.

183. Портер А.И. О влиянии коррозионно-активных сред на дислокационную структуру при трении скольжения твердых тел: [Текст] / А.И. Портер, Г.А. Прейс, Н.А. Сологуб // сб. "Проблемы трения и изнашивания". - К.: Техніка, 1973. - вып. 4. - С.74-77.

184. Костецкий Б.И. Процесс схватывания металлов и критерии оценки его интенсивности / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техніка, 1972. - вып. 2. - С.74-77.

185. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: [Монография] / Р. Хоникомб; Перевод с англ. под ред. докт. физ-мат. наук Б.Я. Любова. - М.: Мир, 1972. - 408с.: с ил.

186. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел: [Монография] / Т. Екобори. - М.: Metallургия, 1971. - 408с.

187. Сологуб Н.А. Особенности влияния коррозионноактивных сред на развитие субмикроструктуры поверхностей трения: [Текст] / Н.А. Сологуб, А.И. Портер // Тезисы докладов УП Киевской конференции "Повышение износостойкости и срока службы машин". - К.: УкрНИИТИ, 1977. - вып.1. - С.18.

188. Лобарский И.М. Упрочнение и разупрочнение при трении / И.М. Лобарский // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техніка, 1971. - вып. 1. - С.27-34.

189. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов: [Учебное пособие] / Н.П. Жук. - М.: ООО ТИД "Альянс", 2006. - 472с.: с ил.

190. Структурутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка, Ю.Г. Сухенко, В.М. Коржик. - К.: Вища школа, 1997. – 120 с.

191. Антонюк В.С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного

типу [Текст]: Дис...докт. техн. наук спец. 05.03.01 / В.С. Антонюк. - К.: НТУУ "КПІ", 2006. - 309с.: с іл.

192. Сухенко В.Ю. Обґрунтування основ забезпечення зносостійкості м'ясорізальних інструментів: [Текст] / В.Ю. Сухенко; НАУ // Проблеми тертя та зношування: наук. -техн. зб. - К.: НАУ, 2012. – Вип. 57 - С.76-92.

193. Повышение ресурса технических систем путем использования электрических и магнитных полей [Текст]: Монография / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. Н. Лысыков [и др.]. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. - 544 с.

194. Назаренко П.В. Исследование влияния упруго-пластических деформаций и структурных изменений на процессы внешнего трения и износостойкость: Автореф. дис.. докт. техн. наук. - Киев: КИИГА, 1973. - 49 с.

195. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении [Текст] / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов [и др]; од ред. Б. И. Костецкого. - Киев: Техніка, 1976. - 296 с.

196. Карпенко Г.В. Про фізико-хімічну механіку металів [Текст]: Монографія / Г.В. Карпенко. - Київ: Наукова думка, 1973. - 174 с.

197. Прейс Г.А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов [Текст] / Г.А. Прейс // Трение и износ. - 1987. - Т.8, №5. - С.92-797.

198. Гутман Э.М. О кинетике катодных и анодных реакций деформированной стали в кислых электролитах [Текст] / Э.М. Гутман // Физика, химия, механика материалов. - 1968. - Т.4, № 1. - С.87-88.

199. Портер А.И. Электрохимический метод регулирования деформации поверхностных слоев металлов [Текст] / А.И. Портер, Г.А. Прейс, Н.А. Сологуб // В сб.: "Разработка и применение технологических смазок. - Киев: РДЭНТП, 1973. - С.23-24.

200. Глазов В.М. Микротвердость металлов и полупроводников [Текст]: Монография / В.М. Глазов, В.Н Вигдорович. - М.: Металлургия, 1969. - 248 с.

201. Некоторые особенности микропластической деформации поверхностных слоев полупроводниковых кристаллов при температурах ниже и выше температурного порога хрупкости [Текст] / В.П. Алехин, М.Х. Шорохов, Г.Г. Алиев [и др.] // В сб.: Металлофизика. - К.: Наукова думка, 1973. - вип. 44. - С.31-42.

202. Волькенштейн В.В. Физико-химия поверхности полупроводников [Текст]: Монография / Ф.Ф. Волькенштейн. - М.: Наука, 1973. - 399с.

203. Мямлин В.А. Электрохимия полупроводников [Текст]: Монография / В.А. Мямлин, Ю.В. Плесков. - М.: Наука, 1965. - 333 с.

204. Романов В.В. Влияние коррозионной среды на циклическую прочность металлов [Текст]: Монография / В.В. Романов. - М.: Наука, 1969. - 218 с.

205. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел [Текст]: Монография / Т. Екобори. - М.: Металлургия, 1971. - 264 с.

206. Улиг Г. Коррозия металлов [Текст]: Монография / Г. Улиг; под ред. канд. техн. наук Л. В. Турковской. - М.: Металлургия, 1968. - 308 с.

207. Сухенко Ю.Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв [Текст]: Підручник / Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко; під ред. професора Ю.Г. Сухенка. - К.: РВЦ НУХТ, 2010. - 547с.

208. Технология рыбы и рыбных продуктов [Текст]: Учебник / Под ред. профессора А.М. Ершова. - Санкт-Петербург: ГИОРД, 2006. - 945с.

209. Технология продуктов из гидробионтов / [Артюхова С. А., Богданов В. Д., Дацун В. М. и др.]; под ред. Т. М. Сафроновой, В. И. Шендерюка. - М.: Колос, 2001. - 496 с.

210. Кирюткин Г.В. Мойка и дезинфекция технологического оборудования предприятий молочной промышленности [Текст]: Учебник / Г.В. Кирюткин, В.В. Молочников. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 126 с.

211. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов [Текст]: Монография / Рольф Хаазе; Darmstadt; Перевод с немецкого под ред. А.В. Лыкова. - М.: Мир, 1967.

212. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов [Текст]: Монография / Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В.; Киевский политехнический институт. - К.: Техніка, 1974. - 272 с.

213. Гроот С.Р. Термодинамика необратимых процессов [Текст]: Монография / С.Р. де Грот. - М.: ГИТТЛ, 1956. - 281с.

214. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии [Текст]: Монография / Э.М. Гутман. - М.: Металлургия, 1974. - 272с.

215. Прейс Г.А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов: Международный научный журнал / Г.А. Прейс; Государственное научное учреждение ИММС НАН Беларуси // Трение и износ. - 1987. - Т.8, № 5. - С.792-797.: ISSN 0202-4977.

216. Прейс Г.А. Электрохимические явления при трении металлов [Текст]: Международный научный журнал / Г.А. Прейс, А.Г. Дзюб; Государственное научное учреждение ИММС НАН Беларуси // Трение и износ. - 1980. - Т.1, № 2. - С.217-235.: ISSN 0202-4977.

217. Технологія м'яса та м'ясних продуктів: Підручник / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.: За ред. М.М. Клименка. - К.: Вища освіта, 2006. - 640 с.

218. Гвоздєв О.В., Ялпачик Ф.Ю., Рогач Ю.П., Кюрчева Л.М. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: Навч. посібник / За ред. к.т.н. О.В. Гвоздєва. – Суми: Довкілля, 2004. – 420 с.

219. Чижиков Т.В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 302 с.

220. Корнюшко Л.М. Оборудования для производства колбасных изделий. Справочник. – М.: Колос, 1993. – 304 с.

221. Дацишин О.В., Ткачук А.І., Чубов Д.С. Машины та обладнання переробних виробництв: Навч. посібник / За ред. проф. О.В. Дацишина. – К.: Вища освіта, 2005. – 159 с.

222. Рекомендации по выбору режущего инструмента для волчков // Мясная индустрия. – 2003. - №8.

223. Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості. – К.: Елерон, 1993. – 108 с.

224. Кукшин В.К., Прейс Г.А., Некоз А.И. Исследование режущих свойств и стойкости ножей волчков с различными геометрическими параметрами // Изв. вузов. Пищ. технология. – 1972. – №1. – С.114–118.

225. Підвищення довговічності різального комплекту м'ясорізальних вовчків/ О.І., Некоз В.І.Білий, М.М. Пушанко та ін. // Придніпров. наук. вісник. – 1998. – №73 (140). – С. 59–60.

226. А.с. 1375218 СРСР, МКВ А 22С17/00. Решітка до пристрою для подрібнення м'яса /В.І. Білий, О.І. Некоз, О.Д. Клюк, І.В. Балик, Ю.Г. Сухенко. Опубл. 23.02.88, Бюл. №7. – 2 с.

227. Решітка: Патент на корисну модель № 33695 Україна, МПК В02С 18/26/ М.Є. Шаблій, В.О. Єрмоленко, О.І. Єрмоленко, Ю.Л. Пасічник (UA). – Опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13. – 4 с. іл.

228. Вовчок: Патент на корисну модель № 32743 Україна, МПК В02С 18/00/ М.Є. Шаблій, О.І. Єременко, (UA). – Опубл. 26.05.2008, Бюл. №10. – 4 с. іл.

229. Технологія м'яса та м'ясних продуктів: Підручник / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.: За ред. М.М. Клименка. - К.: Вища освіта, 2006. – 640 с.

230. Гвоздєв О.В., Ялпачик Ф.Ю., Рогач Ю.П., Кюрчева Л.М. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: Навч. посібник / За ред. к.т.н. О.В. Гвоздєва. – Суми: Довкілля, 2004. – 420 с.

231. Чижиков Т.В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 302 с.

232. Корнюшко Л.М. Оборудования для производства колбасных изделий. Справочник. – М.: Колос, 1993. – 304 с.

233. Дацишин О.В., Ткачук А.І., Чубов Д.С. Машини та обладнання переробних виробництв: Навч. посібник / За ред. проф. О.В. Дацишина. – К.: Вища освіта, 2005. – 159 с.

234. Рекомендации по выбору режущего инструмента для волчков // Мясная индустрия. – 2003. - №8.

235. Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості. – К.: Елерон, 1993. – 108 с.

236. Сухенко Ю.Г., Литвиненко О.А., Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: Підручник. – К.: НУХТ, 2010. – 547 с.

237. Кіндрачук М.В., Сухенко Ю.Г., Бялик О.М. Підвищення адгезійнокогезійної міцності газотермічних покриттів трибо технічного призначення дискретним оплавленням та термоциклюванням лазером // Матеріали // Міжнар. Конф. "Канструкційні та функціональні матеріали. Львів.- 1997.- С.249.

238. Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості.- Київ: Елерон, 1993. – 107 с.

239. Сухенко Ю.Г., Сухенко В.Ю. Досвід організації дільниць зміцнювальних та відновлювальних технологій в харчовій і переробних галузях АПК // Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. - Київ: УкрІНТЕІ. - 1999. -№5-6. – С.36.

240. Kowstubhan M.V., Philip P.K. On the tool - life equation of TiN - coated high speed steel tools//Wear - 1991- V.143, №2-P. 267-275.

241. Tonshoff H.K., Wobker H.-G., Mohlfeld A., Fritsch A. Einflu(3 der Substratbearbeitung auf das Einsatzverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge // HTM: Harter.-techn. Mitt.- 1996.- V.51, №4.- P. 207-213.

242. Bromark M., Larsson M., Hedenqvist P., Olsson M.,Hogmark S. Influence of substrate surface topography on the erosion resistance of TiN coated tool steels // Tribologia- 1992.- V.I 1, №2.- P. 153-160.

243. Klocke F., Krig T., Coated Tools for Metal Cutting - Features and Applications // Annals of the CIRP. - 1999. - Vol. 48/2, - P.515-525.

244. Каменева, А.Л., Ханов А.М., Маточкин В.Ф. Улучшение эксплуатационных характеристик инструмента путем нанесения износостойких покрытий // Сб. "Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов" (Сборник докладов 2-й Международной конференции «ОТТОМ-2»). - Харьков: ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2001. - С. 118 - 122.

245. Масабуми Я. Строение и свойства слоев, полученных при азотировании стали. – Дэнки сэйко, 1978, т.49, № 1, с. 35-42.

246. Кузьмин В.В. Совершенствование процесса резания мясного сырья на основе математического моделирования формы режущих инструментов [Текст] / Дис...канд. техн. наук: 05.18.12. С-Петербург, 2008. – 129 с.

247. Сухенко В.Ю. Прогнозування впливу терміну автолізу м'яса на процеси руйнування деталей подрібнювальних машин [Текст] / В.Ю. Сухенко // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2013. – Вип.59. – С. 55-64.

248. Стечишин М.С. Підвищення зносостійкості ріжучого леза кутера [Текст] /М.С. Стечишин, М.В. Лук'янюк // Проблеми трибології. – 2005. - № 5. – С. 121-123.

249. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов [Текст] / А.Г. Григорьянц – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

250. Казаков Н.Ф. Технология пищевого машиностроения [Текст] Н.Ф. Казаков, Г.А. Мартынов. – М.: Машиностроение. 1982. – 296 с.

251. Некоз О.І. Розробка методів проектування кутерів з підвищеною ефективністю роботи [Текст] / О.І. Некоз, В.І. Осипенко, О.В. Батраченко // Обладнання та технології харчових виробництв. – Зб. наук. праць. – Донецьк, ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського. – 2010 - № 1. – С. 2837.

252. Горлач Р.В. Оптимизация состава и технологи производства сталей мясоизмельчительных комплексов [Текст] / Автореф. дис...докт. техн. наук: 05.02.01 // Р.В. Горлач. – СПб., 2003. – 16 с.

253. Голубець В.М. Захисні властивості і зносостійкість вакуумних іонно-плазмових покриттів [Текст] / В.М. Голубець, О.Б. Гасій, Я.В. Щуйко - Львів: Логос, 2008. – 104 с.

254. Сухенко Ю.Г. Исследование процесса резания тонколистовых оберточных материалов в заверточных автоматах: Автореф. дис...канд. техн. наук [Текст] /Ю.Г. Сухенко. – К.: КТІХП, 1981. – 24 с.

255. Абрамов Ю.А. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под. ред. Дальский А.М. – 5-е изд., перераб. и доп., Т.2 – М.: Машиностроение, 2001. – 496 с.

256. Сухенко Ю.Г. Забезпечення довговічності м'ясорізальних вовчків переробних підприємств [Текст] / Ю.Г. Сухенко, В.Ю. Сухенко, В.В. Доценко // Науковий вісник НУБіП України – К.: НУБіП України. 2010. – Вип. 144, ч.2. – С. 150-160.

257. Вайнберг А.А., Котляр Л.И. Эксплуатационная надежность оборудования зерноперерабатывающих предприятий.–М.: Колос, 1971. - 207 с.

258. Подлекарев Н.Н. Повышение срока службы сельскохозяйственных машин, работающих в коррозионно-активных средах /Автореф. дис.... д-ра.техн.наук.- Минск, 1984.- 35 с.

259. Проников А.С. Основы надежности и долговечности машин.- М.: Машгиз, 1960.- 250 с.

260. Пашечко М.И. Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий: [Монография] / М.И. Пашечко, В.М. Голубец, М.В. Чернец /. - К.: Наукова думка, 1993. - 343 с.

261. Структурутворення і формування трибо технічних характеристик властивостей евтектичних покриттів: [Монографія] // М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка, Ю.Г. Сухенко, В.М. Коржик/. – К.: Вища школа, 1997. – 120 с.

262. Сухенко Ю.Г. Дослідження електрохімічних процесів під час корозійно-механічного зношення іонно-плазмових покриттів: [Текст] / Ю.Г. Сухенко, О.Г. Дзюб, В.М. Голубець, О.Б. Гасій // Проблеми тертя та зношування. - К.: НАУ, 2007. - Вип. 47. - С.67-74.

263. Герасименко В. В. Коррозия сталей в нейтральных водных средах: [Монография] // В.В. Герасименко. – М. : Metallurgiya, 1981. – 192 с.

Наукове видання

Кабінет міністрів України

Національний університет біоресурсів і
природокористування України

Сухенко Владислав Юрійович

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ М'ЯСА
І СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН**

Друкується в авторській редакції

Художнє оформлення М.В. Головатого
Комп'ютерна верстка В.Ю. Сухенка

Підп. до друку 28.05.13. Формат 60×84 ¹/₁₆
Папір офсетний. Друк офс. Ум. друк. арк. 18
Наклад 300 прим.

Видавець і виготовлювач
Видавництво ТОВ «ЦП КОМПРИНТ»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єкта видавничої справи ДК № 4131 від 04.08.2011 р.