

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРМІСТКИХ ВІДХОДІВ У ВИРОБИ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ



**ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ
КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ
ПОЛІМЕРМІСТКИХ ВІДХОДІВ
У ВИРОБИ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Монографія

Хмельницький 2023

УДК 678.6:67/68
Т33

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Хмельницького національного університету,
протокол № 14 від 29.06.2023 р.*

Авторський колектив:

Синюк О. М., д-р техн. наук, проф. (вступ, розд. 1–3, висновки);
Іванішена Т. В., канд. техн. наук, доц. (розд. 1–3);
Кулешова С. Г., д-р техн. наук, проф. (розд. 5);
Надопта Т. А., канд. техн. наук, доц. (вступ, розд. 1, 5, висновки);
Горященко С. Л., канд. техн. наук, доц. (розд. 4)

Рецензенти:

Щербань Ю. Ю. – д-р техн. наук, проф., заст. директора з академічних питань та інформатизації, Київський фаховий коледж прикладних наук;
Злотенко Б. М. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки, Київський національний університет технологій та дизайну;
Мандзюк І. А. – д-р техн. наук, проф., проф. кафедри хімії та хімічної інженерії, Хмельницький національний університет

Матеріали подані в авторській редакції

Т33 **Теоретичні** засади та практична реалізація комплексної переробки полімермістких відходів у виробі легкої промисловості : монографія / О. М. Синюк, Т. В. Іванішена, С. Г. Кулешова, Т. А. Надопта, С. Л. Горященко. – Хмельницький : ХНУ, 2023. – 222 с.
ISBN 978-966-330-430-4

Розглянуті технології комплексної переробки полімермістких відходів, їх хімічної модифікації у композиційні матеріали для використання у виробках легкої промисловості. Запропоновані технології механічного подрібнення полімермістких відходів та обладнання для їх реалізації; нові методи модифікації полімерної сировини та технології її нанесення на деталі одягу та взуття, що покращує механічну і хімічну стійкість виробів.

Для фахівців спеціальностей «Галузеве машинобудування», «Хімічні технології та інженерія», «Технології легкої промисловості», студентів і аспірантів ЗВО.

УДК 678.6:67/68

ISBN 978-966-330-430-4

© Авт. колектив, 2023
© ХНУ, оригінал-макет, 2023

Вступ

Сьогодні проблема утилізації полімермістких відходів охоплює різноманітні аспекти виробництва та управління відходами і має на меті забезпечити сталу та екологічно збалансовану промисловість [1]. Як відомо, вирішення питань, пов'язаних з охороною навколишнього середовища, вимагає значних капітальних вкладень. Вартість знищення полімерних та полімермістких відходів приблизно у вісім разів перевищує витрати на знищення більшості промислових і майже у три рази – на знищення побутових відходів. Це пов'язано зі специфічними особливостями полімерних матеріалів, які значно ускладнюють або роблять непридатними відомі методи знищення твердих відходів.

В останні роки намітились тенденції утилізації відходів шляхом піролізу (повного знищення відходів) або механічної і хімічної переробки з можливістю повторного використання. Сучасні технології утилізації полімерних і полімермістких відходів дозволяють повторно використовувати їх при виготовленні нових виробів, зокрема для виробів легкої промисловості. При цьому, капітальні та експлуатаційні витрати за основними способами переробки полімерних і полімермістких відходів не перевищують, а у низці випадків навіть є нижчими від витрат на їх знищення.

При утилізації погіршуються експлуатаційні та реологічні характеристики більшості полімерів, тому важливе значення при переробці полімерних і полімермістких відходів у вироби, зокрема у деталі одягу та взуття, надавати збереженню фізико-механічних характеристик, притаманних первинному полімерному матеріалу.

Керування процесом руйнування полімерних та полімермістких відходів шляхом створення в них певного напружено-деформованого стану з подальшою хімічною модифікацією рециклатів дозволить отримати нові композиційні полімерні матеріали, які можуть бути використані при виробництві виробів легкої промисловості, а у деяких випадках навіть покращити їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. Сьогодні процес повторної переробки полімерних і полімермістких відходів у деталі одягу і взуття, які матимуть необхідні експлуатаційні показники, вивчений недостатньо.

Вітчизняними та закордонними вченими проводились дослідження показників зносостійкості матеріалів для виготовлення одягу шляхом систематизації факторів та критеріїв зношування. Поставлено проблему підвищення зносостійкості та покращення експлуатаційних властивостей одягу конструктивним та технологічним шляхом з врахуванням якісних характеристик наявних матеріалів, з метою продовження життєвого циклу виробу. Автори роботи [2] вирішували згадану проблему застосуванням суміші полімерів і за рахунок їх здатності утворювати композиційні полімерні системи, що об'єднують властивості окремих полімерів і проявляють нові. Також особлива увага приділена дослідженням щодо покращення експлуатаційних характеристик традиційного термопластичного поліуретану, який використовується для одягу та взуття, на основі чого запропонований термопластичний поліуретановий еластомер, який має значно кращий блиск, кращу водостійкість, вищу стійкість до стирання та текстуру натуральної шкіри [3].

Особливу увагу науковці приділяють отриманню полімерних виробів з вторинної сировини [4] та встановленню відповідності їх фізико-механічних характеристик нормативним. В роботі [5] науковці досліджували переробку відходів пластику, а саме поліетилену високої щільності, у нові композиційні матеріали підвищеної міцності та низькою вологопроникністю. Багато закордонних вчених вивчають способи перетворення пластмас у цінні вироби та розробку власне переробних полімерів [6]. Розглядають за кордоном і інші напрями переробки, однак відзначають, що повне управління полімерними відходами вимагає додаткових комбінацій процесів біодеградації, спалювання та рециклінгу [7, 8]. Велика кількість науковців значну увагу приділяють гібридній переробці твердих пластикових відходів: механічній та хімічній [9, 10].

Таким чином, як слідує із зазначеного, не проводились дослідження експлуатаційних показників одягу та взуття, виготовлених з додаванням повторно перероблених полімерних відходів.

Досвід експлуатації одягу та взуття в умовах інтенсивного зношування під впливом механічних сил, температур та хімічних процесів змушує зміцнювати ті деталі одягу та взуття, які піддаються найбільшим механічним та хімічним впливам під час носки виробів. У зв'язку з цим, у монографії авторами запропоновані технології виготовлення полімерної суміші, на основі рециклатів полімерних відходів, та технології нанесення цієї суміші на елементи одягу та взуття, які у процесі їх експлуатації піддаються значним навантаженням та температурним і хімічним впливам.

При цьому, процес переробки полімерних і полімермістких відходів у вироби легкої промисловості розглядається як система, яка складається з механічного подрібнення відходів і хімічної модифікації структури отриманих рециклатів. В основі цієї системи покладено механізм керованого руйнування полімерних відходів та закономірності, що пов'язують технологічні та конструктивні параметри обладнання і хімічну модифікацію структури отриманих рециклатів з експлуатаційними властивостями виробів легкої промисловості. За допомогою такого рециклінгу передбачається отримати гранулят, який додають до первинного матеріалу, або композитну суміш для нанесення на деталі одягу та взуття.

Розробка нових технологій комплексної переробки полімермістких відходів, що засновані на керованому руйнуванні полімерних відходів та хімічній модифікації рециклатів, дозволить отримати нові композиційні полімерні матеріали з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Їх застосування у виробках легкої промисловості, зокрема, спеціального призначення, покращить механічну, хімічну стійкість та зносостійкість одягу та взуття для працівників оборонної і медичної галузей, працівників МНС та людей, що ведуть активний спосіб життя.

Розділ 1.

Аналіз стану проблеми виробничих відходів легкої промисловості

Процес виробництва виробів легкої промисловості супроводжується утворенням великого обсягу відходів, які негативно впливають на навколишнє середовище та людське здоров'я. Варіанти поводження з відходами часто обмежуються спалюванням або захороненням. Зокрема, необроблені або неправильно утилізовані відходи легкої промисловості можуть призвести до забруднення навколишнього середовища. Також неефективна утилізація відходів може призвести до втрати цінних ресурсів і збільшення витрат на утилізацію та очищення навколишнього середовища від шкідливих речовин [9]. Це вказує на необхідність термінового переходу на переробку матеріалів, щоб запобігти подальшому засмічуванню навколишнього середовища. Тому поряд з проблемами модернізації обладнання для виробництва конкурентоспроможної продукції виникають проблеми переробки та повторного використання відходів як вторинних ресурсів для виробництва нових продуктів [10].

Основною метою управління відходами легкої промисловості є максимальне зниження негативного впливу на навколишнє середовище та створення сталої й ефективної системи утилізації відходів, а також повторного застосування отриманих в процесі переробки композицій для виробництва нових швейних виробів і деталей взуття. Це зменшить потребу у використанні нових природних ресурсів, енергії для виробництва та першочергово, зменшить кількість відходів легкої промисловості.

1.1. Класифікація відходів легкої промисловості

Як відомо, легка промисловість охоплює такі галузі, як текстильна, взуттєва, шкіряна та інші, які спеціалізуються на виробництві одягу, взуття, аксесуарів та текстильних виробів [11]. І кожна із зазначених галузей, на усіх етапах виробництва має значну кількість відходів. Види відходів, що утворюються, а також їхня кількість залежать від виду вихідної сировини, технологій, стадії обробки, призначення кінцевого продукту тощо.

Для детального аналізу та розробки технології переробки запропоновано загальну класифікацію відходів легкої промисловості (див. рис. 1.1).

Відходи легкої промисловості становлять досить значну частину всіх твердих відходів. Частка текстилю у твердих побутових відходах складає 4,6–5,4 %. Ще більший відсоток складають відходи самої текстильної промисловості та інших промислових виробництв. Вона досягає 25 % всіх відходів, що переробляються у світі. Це величезні резерви, які можна використати для виробництва різних виробів.

У промисловому виробництві текстильних виробів (тканини, трикотаж, килими, неткані полотна, нитки, мотузки, канати тощо) утворюються відходи у вигляді міжлекальних обрізків, клаптів, сплутаних волокон, кінців пряжі тощо. В інших промислових виробництвах текстильні відходи утворюються в результаті використання готових текстильних матеріалів (спецодяг, фільтрувальні, протиральні і пакувальні тканини тощо).

Крім того, існують текстильні відходи побутового споживання, тобто зношені і приведені у непридатність вироби особистого вжитку (одяг, взуття) і домашнього вжитку (килими, драпірування).

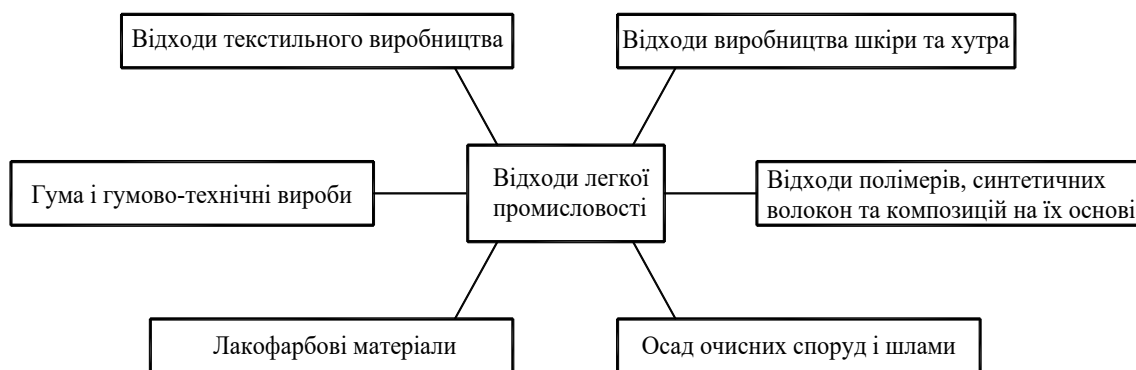


Рис. 1.1. Загальна класифікація відходів легкої промисловості

На сьогодні текстильна промисловість значною мірою базується на синтетичних матеріалах. Технології утилізації відходів цих матеріалів описані нижче.

Ще одна група відходів при виробництві текстильних виробів, при переробці шкіри та хутра, – стічні води, які з'являються при обробці вовни, що містять вовняний жир, залишки вовни, механічні домішки рослинного, органічного і мінерального походження, розчинні органічні і неорганічні сполуки. Велика частина домішок – найсильніші оксиди, стимулятори, що завдають шкоди корисній флорі, знищують її.

У процесі підготовки і переробки шкіри та хутра з'являються відходи, які входять до таких груп [12–14]: відходи до дублення (крайові ділянки шкур, міздря голини та інші обрізки); відходи після дублення (стружка, обрізки, шматки шкур); пиловидні шкіряні відходи; відходи з очисних споруд після дублення (дубильні розчини рослинного, органічного і мінерального походження).

На всіх підприємствах легкої промисловості використовують обладнання, що включає гумотехнічні вироби, які слід утилізувати після закінчення терміну їх експлуатації.

Залежно від кількості введеної при вулканізації сірки гуми можна розділити на м'які (2–8 % S), напівм'які (8–12 %), напівтверді (12–20 %) і тверді (25–30 %).

Відходи гумотехнічних виробів, як і пластмас, утворюються в чотирьох основних сферах: первинне виробництво полімерів; виробництво гумотехнічних виробів; промислове споживання; побутове використання.

Основну масу гумотехнічних виробів використовують у технологічному обладнанні та в автомобільному транспорті підприємств легкої промисловості, інших галузей промислового виробництва. Найважливіші види гумотехнічних виробів – автомобільні покришки, конвеєрні стрічки, приводні ремені, різні деталі тертя, підлогові та покрівельні покриття, прогумовані тканини, футерувальні і гідроізоляційні матеріали.

Відходи гумотехнічних виробів поділяють на невулканізовані і вулканізовані. Перші можуть бути повернуті в первинне виробництво, другі піддають механічній або хімічній переробці. Вторинна механічна переробка дозволяє отримати ряд цінних виробів і матеріалів: плити, шифер, антивібраційні, гідро- і електроізоляційні прокладки, блоки для окантовки дамб, причалів, хвилерізів, протизсувних огорож. Крім того, з відходів вулканізованих гум можуть бути отримані наповнювачі для нових полімерних виробів легкої промисловості, наприклад, для підштов.

Виробництво пластику в світі подвоюється кожні 5 років, у той час як період подвоєння виробництва інших матеріалів становить 10, 15 і навіть 20 років. Звідси катастрофічне зростання обсягу твердих відходів у розвинених країнах, який, незважаючи на всі зусилля, не знижується за межі 1 % від обсягу виробництва і становить: у США – 6 млн т, в Японії – 4 млн т, у Німеччині – 1,5 млн т, в Англії – 1 млн т, в інших країнах – 0,5 млн т.

У цілому відходи пластмас чітко поділяють на чотири види: відходи виробництва; переробки; промислового та побутового споживання.

Частка кожного виду в загальному обсязі зростає з кожним роком. Основна проблема полягає в тому, що чим глибший ступінь переробки, тим складніші процеси утилізації. Тут правомірно говорити про якість відходів з точки зору їх здатності до утилізації та слід визнати, що відходи пластмас з цієї точки зору найскладніші. Тому у наш час розвиваються два технологічних напрями, покликаних вирішити проблему відходів полімерних матеріалів – удосконалення технології:

- виробництва і переробки пластмас, що забезпечує мінімізацію відходів;
- переробки відходів полімерних матеріалів.

У технології утилізації відходів полімерних матеріалів є один складний аспект, пов'язаний з операцією, яка передує будь-якому наступному процесу їх переробки. Йдеться про подрібнення відходів, і складність полягає у тому, що полімерні матеріали в більшості своїй є в'язкими, в'язко-пружними та пластичними, м'якими, піноподібними, волокнистими або плівковими матеріалами.

За можливістю переробки полімерних матеріалів їх розташовують у такий ряд: полістирол (ПС); поліетилен (ПЕ); поліетилентерефталат (ПЕТФ); поліпропілен (ПП); поліамід (ПА); полівінілхлорид (ПВХ); поліуретан (ПУ) [9].

В окремих випадках переробку вдається виключити; наприклад, індивідуальні (однорідні) відходи термопластичних полімерів переробляють на типовому обладнанні у виробі менш відповідального призначення. Колективні відходи піддають гідроекструзії (видавлювання через вузькі отвори), при якій спостерігається саморегулювання характеристик в'язкості окремих типів полімерів.

Використовують також двоканальну гідроекструзію, при якій внутрішні шари полімеру є відходами, а тонкий зовнішній шар формується з первинного високоякісного полімерного матеріалу. Значну частину відходів полімерних пластмас переробляють на піновироби, використовуючи для спінування суміші карбонатів з лимонною кислотою.

В цілому необхідно враховувати, що механічні характеристики вторинних виробів, як правило, гірші, ніж первинні, але все ж економічний ефект вторинної переробки залишається досить високим через поліпшення екологічних показників середовища, дешевизну сировини, простоту технології та економію енергії. Крім того, завдяки дешевизні вторинних матеріалів, з них можна виготовляти будівельні матеріали, герметичні ємкості та контейнери для захоронення отруйних речовин.

У межах монографії досліджуємо особливості переробки полімерних відходів, що виникли в процесі виробництва виробів легкої промисловості, результатом чого є нові виробі взуттєвого, текстильного та швейного виробництв. Розглянемо більш детально відходи текстильного та взуттєвого виробництва.

1.2. Відходи текстильного виробництва

Виробництво текстилю є однією з найбільш широко розповсюджених та важливих галузей промисловості у світі. Однак, разом із зростанням обсягів виробництва текстильних матеріалів збільшується й кількість відходів, пов'язаних з цією галуззю. Проб-

лема виробничих відходів, особливо текстильних, стає все більш актуальною та потребує детального аналізу та розробки ефективних стратегій їх управління.

Класифікація текстильних відходів важлива для кращого розуміння їхнього складу та властивостей, а також для вибору найкращих методів їх переробки та управління.

Класифікація текстильних волокон означає класифікацію волокон на основі їх походження, хімічного складу та фізичних властивостей [1].

Текстильні волокна, а отже і відходи текстильних матеріалів, можна розділити на дві основні категорії залежно від типу волокон: натуральні та штучні (рис. 1.2).

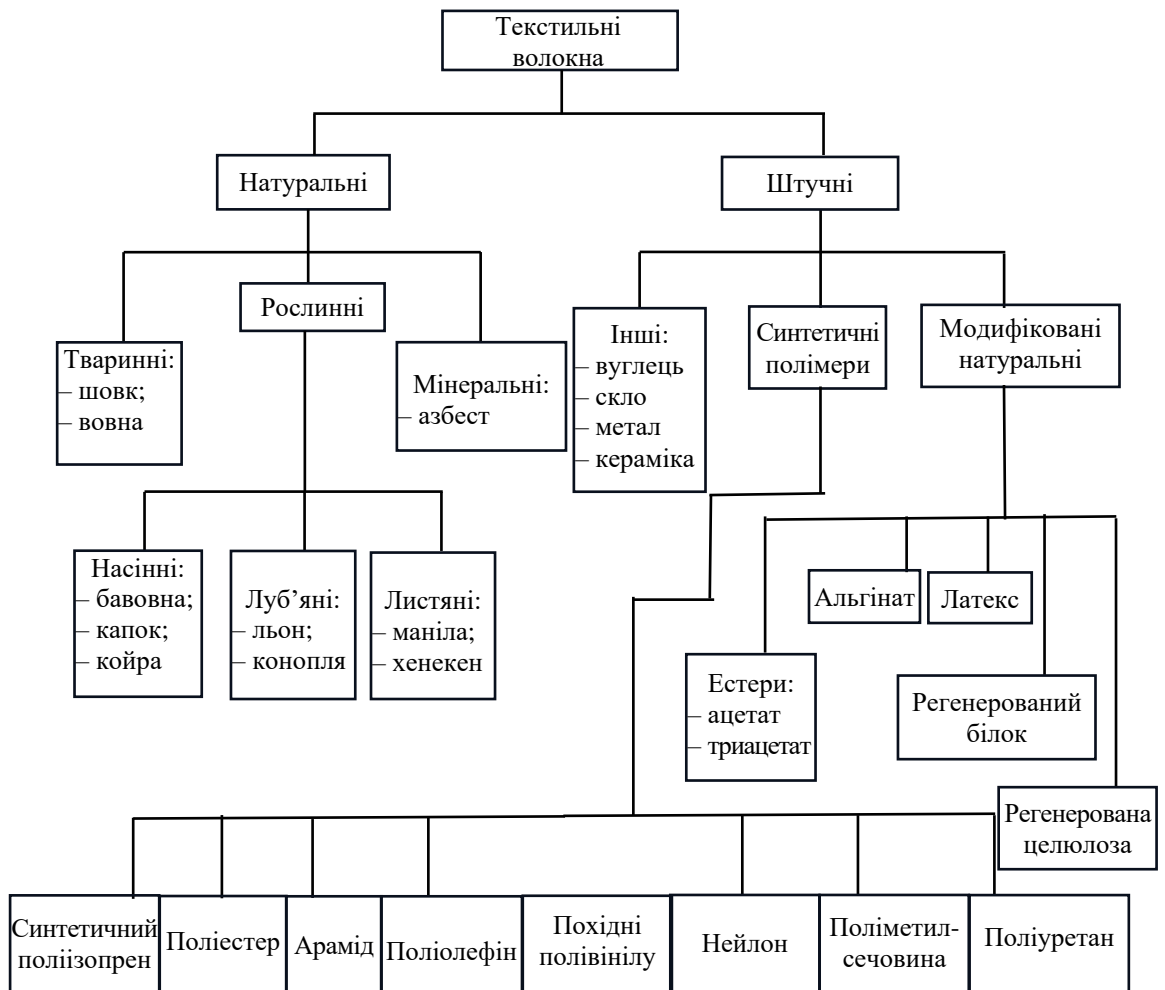


Рис. 1.2. Класифікація текстильних відходів за видами волокон (походження та склад)

Натуральні волокна – волокна, отримані з рослин, тварин і мінералів. Приклади натуральних волокон включають бавовну, вовну, шовк, льон, коноплі, джут і рамі. Ці волокна використовуються для виготовлення широкого спектру продуктів, включаючи текстиль, папір і будівельні матеріали. Вони також використовуються у виробництві біопластику та біокомпозитів. Натуральні волокна відновлюються, біологічно розкладаються та вважаються екологічно чистою альтернативою синтетичним волокнам.

За походженням і властивостями натуральні волокна можна класифікувати на кілька категорій.

Деякі загальні класифікації натуральних волокон включають:

- **рослинні волокна**: отримують з рослин, таких як бавовна, льон, коноплі та джут;
- **тваринного походження**: отримують з тварин, таких як вовна, шовк, кашемір і альпака;
- **целюлозні**: отримують з клітинних стінок рослин, таких як бавовна, льон і коноплі;
- **білкові**: отримують з шерсті та продуктів життєдіяльності тварин (вовна, кашемір), шовк тощо;
- **луб'яні**: отримують зі стебла деяких рослин, таких як льон, коноплі та джут;
- **листяні**: отримують з листя деяких рослин, таких як сизаль і абака.

Деякі волокна можуть відповідати більш ніж одній класифікації. Наприклад, бавовна є рослинним і целюлозним волокнами.

Синтетичні волокна, є волокнами, які штучно створені з хімічних сполук. Ці волокна не зустрічаються в природі і зазвичай виготовляються з продуктів на основі нафти. Приклади синтетичних волокон включають поліестер, нейлон, акрил і спандекс. Ці волокна часто використовуються для виготовлення широкого асортименту продуктів, включаючи одяг, оббивку та промислові матеріали. Синтетичні волокна відомі своєю довговічністю, міцністю та стійкістю до усадки та зминання, що робить їх популярними для використання в одязі та інших текстильних виробках. Вони також дешевші у виробництві, ніж натуральні волокна, що робить їх більш економічно ефективними для багатьох застосувань. Однак вони не піддаються біологічному розкладанню, а також вимагають значної кількості енергії для виробництва, що робить їх екологічно нешкідливими.

Синтетичні волокна можна класифікувати залежно від їх хімічного складу та процесу виробництва.

Полімерні волокна утворюються шляхом полімеризації (поліконденсації) синтетичних мономерів, таких як поліестер, нейлон та акрил.

Скловолонна виготовлені зі скла та відомі своєю високою міцністю. Вуглецеві волокна виготовляються з вуглецю та відомі своєю високою міцністю, низькою вагою та термостійкістю. Металеві волокна виготовляються з металу, наприклад нержавіючої сталі, і відомі своєю високою міцністю та термічною стабільністю.

Ароматичні поліамідні волокна виготовляються з ароматичних поліамідів і відомі своєю високою міцністю, термостабільністю та хімічною стійкістю.

Волокна віскозного шовку виготовлені з целюлози та відомі своєю м'якістю, здатністю драпіруватися та вбирати вологу. Ацетатні волокна виготовлені з ацетату целюлози та відомі своєю м'якістю, драпіруванням і блиском. Модальні волокна виготовлені з целюлози бука і відомі своєю м'якістю, здатністю драпіруватися та відводити вологу.

Останні три класи волокон також ще називають штучними, тобто такими, які отримані внаслідок хімічної модифікації натуральних волокон.

Як видно, в основі всіх цих волокон лежать полімерні сполуки, основні з яких зустрічаються у текстильних матеріалах і включають:

– **поліестер** ($C_{10}H_8O_4$)_n. Він є широко використовуваним полімером у текстильній промисловості, має високу міцність, стійкість до зношування, добру стійкість до забруднень, вироби з використанням його волокон легкі у догляді. Поліестерні тканини часто використовуються для виготовлення повсякденного та спортивного одягу, постільної білизни, штор та інших текстильних виробів [2];

– **нейлон** ($C_{12}H_{22}N_2O_2$)_n. Він також є популярним полімером у текстильній промисловості і відомий своєю високою міцністю, гнучкістю та стійкістю до зношування.

Нейлонові тканини часто використовуються для виготовлення штучної білизни, нижньої білизни, спортивного одягу, ниток та інших текстильних матеріалів [3];

– **віскоза** ($C_6H_{10}O_5$)_n. Це штучна волокниста тканина, яка виготовляється з природного деревного целюлозного матеріалу. Вона має м'якість та комфорт, схожі на натуральні текстильні волокна, і використовується для виготовлення суконь, блузок, шарфів та інших легких текстильних виробів;

– **акрил** ($C_3H_4O_2$)_n. Він є синтетичним полімером, який використовується для вироблення широкого спектру текстильних матеріалів. Цей полімер володіє високою стійкістю до ультрафіолетового випромінювання, зносу та розтягування. Акрилові волокна мають м'яку, легку та теплу текстуру, схожу на натуральне шерстяне волокно. Тканини, виготовлені з акрилових волокон, добре зберігають форму, мало мнуться та не втрачають колір під впливом сонячних променів. Це робить їх популярними в матеріалах для одягу, шапок, шарфів, рукавичок та інших зимових виробів;

– **поліаміди** ($C_6H_{11}NO$)_n. Поліаміди, такі як нейлон, є популярними полімерними сполуками у текстильній промисловості. Вони відрізняються високою міцністю, стійкістю до розтягування, абразії та зношування. Поліамідні тканини широко використовуються для виготовлення одягу, білизни, панчох, штучного хутра та інших текстильних виробів [4];

– **целюлоза** ($C_6H_{10}O_5$)_n. Натуральна тканина бавовна за хімічним складом характеризується саме целюлозою.

Вказані хімічні формули ($C_6H_{10}O_5$, $C_{12}H_{22}N_2O_2$, $C_6H_{10}O_5$, $C_{10}H_8O_4$, $C_6H_{11}NO$) є загальними формулами для полімерних ланцюгів та не враховують точний склад конкретних текстильних матеріалів. Реальний склад може включати додаткові компоненти, добавки та обробки залежно від типу тканини та її використання (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Хімічний склад тканин як полімерних сполук

Тканина	Хімічний склад	Полімерна сполука
Поліестер	Етиленгліколь та терефталева кислота	Поліетилентерефталат (ПЕТФ)
Віскоза	Целюлоза	Сульфатна целюлоза
Бавовна	Целюлоза	–
Акрил	Акрилонітрил та інші вуглеводні	Поліакрилонітрил (ПАН)
Спандекс	Поліуретан та поліестер	Сегментований блок кополімер
Поліпропілен	Пропілен	Поліпропілен
Поліетилен	Етилен	Поліетилен
Поліамід	Мономери амінокислот або амінів та карбонові кислоти	Поліамід (наприклад, нейлон-6, нейлон-66)

Часто використовують суміші волокон. **Змішані волокна** – це волокна, виготовлені шляхом поєднання двох або більше різних типів волокон. Отримана суміш може мати властивості, які відрізняються від властивостей окремих волокон. Змішування волокон приводить до покращення характеристик тканини, створення нових текстур та зменшення витрат. Прикладами змішаних волокон є бавовна-поліестер, вовна-нейлон і шовк-віскоза. Співвідношення волокон в суміші може змінюватися залежно від бажаних властивостей, наприклад, суміш поліестеру та бавовни використовується для виготовлення тканини, яка є стійкою до зминання та міцною, а також м'якою та дихаючою. Змішані волокна є хорошим компромісом між натуральними та синтетичними волокнами, оскільки вони можуть використовувати переваги позитивних характеристик кожного волокна, одночасно зменшуючи їхні негативні властивості.

Основні хімічні сполуки, що зустрічаються в комбінованих тканинах, можуть включати наведені нижче.

Поліестер/нейлон:

- поліестер ($C_{10}H_8O_4$)_n;
- нейлон ($C_{12}H_{22}N_2O_2$)_n.

Комбіновані тканини з поліестеру та нейлону поєднують високу міцність та стійкість до зношування поліестеру з високою еластичністю та в'язкістю нейлону. Це дозволяє отримати тканини з властивостями, які поєднують переваги обох полімерів.

Поліестер/віскоза:

- поліестер ($C_{10}H_8O_4$)_n;
- віскоза ($C_6H_{10}O_5$)_n.

Комбіновані тканини з поліестеру та віскози комбінують міцність та стійкість поліестеру з природною м'якістю та комфортом віскози. Вони можуть мати добре вбирання вологи та гігієнічні властивості, що робить їх популярними у текстильній промисловості.

Поліестер/бавовна:

- поліестер ($C_{10}H_8O_4$)_n;
- бавовна ($C_6H_{10}O_5$)_n.

Комбіновані тканини з поліестеру та бавовни комбінують міцність та стійкість поліестеру з природними, м'якими та дихаючими властивостями бавовни. Вони поєднують в собі комфорт та довговічність, що робить їх популярними.

Поліестер/акрил:

- поліестер ($C_{10}H_8O_4$)_n;
- акрил ($C_{10}H_8O_4$)_n.

Комбіновані тканини з поліестеру та акрилу поєднують міцність та стійкість поліестеру з м'якістю, теплозбереженням та комфортом акрилу. Вони можуть бути використані для виготовлення теплих і легких текстильних виробів (светрів, шапок, шарфів тощо).

Поліестер/спандекс:

- поліестер ($C_{10}H_8O_4$)_n;
- спандекс ($C_8H_{10}O_2$)_n.

Комбіновані тканини з поліестеру та спандексу поєднують міцність та стійкість поліестеру з високою еластичністю та гнучкістю спандексу. Це дозволяє отримати текстильні матеріали, які забезпечують комфорт, рухливість та добру посадку на тіло [16].

Відходи текстильного виробництва охоплюють широкий спектр матеріалів, включаючи залишки тканин, нитки, обрізки, непридатні для продажу вироби та інші матеріали, які не використовуються у кінцевому виробництві. Відходи виробництва, що утворюються під час виробництва текстилю та одягу, включають волокна, пряжу, тканини та одяг, як показано в таблиці 1.2. Кількість відходів може коливатися від 12 % до 15 % або досягати 25–30 % [17].

Таблиця 1.2

Матеріальні відходи при виробництві текстильного одягу

Процеси виробництва	Вихідні матеріали	Матеріальні відходи
Прядіння	Натуральні та синтетичні волокна	Бавовняний ворс, пошкоджена пряжа, натуральна і синтетична пряжі
В'язання/ткацтво	Натуральна і синтетична пряжі	Сіра/необроблена тканина, залишки пряжі
Опорядження	Сіра/необроблена тканина	Відбракована кольорова тканина, готова тканина
Виробництво одягу	Готова тканина	Випади, експериментальні зразки, одяг

Ланцюжок виготовлення текстилю включає такі операції [18]:

– **виробництво волокон** – як натуральних (бавовна, вовна, шовк, льон, коноплі та ін.), так і синтетичних волокон (поліестер, нейлон, акрил, поліпропілен та ін.). Інші промислові волокна виробляються з природних ресурсів, таких як віскоза, модал, ліоцель тощо;

– **виробництво пряжі** – бавовна переробляється в пряжу за допомогою кільцевого/роторного прядильного механізму. Синтетичні волокна також переробляються в синтетичну пряжу за допомогою механізму розплаву/сухого/мокрого прядіння;

– **виробництво тканин** – трикотажні та ткані матеріали в основному використовуються для виробництва одягу. Трикотажна та ткацька промисловість обробляють два типи матеріалів, трикотажні та ткані, відповідно;

– **опорядження** – включає обпалювання, розшліхтування, відварення, вибілювання, мерсеризація, ворсування, фарбування в потрібний колір та оздоблення в будь-якій формі – волокно, пряжа, тканина та одяг.

На етапі виробництва пряжі, під час обробки пряжі з бавовни в подальшій операції прядіння, накопичення коротких волокон відбувається навколо машин і на підлозі, і це відоме як «бавовняний пух». Крім того, пошкоджені або неякісні нитки, що залишилися після виробництва, вважаються відходами прядильної промисловості. Трикотажна і ткацька промисловість виробляє трикотажні і ткані тканини, для яких в якості основної сировини використовується бавовняна пряжа. Матеріальні відходи на цих стадіях складаються з пухових волокон і сірих або незавершених тканин. Пофарбовані та готові надлишки тканин або тканини, відбраковані, стають матеріальними відходами на стадії вологої обробки [19]. Такі відходи мають негативний вплив на довкілля, зокрема на якість ґрунту, повітря та води. Крім того, вони вимагають значних витрат на утилізацію та можуть створювати проблеми з управлінням відходами для підприємств текстильної галузі. Одним із основних викликів, пов'язаних з виробничими відходами текстильного виробництва, є потреба у розробці та впровадженні ефективних методів їх переробки та утилізації. Інноваційні технології, такі як рециклінг текстильних матеріалів, можуть забезпечити зменшення негативного впливу відходів на довкілля та одночасно створити нові можливості для використання вторинної сировини.

Крім того, управління виробничими відходами текстильного виробництва потребує впровадження стратегій зменшення виробництва відходів на самому початку процесу. Це може включати оптимізацію використання матеріалів, впровадження більш ефективних технологій та процесів, а також забезпечення належного управління залишками та відходами на кожному етапі виробництва.

Однією з ключових стратегій є впровадження замкнутого циклу виробництва, де відходи текстильного виробництва стають вторинною сировиною для нових продуктів. Це може бути досягнуто шляхом розробки технологій рециклінгу та переробки відходів, які дозволяють отримати якісні матеріали для подальшого використання. Крім того, важливо сприяти свідомому споживанню та створенню ринку для сталої моди. Це може бути досягнуто шляхом популяризації поняття «екологічної моди» та створення попиту на продукти, які виготовлені з матеріалів вторинної переробки.

Насамперед, для ефективного управління виробничими відходами текстильного виробництва необхідна співпраця всіх зацікавлених сторін, включаючи виробників, урядові органи, дослідницькі установи та громадські організації. Важливо встановити прозорість та стандарти в області управління відходами, а також забезпечити розвиток інфраструктури для їх переробки та утилізації [20].

Відходи текстильного виробництва можуть мати різну структуру та хімічний склад, залежно від технологічного процесу утворення та виробничих етапів. Розглянемо кожен з них та їхній хімічний склад окремо.

Відходи від виробництва сировини (волокна та пряжа) включають в себе:

– нитки та обрізки волокон: утворюються під час різання та обробки волокон на етапі підготовки сировини. Хімічний склад може включати полімери, такі як поліестер $(C_{10}H_8O_4)_n$, бавовна $(C_6H_{10}O_5)_n$, віскоза $(C_6H_{10}O_5)_n$, а також домішки фарбувальних речовин та змащувальних матеріалів. Зазначені формули представляють полімерні ланцюги, які складають основну структуру кожного матеріалу. У цих випадках $(C_6H_{10}O_5)_n$ позначає повторювальну одиницю целюлози, яка є основним компонентом бавовни та віскози;

– відходи від виробництва пряжі: можуть включати необроблені волокна, обрізки пряжі, забруднення та непридатні для використання вироби. Хімічний склад буде залежати від використаних матеріалів, таких як бавовна, поліестер, віскоза тощо [21].

Зазначена група текстильних відходів містить:

– залишки тканин та виробництва текстильних матеріалів: включають обрізки тканин, прокладки, випадки виробництва, помилкові вироби тощо. Хімічний склад буде залежати від типу тканини (наприклад, бавовна, шовк, синтетичні волокна) та використаних речовин для фарбування та обробки;

– відходи фарбування і друку: можуть містити різні барвники, пігменти, фіксатори та хімічні речовини, які використовуються для нанесення зображень або зміни кольору тканини [22];

– виробництво одягу – збирання готових тканин в одяг за допомогою підрозділів виробництва одягу, що складається з розкрою, виготовлення викройки, шиття та оздоблення.

На стадії виробництва одягу утворюються випадки та залишки тканин із секції розкрою, а надлишок одягу розвивається через надлишок виробництва зразків для розробки та кінцевої продукції.

Відходи швейної промисловості являють собою суміш натуральних волокон, синтетичних волокон та інших речовин, таких як металеві блискавки, акрилові гудзики, дерев'яні гудзики, гудзики та металеві застібки, що використовуються в одязі, що ускладнює його розкладання.

У швейному виробництві утворюються відходи, які становлять значну частку від загального обсягу використаних текстильних матеріалів. Ці відходи включають обрізки тканин, некорисні деталі та залишки ниток, які можуть бути піддані подальшій переробці та використані для зменшення впливу текстильної промисловості на довкілля.

Технологічний процес виготовлення одягу складається з таких етапів:

- 1) створення моделі;
- 2) розробка конструкції і технічної документації;
- 3) підготовка і розкрій матеріалів;
- 4) пошиття виробів;
- 5) кінцева обробка;
- 6) контроль якості;
- 7) складування та зберігання готових виробів.

Технологія швейного виробництва стає механізованою, її ефективність обумовлюється застосуванням спеціальних машин та обладнання. Змінюються організаційні форми виробництва, підвищується рівень автоматизації підприємств, особливо, при розробці моделей, підготовки виробництва, розкрою, пошитті та на обробних операціях.

Виконання основних етапів швейного виробництва проводиться в таких цехах, як експериментальний; підготовчий; розкрійний та швейний.

Основна задача експериментального цеху – своєчасна та якісна підготовка моделей до запуску у виробництво.

Основна задача підготовчого цеху – це ритмічне своєчасне забезпечення розкрійного цеху матеріалами відповідно до завдання.

Задача розкрійного виробництва – ритмічне, своєчасне, безперебійне постачання швейних цехів кроєм.

Структура конкретного текстильного підприємства залежить від багатьох факторів, особливостей і обсягу продукції, що випускається, зв'язків з іншими підприємствами, методів виготовлення продукції.

Виходячи з цієї класифікації, можемо скласти відповідні схеми утворення текстильних відходів на масових і серійних типах виробництва (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Схема утворення текстильних відходів на масових і серійних типах виробництва

Основними волокнами, які використовуються для виробництва одягу синтетичні волокна (~62,2 %), потім бавовна (~24,4 %) та інші, такі як віскоза та вовна (~14 %) [14]:

– **тканинні обрізки та відходи швейного виробництва.** Під час пошиття одягу та текстильних виробів, виникають обрізки тканин, відходи під час підгонки та модифікації виробів, а також випадки, які виникають під час обробки і зшивання. Ці відходи можуть містити текстильні матеріали різних типів (бавовна, шовк, поліестер тощо) та хімічні речовини, що застосовуються при виробництві (наприклад, фарбники, змашувальні речовини);

– **відходи під час крою та моделювання.** Під час процесу крою тканин для пошиву виробів утворюються відходи виготовлення лекал та моделей, а також обрізки тканин після крою. Ці відходи можуть містити різні текстильні матеріали та бути забрудненими розчинниками або клеями, використовуваними під час процесу моделювання;

– **відходи від фурнітури та аксесуарів.** При виготовленні одягу та текстильних виробів використовують різні види фурнітури: гудзики, блискавки, підкладки тощо. Відходи від цих матеріалів можуть включати металеві елементи, пластикові компоненти та інші матеріали, що використовуються у фурнітурі;

– **відходи від прикрашання та пришивання.** При прикрашанні та декоруванні текстильних виробів використовуються різні матеріали, такі як нитки, стрази, гудзики, стрічки, мереживо, нашивки тощо. Під час обробки та пришивання цих матеріалів можуть утворюватися обрізки, відходи ниток та забруднення від клеїв або фіксаторів, які використовуються для їх закріплення;

– **відходи від обробки та оброблення поверхні.** При обробці та закінченні текстильних виробів можуть використовуватись різні хімічні речовини, які допомагають покращити якість та вигляд виробу. Відходи від цих процесів можуть містити розчинники, фіксатори, змашувальні матеріали, фарбники та інші хімічні речовини. Конкретний хімічний склад відходів буде залежати від типу тканини, використаних фарбувальних і обробних речовин, а також виробничих процесів, що застосовуються на конкретному підприємстві.

Ці відходи можуть містити як природні компоненти, такі як бавовна або шовк, так і синтетичні матеріали, такі як поліестер $(C_{10}H_8O)_n$ або нейлон $(C_{12}H_{22}N_2O_2)_n$. Обидва матеріали вологостійкі, швидко сохнуть та не вбирають багато вологи, забезпечуючи комфорт під час носіння. Вони мають добру стійкість до забруднень і відбілювання, що

робить їх легкими у догляді та підтриманні чистоти. Нейлон і поліестер також добре переносять фарбування і друк, що дозволяє створювати широкий асортимент дизайнів та кольорів у текстильних виробках. Крім того, вони можуть містити речовини, які використовуються для фарбування, просочування або покриття текстильних матеріалів [23].

Залежно від технологічного процесу виробництва та виду матеріалів, у текстильному виробництві можуть утворюватися різні види відходів, такі як відходи тканин, трикотажу, нетканих матеріалів та їх комбінацій.

При виробництві тканин утворюються обрізки та непридатні для використання шматки тканин. Хімічний склад відходів тканин буде залежати від використаних полімерних матеріалів, таких як поліестер, нейлон, акрил, бавовна та ін. (табл. 1.3). Додатково, можуть бути присутні речовини, використовувані під час обробки та фарбування тканин, наприклад, барвники, змашувальні речовини та фіксатори [24].

Таблиця 1.3

Властивості відходів найбільш часто застосованих тканин [10]

Назва тканини	Хімічна формула	Властивості
Поліестер	$(C_{10}H_8O_4)_n$	– висока міцність та стійкість до зношування; – водовідштовхувальність та швидке висихання; – збереження форми та стійкість до зморшок; – легке фарбування та друк
Нейлон	$(C_{12}H_{22}N_2O_2)_n$	– висока міцність та еластичність; – стійкість до зношування та розриву; – швидке висихання та вологостійкість; – можливість фарбування та друку
Акрил	$(C_{10}H_8O_4)_n$	– легкість та м'якість матеріалу; – значна теплоізоляція та теплостійкість; – вологостійкість та швидке висихання; – кольоростійкість та фарбування
Бавовна	$(C_6H_{10}O_5)_n$	– комфорт при носінні; – природна м'якість та гіпоалергенність; – здатність до фарбування та друку

При виробництві трикотажу формуються обрізки та забруднення, такі як нитки, волокна та інші матеріали, які відокремлюються під час процесу виробництва. Трикотаж може включати полімерні матеріали, такі як еластан, віскоза, поліестер (табл. 1.4) та ін., і їх хімічний склад буде відрізнятися від складу тканин [10].

Таблиця 1.4

Властивості відходів трикотажу

Назва тканини	Хімічна формула	Властивості
Еластан	$C_{16}H_{24}O_4$	Висока еластичність і поверхнева стійкість
Віскоза	$C_6H_{10}O_5$	Висока вологопроникність, м'якість, менш еластична
Поліестер	$C_{10}H_8O_4$	Висока міцність, стійкість до зношування, легкість у догляді

При виробництві нетканих матеріалів утворюються обрізки, забруднення та непридатні вироби. Неткані матеріали можуть бути виготовлені з полімерних сполук, таких як поліпропілен, поліестер, поліетилен та інші. Відходи нетканих матеріалів, що утворюються під час їх виробництва, містять полімерні сполуки, які використовуються для створення нетканої структури. Типові полімери, які можуть бути використані, включають поліпропілен, поліестер, поліетилен, поліаміди та ін. (табл. 1.5) [10].

Таблиця 1.5

Властивості відходів нетканих матеріалів		
Назва	Хімічна формула	Властивості
Поліпропілен	$(C_3H_6)_n$	– висока міцність та стійкість до зношування; – відмінна стійкість до впливу хімічних речовин; – значна в'язкість, що дозволяє легко формувати текстильні вироби; – водовідштовхувальність
Поліетилен	$(C_2H_4)_n$	– висока міцність та еластичність; – значна стійкість до зношування та розриву; – водонепроникність та низьке водопоглинання; – хімічна стійкість до багатьох розчинників та речовин
Поліаміди	$(C_6H_{11}NO)_n$	– висока міцність та стійкість до зношування; – висока еластичність та в'язкість; – відмінна стійкість до забруднень

Хімічний склад відходів нетканих матеріалів може варіюватися залежно від специфікацій виробника та використовуваних полімерних матеріалів. Додатково до полімерних сполук, відходи можуть містити домішки, такі як забруднення, розчинники, пластифікатори, антиоксиданти, стабілізатори та інші хімічні речовини, які були використані під час процесу виробництва. Хімічний склад відходів нетканих матеріалів є важливим фактором для подальшого управління цими відходами, зокрема для визначення можливостей їх переробки, вторинного використання або відновлення [25].

Отже, виробничі відходи, утворені на різних стадіях виробництва текстилю та одягу, перераховані в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

Відходи виробництва текстильного і швейного виробництва	
Відходи текстильної промисловості	Відходи швейної промисловості
Бавовняний ворс, пошкоджена пряжа, сірі тканини, браковані та готові тканини, відходи різання	Надмірне виробництво, бракований одяг, скасовані відвантаження товарів

Проблема виробничих відходів у текстильному виробництві є актуальною та потребує уваги, оскільки вона має багатогранний характер та впливає на навколишнє середовище та стан екології. Відходи текстильного виробництва можна аналізувати з різних аспектів. По-перше, відходи можуть варіюватися за структурою та хімічним складом, залежно від технологічного процесу утворення. Це включає відходи, що утворюються на підприємствах, що виробляють волокна та пряжу, відходи, що утворюються при виробництві текстильних матеріалів, а також відходи, які утворюються в результаті використання текстильних матеріалів у швейному виробництві. По-друге, залежно від технологічного процесу виробництва і виду матеріалів, можна розрізнити відходи тканин, трикотажу, нетканих матеріалів та їх комбінацій. Кожен з цих видів відходів має свої особливості та характерні складові.

Розв'язання проблеми виробничих відходів вимагає комплексного підходу. Важливо розробити ефективні стратегії збирання та управління відходами, впроваджувати передові технології переробки та використання вторинних матеріалів. Застосування кругової економіки та принципів сталого розвитку можуть сприяти зменшенню обсягів відходів та покращенню екологічної стійкості виробництва.

1.3. Відходи взуттєвого виробництва

Сучасні тенденції розвитку індустрії моди дуже динамічні та мінливі. Щоб задовольнити потреби клієнтів і залишитися конкурентоспроможними на світовому ринку, виробники повинні швидко адаптуватися до змін і залишитися актуальними, враховуючи нові споживчі вподобання. Взуттєва промисловість є однією з найбільших галузей, яка виробляє товари споживчого призначення. Для виготовлення використовують різні матеріали, такі як шкіра, синтетичні матеріали, текстиль та гума. Масове виробництво взуття привело до збільшення обсягу відходів, споживачі частіше купують нові пари взуття. Це в результаті приводить до скорочення життєвого циклу використання і зменшення терміну його експлуатації [26].

Взуттєва промисловість вважається однією з галузей, яка спричиняє значне забруднення довкілля через велику кількість відходів, що виникають як у твердому вигляді під час виробництва взуття, так і у вигляді мулу, який утворюється під час очищення стічних вод шкіряних заводів. Крім того, з цих заводів викидаються гази та неприємні запахи, які негативно впливають на атмосферу. Стикається з великим обсягом відходів, що формуються, головним чином, у виробництві взуття та шкіряній промисловості. Загальна кількість цих відходів залежить від конкретних виробничих процесів та методів управління відходами в цьому секторі. Найбільший обсяг відходів, а саме близько 60–65 %, становить шкіра, яка використовується у виробництві взуття. Шкіряна промисловість утворює величезну кількість твердих відходів, ніж основний продукт шкіри під час обробки шкур тварин для виготовлення шкіри. Крім того, відходи шкіряного виробництва, такі як обрізки шкіри, шкіряні залишки та інші матеріали, можуть чинити негативний вплив на довкілля, якщо їх не використовувати або не переробляти належним чином [27]. Ці відходи можуть бути складними для утилізації, і їх неконтрольоване збереження може спричинити забруднення ґрунту та водних джерел. Крім того, деякі процеси обробки шкіри можуть використовувати хімічні речовини, які, якщо неправильно утилізувати, можуть знищуватися в природі та завдавати шкоди екосистемам.

Забруднення, спричинене нинішньою неефективною утилізацією (через спалювання та захоронення) цих твердих відходів, перешкоджає шляху промисловості до сталого розвитку. Отже, вкрай важливо, щоб альтернативні технологічні втручання, які використовують цінність цих відходів, слідували відповідно до принципів циркулярної економіки.

Сучасною реальністю є те, що в усьому світі щорічно виробляється понад 21 млрд пар взуття. Значний відсоток цих відходів йде від вживаного взуття, яке після завершення експлуатації, в основному, відпускається на смітники. У цьому контексті обговорюється ієрархія управління відходами, а також розглядаються можливості їх зменшення, вторинного використання та переробки у виробництві взуття та шкіряної галузі.

За останні 20 років взуттєва галузь доклала значних зусиль для підвищення ефективності виробництва, а також для усунення використання небезпечних матеріалів на етапі виробництва. Однак екологічні досягнення, досягнуті у виробництві, перекреслили негативний вплив значним зростанням попиту на взуттєві вироби. Багато брендів працюють над вдосконаленням виробництва, використовуючи відновлювальні матеріали, знижуючи викиди CO₂ та вплив на водні ресурси. Також деякі компанії активно здійснюють переробку і вторинне використання для зменшення відходів.

Відходи, що утворюються під час взуттєвого виробництва, можуть бути різних видів та форм, залежно від специфіки виробництва і матеріалів, що використовуються. Їх класифікують в основному за видами матеріалів, що використовуються для деталей взуття, і за напрямками їх подальшого використання [28]. Пропонуємо класифікувати відходи взуттєвого виробництва за такими основними критеріями, як вид матеріалу, етапи виробництва тощо. На рис. 1.4 наведена класифікація відходів взуттєвого виробництва.

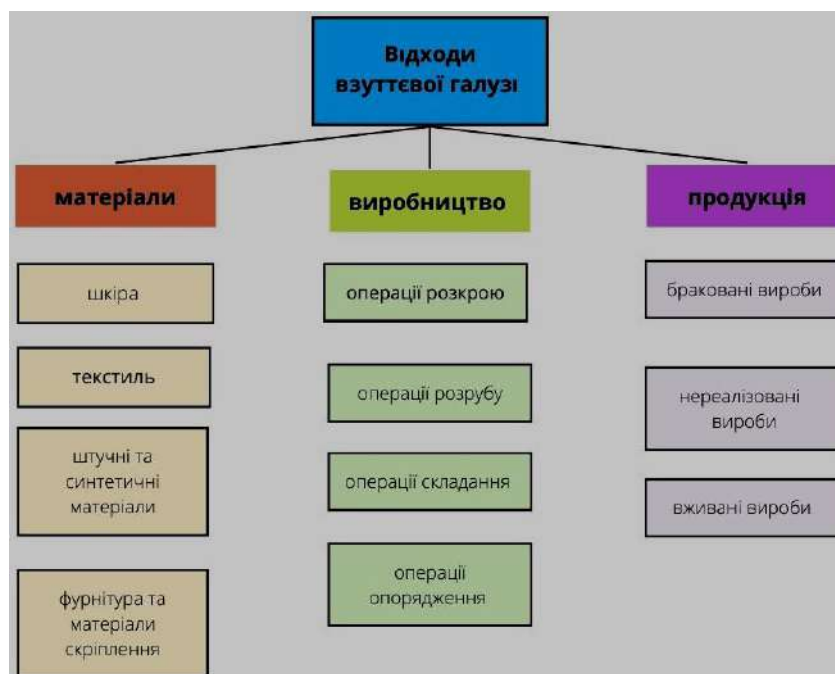


Рис. 1.4. Класифікація відходів взуттєвого виробництва

Як основу класифікації відходів, залежно від виду матеріалів, будемо використовувати призначення матеріалів. За призначенням взуттєві матеріали поділяють на основні та допоміжні [29]. Основні – використовують для виготовлення окремих деталей або всього виробу; допоміжні (клеї, фарби, нитки, цвяхи) – для скріплення деталей та опорядження виробу. Основні матеріали поділяють за походженням вихідної сировини на натуральні шкіри, текстильні, штучні та синтетичні.

В процесі виробництва взуття з шкіри утворюються відходи, такі як шкіряні залишки, обрізки, що є результатом розкрою та обробки шкіри для розробки різноманітних взуттєвих та шкіргалантерейних виробів (портмоне, гаманці, футляри, деталі сумок). Найбільше відходів шкіри виникає під час процесу розкрою натуральних матеріалів, оскільки форма натуральної шкіри має досить нестандартну конфігурацію, а також анізотропні властивості по всій шкірі, котрі впливають на розкладку деталей при розкрою. Це все впливає на виникнення значних між шаблонних і міжкрайових відходів, і тому їх спостерігається близько 20–25 %. Залежно від цього, ці відходи можуть бути поділені на дві основні групи: однорідні та змішані.

Однорідні відходи – це однотипні відходи, які утворюються під час обробки шкір та шкіряних матеріалів. Сюди можна віднести обрізки (відходи під час розкрою та обробки шкір) і стружку (відходи під час обробки і шліфування шкір до гладкого стану).

Змішані відходи – ця група включає відходи, котрі виникають в процесі опорядження шкір – отримання естетичного зовнішнього вигляду та необхідних фізико-механічних властивостей. Ці відходи можуть представляти серйозну загрозу для навколишнього середовища, оскільки вони часто містять хімічні речовини, які можуть викидатися у навколишнє середовище під час обробки та утилізації. Також неправильна обробка цих відходів може призвести до забруднення повітря, води та ґрунту.

Шкіряні залишки включають частини шкіри, які не можуть бути використані для виробництва взуття через топографію, форму, розмір або пошкодження. Наприклад, такі дефекти натуральних шкір, як пухлинність, роговини, кнутовини, подряпини, лизуха, жила-

вість, воротистість, воспини, болячки, безличини, а також молочні лінії, роблять матеріал не придатним для подальшого використання в тому вигляді, в якому він є [30–32].

Щорічно в індустрії моди утворюється 92 мільйони тонн текстильних відходів. З 2000 року кількість взуттєвих виробів, котрі мають деталі з текстильних матеріалів, подвоїлася. Відходи текстильних матеріалів у взуттєвому виробництві утворюються на різних етапах виробництва, включаючи обрізки під час розкрою тканин, відходи під час шиття, браковані та пошкоджені вироби.

Штучні матеріали для верху взуття є популярним вибором у взуттєвій промисловості. Ці матеріали виробляються шляхом комбінування різних синтетичних волокон або полімерів, що дозволяє отримати різноманітні текстури, кольори та властивості. Вони мають свої переваги, такі як стійкість до зносу, водостійкість та можливість дизайнерської обробки [33, 34]. Більшість штучних шкір складається з основи, просочуючої композиції та покриття. Основа і покриття можуть бути одно- або багатошаровими. Властивості штучних шкір визначаються типом основи, видом і товщиною полімерного покриття та способом його нанесення [35]. Більшість штучних шкір мають основу з тканин.

Основні види відходів при використанні штучних та синтетичних шкір:

– **обрізки**: у процесі різання та обробки штучних та синтетичних шкір утворюються обрізки та відходи, які можуть бути непридатні для подальшого використання або мають неправильну форму;

– **відпади**: під час складання виробів можуть утворюватися відпади, такі як обрізки матеріалу, опадання краю;

– **пошкодження покриття**: розтріскування, відшарування, липкість покривної плівки матеріалу, нестійке покриття.

Для деталей низу взуття залежно від призначення та сезону носіння використовують різні матеріали. Вибір матеріалу залежить від конкретного дизайну та функціональних вимог взуття. Більшість виробників взуття мають власні специфікації та матеріали, які вони використовують для виробництва взуття. Зокрема, часто використовують гуму, оскільки це досить технологічний та економічний матеріал. Обробка матеріалу, виготовлення деталей характеризується більш високою продуктивністю праці, можливість повної механізації та часткової автоматизації процесів виробництва.

Гума – це вулканізований каучук з різними добавками, що надають виробу певної властивості. В суміш входять: вулканізуючі речовини, прискорювачі, активатори, регенерат, протистарителі, пороутворювачі, наповнювачі, пом'якшувачі, пігменти та фарби і тощо [36]. Виробництво гуми для взуття може привести до утворення відходів та мати значний вплив на навколишнє середовище. Відходи виробництва гуми можуть бути різного виду і походити з різних етапів виробництва. Найбільш поширені відходи:

– **від сировини**: під час обробки гумової підошви або інших гумових деталей взуття, обрізки можуть утворюють значні відходи. Вони можуть бути використані як вторинна сировина для виробництва інших гумових виробів або піддаватися переробці;

– **від каландрування**: включають різні матеріали та відходи, які виникають під час процесу каландрування. Каландрування – це механічний процес обробки матеріалу, коли певний матеріал проходить через каландрувальні вали або вальці, щоб змінити його форму або товщину. Відходи від каландрування включають обрізки, пил і стружка;

– **від вулканізації**: вулканізація, яка забезпечує еластичність і міцність гуми, також може супроводжуватися відходами у вигляді вулканізаційних залишків;

– **від формування і вирубування**: під час формування готових виробів і їх вирубування з гуми також є відходи у вигляді обрізків та стружки;

– **неутилізовані вироби**: іноді вироби можуть бути відкинуті через дефекти у виготовленні.

Управління цими відходами є важливою частиною виробництва для забезпечення ефективності процесу та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Необхідні заходи з використання відходів як вторинної сировини або для їх переробки з урахуванням подальшого використання. Також важливо дотримуватися стандартів і норм, що стосуються обробки та утилізації гумових відходів відповідно до законодавства та вимог щодо захисту довкілля.

Досить актуальну частку відходів складає асортимент взуттєвих закріплювачів [37, 38]. Найбільш поширеним матеріалом для скріплення деталей верху взуття є нитки. Вони широко застосовуються для скріплення деталей верху і в деяких випадках – для кріплення деталей низу. Залежно від виду сировини їх поділяють на натуральні (бавовняні, лляні, шовкові) та синтетичні (капронові, лавсанові, анідні та акрілові). В процесі використання ниток найчастіше виникають відходи у вигляді ниткових обрізків та обрізки волокон. Ниткові обрізки виникають під час різання ниток на потрібну довжину для шиття. Ці обрізки мають різну довжину та можуть бути зібрані у великих кількостях під час масового виробництва. Під час обробки тканин та інших текстильних матеріалів виникають обрізки волокон, які є відходами виробництва.

При виготовленні взуття та галантерейних виробів використовується також різноманітна фурнітура, що забезпечує функціональність виробів, створює їх гармонійність та неповторність [39, 40]. Фурнітура включає різні елементи, такі як гудзики, блискавки (замки-блискавки), підкладки, кріплення, затискачі, застібки, металеві та пластикові прикраси та інші деталі. Відходи фурнітури можуть бути різних видів: **металеві елементи**: обрізки металевих деталей, які використовуються у застібках, металевих застібках-«блискавках», гудзиках, затискачах, декоративних елементах; **пластикові деталі**: відходи з пластикових елементів фурнітури, пластикові вставки, пластикові застібки-блискавки та інші деталі; **текстильні рештки**: обрізки тканин, декоративних стрічок або шнурів, які використовуються при кріпленні фурнітури. Взуттєва галузь має значний економічний вплив, оскільки вона становить важливий сегмент легкої промисловості. Однак, цей сектор стикається з серйозними екологічними проблемами, зумовленими забрудненням навколишнього середовища через відходи, що утворюються під час технологічних процесів виготовлення взуття. Технологічні процеси взуттєвого виробництва залежно від виду продукції, що випускається, складаються з таких етапів [41]: 1) розкрій (розруб) матеріалів; 2) обробка деталей верху та низу взуття; 3) складання деталей у заготовку; 4) формування заготовок; 5) прикріплення деталей низу; 6) механічне і фізико-хімічне опорядження взуття.

Значна кількість відходів утворюється саме в процесі розкрою матеріалів на деталі у вигляді міжмодельних і крайових відходів. В середньому біля 25 % шкіряного напівфабрикату переходить у відходи. До них відносять такі: відходи від розкрою шкір для верху взуття, штучного та натурального хутра, штучних шкір, пінополіуретану, синтепону, повсті, текстилю; дрібна гумова вирубка; відходи всіх видів картону; стружка, дрібні клапти, обрізки шкір для низу взуття.

Відходи від розкрою чи розрубів шкір, у свою чергу, розрізняють за видами шкір (відходи натуральних, від штучних та синтетичних шкір тощо). Цей етап забезпечує розміщення шаблонів на матеріалі та розкрій або розруб деталей. Після крою можуть залишитися невикористані частини матеріалу, такі як обрізки та інші непотрібні фрагменти. Відходи розкрою матеріалів можуть бути різного розміру та форми, і їхній обсяг залежить від розмірів та складності деталей [42].

Відходи шкіргалантерейного виробництва утворюються в технологічних процесах виробництва рукавиць, ременів, саквояжів, чемоданів, сумок тощо. Це можуть бути відходи від розкрою матеріалів (обрізки шкіри, підкладкових та прокладкових матеріалів), відходи зіпсованої фурнітури, відходи кінцевої продукції виробництва (вибраковка) [43].

Генерація великої кількості відбракованих та нереалізованих виробів є особливою проблемою утворення відходів. Споживачі також можуть сприяти цій ініціативі, обираючи бренди, які прагнуть до стабільності та мають високі екологічні стандарти. Важливо пам'ятати про власну відповідальність як споживача і обирати товари, які відповідають принципам сталого розвитку. Збалансований підхід до виробництва та споживання взуття може допомогти зберегти природу та створити більшу сталу моду.

1.4. Основні полімерні матеріали, що використовуються при виробництві товарів легкої промисловості

Вироби легкої промисловості є товарами широкого вжитку. Залежно від призначення до виробів легкої промисловості пред'являють різні вимоги. Наприклад, для жіночої сумки основною вимогою є естетична відповідність смакам споживача, його зовнішньому вигляду, соціальному статусу. До господарських сумок основні вимоги – простота форми, надійність кріплення ручок, гладкість матеріалу тощо. Спортивні сумки мають, у першу чергу, відповідати вимогам ергономіки, забезпечувати зручність у користуванні, зовнішній вигляд виробу має відповідати спортивному стилю [44].

Споживчі властивості виробу проявляються в процесі його споживання і впливають на вибір конкретної моделі споживачем. Наприклад, споживчі властивості валіз визначаються конструкцією і матеріалами (властивостями і технологією їх переробки). Споживчі властивості всіх виробів легкої промисловості включають у себе такі властивості, як ергономічність, естетичність та витривалість. Велика частина виробів використовує полімерні матеріали як основний матеріал, та як фурнітуру, швейні нитки і різноманітні оздоблювальні елементи.

Полімерний матеріал, що найбільш широко використовується для виготовлення різноманітних видів товарів легкої промисловості (одягу, взуття, сумок, валіз, рукавичок тощо) – це штучні шкіри різноманітних кольорів і фактур поверхонь, а також синтетичні матеріали. Штучні шкіри у виробництві виробів легкої промисловості мають певні переваги порівняно з натуральними: дозволяють забезпечити більш низьку масу виробу; здешевити процес виробництва; урізноманітнити зовнішній вигляд виробів за рахунок фактур, що імітують натуральну шкіру, забезпечити підвищені функціональні характеристики.

Такі фізико-механічні властивості штучних шкір, як міцність, подовження, багато в чому залежать від матеріалу основи. Волокнистою основою для штучних шкір служать тканини, трикотаж, папір, а також різні неткані матеріали, що застосовуються залежно від призначення виробу. Як текстильні матеріали для основи штучних шкір застосовують поліамід, поліефіри, поліакрилонітрил, скло та ін.

Покриття штучної шкіри формується шляхом просочення волокнистої основи (наскрізне покриття) або шляхом нанесення полімеру на поверхню основи (поверхнєве покриття). Може використовуватися і поєднання цих методів. Основним компонентом штучної шкіри є плівкоутворююча полімерна композиція. У сучасному виробництві як плівкоутворювач застосовують в основному синтетичні високомолекулярні сполуки: полівінілхлорид, поліуретани, синтетичні латекси, гумові суміші на основі різних каучуків тощо [45].

Штучні шкіри з пористим полівінілхлоридним (ПВХ) покриттям являють собою трикотажну, ткану або неткану основу з нанесеним на неї шаром пористого полівінілхлориду товщиною 0,5–0,7 мм або непористого – товщиною 0,10–0,15 мм. Непористе полівінілхлоридне покриття має підвищену липкість і неприємний блиск, що пов'язано з виходом на поверхню плівки найтоншого шару пластифікатора. Для усунення цього недоліку штучну шкіру покривають тонким шаром оздоблювального лаку на основі сумішей полівінілхлоридної і акрилових смол, розчинених в органічних розчинниках, що

робить полімерне покриття нелипким, а на дотик – подібним до натуральної шкіри. На сьогодні у виробництві штучних шкір актуальним плівкоутворювачем є поліуретан.

Для виробництва м'яких валіз на колесах зазвичай як основний матеріал використовують поліестер або нейлон, а також пінополіуретан (надійний і пружний матеріал) – при виготовленні корпусів валіз в термоформах для отримання цільно-формованих задньої і бічних стінок. У виробництві валіз жорстких конструкцій широке застосування має ряд інших полімерних матеріалів, які дозволяють забезпечити захист від деформацій та легкість. Жорсткі пластикові валізи роблять з полікарбонату, поліпропілену і АБС-пластику.

Функціональність виробів легкої промисловості та їх придатність багато в чому визначаються якістю застосовуваної фурнітури [46]. Для виготовлення фурнітури використовують фенопласти, поліетилен, поліаміди, амінопласти, поліефіри, полістирол, поліпропілен та інші пластмаси. Сьогодні матеріали, використовувані для взуття, – це натуральні шкіри та полімерні матеріали: натуральна, штучна і синтетична шкіри – для деталей верху взуття; гуми, поліуретани (ПУ), полівінілхлориди (ПВХ), термоеластоласти (ТЕП), етиленвінілацетат (ЕВА) – для формованих деталей низу взуття; картон, термопластичні матеріали – для каркасних деталей [47]. Найбільш поширеним методом виготовлення підошов з полімерних матеріалів є лиття під тиском. Для виготовлення поліуретанових підошов використовують метод рідкого формування, гумових – метод вулканізації.

Взуттєва гума являє собою складне поєднання полімерної основи (каучуку, в основному, синтетичного: бутадієнстирольного СКС-10, СКС-30, СКС-50, СКС-85, бутадієнового СКБ, дівінілового СКД та ізопренового СКІ-3) і різних домішок.

Ливарні ПВХ-пластикати є композиціями полівінілхлоридної смоли ПВХ С-63-М, ПВХ С-64-М, ПВХ С-65, ПВХ С-70-М з пластифікаторами, стабілізаторами та пігментами. Підошви з ПВХ виробляють методом лиття під тиском. За структурою матеріалу вони можуть бути монолітними і пористо-монолітними (мікропористими) і застосовуються головним чином для прогулянкового взуття та взуття спортивного стилю.

Особливе місце серед підошовних матеріалів займають термоеластоласти (ТЕП), які поєднують у собі еластичні властивості каучуку та пластичні властивості термопластів і мають широке застосування у взуттєвій промисловості. Таке поєднання властивостей визначається структурою полімерів. ТЕП є блок-сополімерами, що мають структуру: А–Б–А, де А – термопластичний блок (переважно кристалічна область полімеру), Б – еластичний блок (переважно аморфна область полімеру). Як блок А використовують полістирол, поліпропілен, поліметилметакрилат, полівінілхлорид тощо. Як блок Б – поліізопрен, полібутадієн, поліізобутилен. Також досить широке застосування при виробництві підошов для домашнього, пляжного та спортивного взуття [48] отримав полімерний матеріал етиленвінілацетат (ЕВА) [49], що є сополімером етилену і вінілацетату.

Для отримання зносостійких підошов, набойок, синтетичної шкіри для верху і підкладки взуття використовують поліуретани. Поліуретани – це ланцюги макромолекул поліуретанових смол, які зв'язані між собою уретановою групою. У наш час є широкий асортимент полімерних матеріалів для виготовлення виробів легкої промисловості. Призначення виробу визначає полімерний матеріал, з якого він зроблений.

У взуттєвому виробництві найбільш перспективним матеріалом є поліуретан - з огляду на високі показники його фізико-механічних властивостей, що забезпечують відповідність як експлуатаційним, так і технологічним вимогам, що пред'являються до виробів легкої промисловості, а саме до підошов. Незважаючи на безперечні переваги, на вітчизняному ринку широко використовують ТЕП, показники властивостей яких незначно поступаються ПУ, а деякі показники навіть і перевершують. Таким чином, використання полімерних матеріалів дозволяє забезпечити необхідний комплекс експлуатаційних і технологічних властивостей сучасних виробів легкої промисловості [50].

Розділ 2.

Технології та обладнання для переробки полімерних відходів

Розвиток нових технологій і обладнання для переробки полімерних відходів продовжується, з метою досягнення більш ефективного та сталого управління відходами та розвитку циркулярної економіки. Розробка технологій переробки полімермістких відходів дозволяє збільшити використання переробленого полімерного матеріалу та знизити обсяги відходів [51].

Найбільш часто затребуваними технологіями, які використовуються для переробки полімерних відходів є [52]:

– **механічна переробка.** Включає різні процеси, зокрема, розмелювання, дроблення та мелення полімерних відходів для отримання меленого матеріалу або гранул. Цей процес дозволяє знижувати обсяг відходів і переробляти їх у вторинний сировинний матеріал;

– **полімерна переробка.** До цієї переробки відноситься: екструзія, лиття під тиском, формування і пресування, що перетворюють мелений матеріал у нові форми, вироби і компоненти;

– **хімічна переробка.** Використовує хімічні процеси, такі як газифікація, піроліз і ліквідація, щоб перетворювати полімерні відходи на гази, олії або інші хімічні речовини, які можуть використовуватися як паливо або хімічні сировини;

– **рециклінг.** Основний процес переробки полімерних відходів, який передбачає збір, сортування та обробку відходів для виготовлення нових продуктів або матеріалів. Поділяється на механічний рециклінг (переробка у мелений матеріал) або хімічний рециклінг (переробка в мономери для отримання нових полімерів);

– **пластифікація.** Процес, який додає пластифікатори до полімерних відходів, щоб покращити їхні властивості та знизити твердість матеріалу. Це дозволяє збільшити обсяг переробленого матеріалу і розширити його можливості застосування;

– **вторинна обробка.** Включає різні техніки, такі як термоформування, пресування та лиття, для виготовлення вторинних продуктів і компонентів з переробленого полімерного матеріалу.

З огляду на зазначене, розглянемо більш детально механічну та хімічну переробку полімерів, оскільки саме поєднання цих видів переробки включає широкий спектр процесів, які допомагають перетворити сировину полімерів у вироби з бажаними формами та розмірами.

2.1. Класифікація технологій переробки полімермістких відходів

В результаті аналізу факторів, які впливають на якість виробів легкої промисловості, котрі отримують з використанням перероблених полімерних відходів, встановлено, що на експлуатаційні характеристики цих виробів суттєво впливають фізико-механічні властивості перероблених полімерних відходів, які залежать від конструктивних

параметрів перероблювального обладнання та режимів його роботи. Вивченню процесів переробки відходів легкої промисловості присвячена обмежена кількість досліджень, які в основному виконано вітчизняними науковцями. Так, вчені Кутьїн В.А., Михайлов А.Н., Піскорський Г.А., Гуменюк О.Б., Мікульонок І.О., Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б. вирішували проблему розробки процесів та проєктування пристроїв для переробки шкіряних та текстильних відходів [53–55].

Основні закономірності процесів переробки шкіри та полімерного матеріалу суттєво відрізняються, тому що реакція полімеру та шкіри на механічне і теплове поле, що створюється перероблювальним обладнанням, є зовсім різною. Однак деякі підходи щодо проєктування обладнання є подібними і можуть бути використані при розробці наукових основ проєктування обладнання для переробки полімерних відходів.

В роботах [3–5] вченими Зайнуллінім Х. Н., Арашкевичем Д. А., Белобородовою Т.Г. розглянуто механічну переробку відходів пластмас, результатом якої є отримання гранул, при виготовленні яких вводять різного роду домішки: модифікатори, стабілізатори, пігменти та барвники. Подібна переробка вимагає додаткових витрат.

Перспективні технологічні процеси переробки полімерних відходів передбачають в основному переробку полімерів у полі механічних напружень. Екструзійне подрібнення полімерних матеріалів, що базується на створенні в полімері складно-напруженого стану, досліджував Місяць В. П. [56]. Автором було описано процес подрібнення гумових відходів в екструдерах, також визначено параметри, при яких забезпечуються мінімальні енерговитрати. Однак, екструдерні перероблювальні пристрої мають низький коефіцієнт корисної дії, тому їх використання, навіть з раціональними конструктивними параметрами та ефективними режимами їхньої роботи, не дозволить суттєво заощадити енергію. Також вченим була отримана модель процесу подрібнення в роторних дробарках, яка дозволяє визначати їх продуктивність і енергетичні показники процесу залежно від конструктивних та технологічних параметрів цих пристроїв.

В роботі [57] Мікульонка І.О. запропоновано вирішення важливої на сьогодні науково-технічної проблеми розробки та вдосконалення процесів, а також обладнання комплексного перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. Було розроблено технологічні лінії для безперервної переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини та їх основного обладнання: роторних змішувачів, екструдерів та пристроїв для термообробки.

На відміну від розглянутих робіт запропоновано перероблювати вторинні полімерні матеріали з можливістю використовувати їх як армувальні елементи, тобто не розплавляючи їх, що дозволить зберегти в них експлуатаційні властивості первинної сировини.

Сформуємо основні напрями дослідження, які будуть спрямовані на розв'язання ключових проблем у сфері переробки полімермістких відходів легкої промисловості:

1. Розробка методу проєктування перероблювального обладнання для переробки полімерних відходів на частинки з орієнтованою структурою, які можна використовувати як армувальні елементи при виробництві виробів легкої промисловості, а саме: деталей низу взуття, валіз та різноманітної фурнітури.

2. Визначення раціональних конструктивних параметрів обладнання та ефективних технологічних режимів руйнування полімерних відходів для отримання частинок з орієнтованою структурою при мінімальних витратах енергії.

3. Розробка процесу модифікації та розкладання полімерних матеріалів з використанням хімічних реакцій, котрий спрямований на отримання полімерних матеріалів з певними властивостями, поліпшення експлуатаційних характеристик полімерів і використання їх у виробках легкої промисловості.

4. Розробка конструкції прес-форми та пристрою подачі частинок перероблених відходів для отримання деталей низу взуття із суміші розплаву полімеру і цих частинок.

З метою реалізації зазначених напрямів дослідження проведемо аналіз конструкцій пристроїв, які використовуються для переробки відходів на підприємствах легкої промисловості та в інших галузях виробництва.

2.2. Обладнання для механічної переробки полімерних відходів легкої промисловості

Сьогодні спеціального обладнання для переробки полімерних відходів є не так багато, і не завжди це обладнання відповідає сучасним вимогам. Зазвичай таке обладнання не серійне, а являє собою експериментальні пристрої, створені в конструкторських бюро великих взуттєвих, текстильних та швейних підприємств та в науково-дослідних інститутах. Обладнання, що використовується для механічної переробки полімерних матеріалів, найчастіше запозичене з інших галузей промисловості.

Технологічне обладнання, яке можна використати для переробки відходів, що утворюються в результаті виробничої діяльності на підприємствах легкої промисловості, поділяється за типом руйнуючого робочого органу на пристрої без руйнуючого тіла та пристрої із незакріпленим і закріпленим руйнуючим тілом. Це пов'язано з тим, що саме робочий орган є головним елементом конструкції перероблювальних пристроїв, від якого залежить вид матеріалу, який можна перероблювати, енергоефективність, продуктивність процесу переробки та кінцевий результат – форма, розміри та фізико-механічні властивості переробленого матеріалу.

Обладнання із закріпленими робочими органами є найбільш ефективним для переробки полімерних відходів. Це пояснюється тим, що передача енергії йде безпосередньо на робочий орган, який в свою чергу, взаємодіючи з матеріалом, руйнує його. Ефективність роботи такого обладнання характеризується потужністю приводу, формою та розмірами робочих органів, тому при проектуванні обладнання із закріпленими робочими органами слід враховувати фізико-механічні властивості полімерного матеріалу, геометрію робочих органів та динаміку їх взаємодії з матеріалом. До такого обладнання можна віднести: дробарки, роли, конічні і дискові млини, шнекові та валкові пристрої.

2.2.1. Роторний ножовий подрібнювач

Переваги різання розширили область застосування ріжучих пристроїв. Залежно від умов навантаження розділяють різання з контрножем (зосереджене) та без контрножа (незосереджене).

Незосереджене різання застосовують для розділу на частини великогабаритних матеріалів. Пристрій може бути виконаний у вигляді обертового багатолезового ножа [58, 59] або ніж закріплений нерухомо, а обертається матеріал, що подрібнюється.

Зосереджене різання застосовується в роторних ножових подрібнювачах (рис. 2.1) [60, 61], в яких ножі розташовані як в роторі, так в статорі.

Такий пристрій складається з ротору 1, ножа ротора – 2, корпусу – 3, решітки – 4, ножів статора – 5. Процес подрібнення матеріалу починається з його завантаження в бункер, звідки він потрапляє на ротор 1 і на його ножі 2. Матеріал подрібнюється при взаємодії з ножами ротора 2 і нерухомо закріпленими ножами 5 статора. Після цього матеріал просіюється через решітку 4 і потрапляє до бункеру готового продукту (не показано).

Ножовий роторний подрібнювач використовується для подрібнення еластичних матеріалів, пластично-в'язких матеріалів [62], полівінілхлоридних матеріалів, волокнис-

тих матеріалів, заморожених матеріалів [63]. Даний тип подрібнювача може знайти своє застосування в хімічній промисловості, целюлозно-паперовій, харчовій, будівній і легкій промисловості.

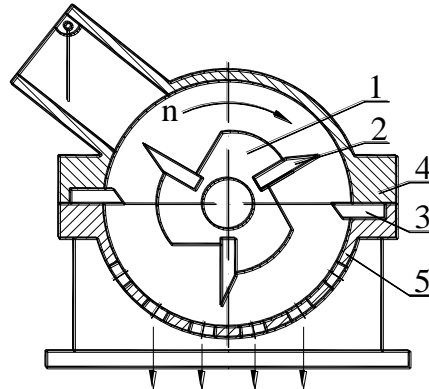


Рис. 2.1. Роторний ножовий подрібнювач:
1 – ротор; 2 – ніж ротора; 3 – корпус; 4 – решітка; 5 – ножі статора

Після переробки волокнистих матеріалів отримані відходи можна використовувати для створення нових видів короткочасного та одноразового користування, різноманітних гідро-, звуко- і теплоізоляційних матеріалів, геотекстильних матеріалів для житлового і дорожнього будівництва, прокладок, технічної вати тощо.

Як вже було зазначено, одним з найбільш розповсюджених методів подрібнення є різання. При механічному подрібненні відходів більша частина енергії витрачається на пружне деформування [63]. Таким чином, з точки зору економії енергії, подрібнення слід проводити в умовах, при яких відбуватиметься мінімальне деформування матеріалу. Так, при руйнуванні відходів легкої промисловості різанням частина матеріалу, що знаходиться в складно-напруженому стані, порівняно невелика та зосереджена поблизу ріжучої кромки ножа [64]. Внаслідок цього робота руйнування при різанні значно менша.

Процес подрібнення в подрібнювачах даного типу в більшості випадків досить простий. Це пов'язано з тим, що в процесі роботи обладнання не потребує додаткового налагодження і регулювання. Ці операції відбуваються тільки при зміні типу подрібнюваного матеріалу. В деяких варіантах подрібнювачів наявні валки для попереднього стискування матеріалу з метою поліпшення якості подрібнення. Сітка, яка встановлена в нижній частині бункера, контролює проходження частинок заданої дисперсності. Неподрібнені частинки знову захоплюються ножами і подрібнюються додатково. Необхідності розділення різних матеріалів на групи немає.

Ступінь дисперсності, якої можливо досягнути при цьому способі подрібнення, – від 0,5 мм до 10 мм.

Обладнання є досить простим в обслуговуванні. При роботі обладнання відбувається знос ножів і контрножів, їх заміна не становить проблем.

Доцільно при проектуванні конструкцій зазначених подрібнювачів встановлювати ножі під кутом до осі обертання ротора, що приводить до покращення процесу різання (кінематичний кут). Кут нахилу ножів веде до виникнення в процесі роботи кінематичного кута різання, що, в свою чергу, дозволяє зменшити силу різання.

Кожна конструкція, або виріб, або пристрій мають свої переваги та недоліки. Розглянемо переваги ножових роторних подрібнювачів.

Процес подрібнення в таких пристроях, перш за все, заснований на зосередженому руйнуванні матеріалу. При такому подрібненні енерговитрати мінімальні, оскільки зона

деформацій мінімальна і, відповідно, втрати енергії на деформацію непотрібних нам шарів матеріалу відсутні.

Такі подрібнювачі мають прості та надійні конструкції. Вони також легкі в обслуговуванні, що є досить вагомим фактором при купівлі обладнання. В них передбачена можливість регулювання дисперсності подрібненого матеріалу шляхом заміни просіювальної сітки з різними діаметрами отворів, а також можливість збільшення швидкості обертання ротора.

Крім переваг цей вид обладнання має свої недоліки, зокрема:

– в процесі роботи відбувається зношування робочих органів під дією сил тертя і удару. Недовговічність роботи ножів пов'язана також з тим, що кожен ніж має одну ріжучу кромку і вимагає індивідуальної установки в корпусі;

– конструкція такого типу подрібнювачів не дозволяє активно впливати на ступінь подрібнення матеріалу;

– при подрібненні пластично-в'язких матеріалів, у результаті дії підвищених температур, в робочій зоні відбувається процес налипання матеріалу на робочі органи, а також утворення грудок, що різко знижує ефективність процесу подрібнення;

– роторний ножовий подрібнювач (роторна дробарка) не дозволяє перероблювати полімерні відходи на частинки з орієнтованою структурою, тому їх не можна буде використовувати як наповнювач при виробництві полімерних виробів легкої промисловості.

Отже, таке обладнання як подрібнювачі є широко поширеним в практиці використання. Вони є економічно вигідними завдяки невеликим витратам енергії, пов'язаним з процесом подрібнення матеріалів. Згадані подрібнювачі успішно використовуються у галузях легкої промисловості. Результати застосування демонструють досить високу ефективність цього типу обладнання при переробці відходів легкої промисловості.

2.2.2. Дисккові валкові пристрої для переробки відходів

Для попереднього подрібнення широко застосування отримали валкові машини з набором дисків, які мають ріжучі кромки різних конфігурацій (рис. 2.2) [65, 66].

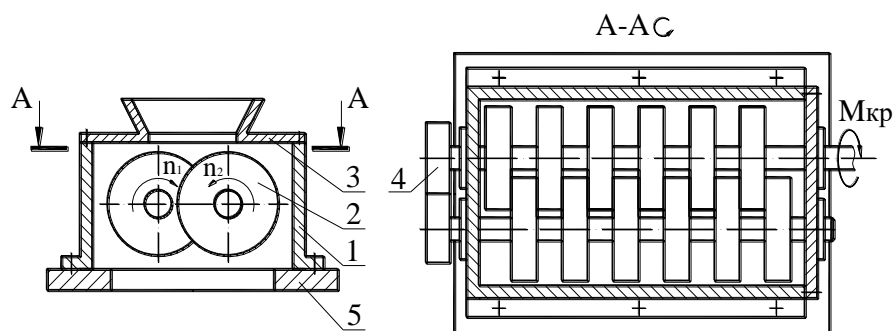


Рис. 2.2. Дисківий подрібнювач:
1 – стійки; 2 – диски; 3 – кришка з бункером для завантаження;
4 – зубчаста передача; 5 – станина

Також додатково на поверхні дисків можуть бути встановлені ріжучі елементи, які дозволяють підвищити ефективність подрібнення матеріалу, що дозволяють отримувати більш рівномірну дисперсність матеріалу, виключаючи процес повторного подрібнення.

Оскільки глибина западин дискового ножа 2 дорівнює половині його загальної висоти, шматки матеріалу отримуються однакового розміру [67].

Конструкція дискового подрібнювача включає в себе стійки 1, диски 2, кришку з бункером для завантаження 3, зубчасту передачу 4 і станину 5. Диски встановлені на валах, які, в свою чергу, закріплені в підшипникових опорах. Кут заточки ріжучих кромek ріжучих елементів одних дисків протилежний куту заточки ріжучих кромek ріжучих елементів інших дисків.

Подрібнення матеріалу здійснюється ріжучими елементами, які захоплюють матеріал і руйнують його зустрічними рухами. Матеріал потрапляє в зону подрібнення через завантажувальний бункер після приведення пристрою в робочий режим, тобто валки повинні обертатися.

Ножовий дисковий подрібнювач використовується для подрібнення полімерів, деревини тощо. Дисперсність, яку можна досягнути при цьому виді подрібнення, становить від 2 мм до 30 мм. Вона залежить від розмірів і конфігурації ріжучих елементів.

Дискові ножові подрібнювачі, як і більшість обладнання такого типу, є досить простими в обслуговуванні. Єдина складність полягає в тому, що перед початком роботи необхідно провести установку ріжучих елементів на дисках таким чином, щоб утворююча ріжучих елементів відповідала подрібнюваному матеріалу. Це робиться з метою отримання кращої якості подрібнення і збільшення продуктивності.

Переваги цієї групи подрібнювачів полягають в наступному:

- обладнання досить просте у використанні та обслуговуванні;
- використання обладнання дозволяє переробляти широкий діапазон промислових відходів;
- можливість реалізації процесу зосередженого різання, який є найбільш економічним з точки зору енерговитрат;
- використання додатково розміщених на поверхні дисків ріжучих елементів дозволяє отримувати вихідний матеріал рівномірної дисперсності.

Поряд з перевагами, дискові подрібнювачі мають такі недоліки:

- в процесі використання обладнання має місце великий ступінь зношування ріжучих органів, через що знижується якість, продуктивність і зростають витрати енергії;
- при переробці пластично-в'язких матеріалів в результаті підвищення температури полімер починає текти і налипати на робочий орган, що суттєво знижує ефективність процесу переробки;
- обладнання цієї групи не дає можливості керовано руйнувати полімерні відходи, що унеможлиблює отримання орієнтованої структури в переробленому матеріалі.

Широке застосування отримали валкові машини з набором дисків, які мають ріжучі кромки різноманітних конструкцій [67–69].

Дискові валкові пристрої знайшли широке застосування для подрібнення різноманітних матеріалів, зокрема полімерних матеріалів, гумо-тканевих відходів, поліетиленових плівок і текстильних відходів. Вони використовуються в хімічній, гумотехнічній, шинній та текстильній промисловості. Ці пристрої дозволяють ефективно подрібнювати матеріали на дрібні частинки, що забезпечує подальшу переробку та використання вторинних матеріалів у виробництві нових продуктів. Дискові валкові пристрої є ефективним та економічно вигідним рішенням для переробки різноманітних відходів у промисловості. Подрібнені відходи використовуються як наповнювачі у різних полімерних композиціях, для одержання гумових виробів, у виробництві термопластів. Відходи текстильної промисловості використовують для створення нових видів виробів, наприклад, технічної вати, різних прокладок.

Дискові валкові пристрої для переробки відходів за способом їх переробки можна розділити на дві групи: дискові ріжучі та дискові розривні пристрої. Зазначимо, що останні пристрої, з огляду на будову полімеру для переробки полімерних відходів, вико-

ристовувати недоцільно, оскільки подрібнені шматки будуть різного розміру і форми, що не є прийнятним, а витрати енергії – значними.

Дискові ріжучі пристрої для переробки відходів також часто застосовують в різних галузях промисловості для подрібнення полімерних матеріалів, гумо-тканевих відходів, поліетиленових плівок, паперу і побутових відходів. Особливо активно такі переробні пристрої з ріжучими дисками використовуються у хімічній і гумотехнічній промисловості. Подрібнені відходи знаходять своє застосування як домішки до сумішей для одержання гумових виробів, а також як наповнювачі у різних полімерних композиціях для виробництва термопластів.

Завдяки ефективності та універсальності дискові ріжучі пристрої допомагають оптимізувати процес переробки відходів і забезпечують створення вторинних матеріалів, що можуть бути використані у виробництві різноманітних продуктів. Такий підхід сприяє сталому розвитку та зменшенню негативного впливу на довкілля шляхом раціонального використання ресурсів та зменшення відходів.

Конструкцію такого обладнання представлено на рис. 2.3.

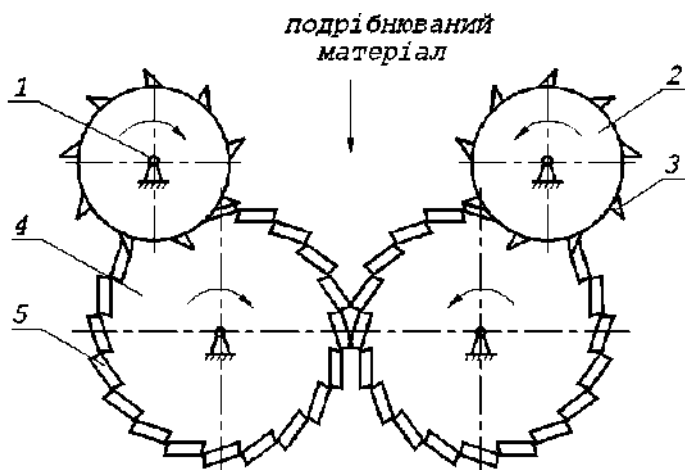


Рис. 2.3. Дискові ріжучі валки:

1 – вали; 2 – дискові ножі; 3 – ріжучі елементи; 4 – зубчасті диски; 5 – зубці

У процесі роботи диски відрізають невеликі шматки, поступово подрібнюючи таким чином весь матеріал (наприклад, автопокришку).

В пристроях, які складаються з набору різних ріжучих дисків, перед процесом подрібнення потрібно провести попереднє розділення різних матеріалів на групи (наприклад, відділити гуму від металу).

У пристрої для подрібнення резинових відходів великих габаритів, а також для різки відходів шинного виробництва використовують пристрій [69–70], який складається з багатоножової валкової машини для різки, виконаної трьома встановленими в корпусі ножовими приводними валками так, що валки 1 і 2 ріжуть матеріал на смужки, а валки 2 і 3 – ріжуть на шматки (див. рис. 2.4).

Ступінь дисперсності, який досягається при такому способі подрібнення, залежить від розміру дисків і відстані між ними.

Дискові ріжучі пристрої є складними за конструкцією, з низькою якістю подрібнення. Ще одним недоліком цього типу перероблювального обладнання є те, що на ньому можна отримати подрібнені матеріали лише крупної фракції. Тому такий тип обладнання можна використовувати для попереднього подрібнення відходів.

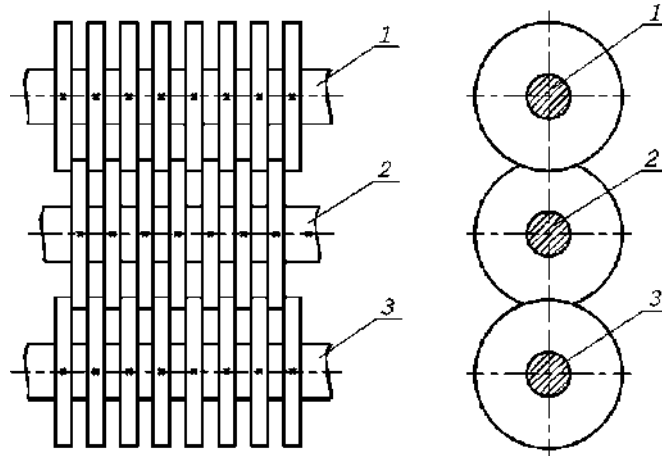


Рис. 2.4. Валки з дисками: 1–3 – ножові приводні валки

Через те, що дискові валкові пристрої для переробки відходів у процесі подрібнення полімерів зрізають невеликі шматки матеріалу, руйнуючи тим самим кристалічну область полімеру, що потребує значних витрат енергії, використання цих пристроїв для переробки полімерних відходів є неефективним.

2.2.3. Екструдерні пристрої для переробки відходів

При переробці відходів останнім часом широке застосування отримали екструдерні подрібнювачі [69–70]. Ці пристрої використовують здебільшого для подрібнення полімерних матеріалів, зокрема для подрібнення гуми у високопластичному стані, але їх також можна використовувати для подрібнення текстильних відходів.

Екструдерні пристрої за конструкцією установки та видом подрібнюваного матеріалу можна розділити на такі групи: екструдерні подрібнювачі перетирання, шнек з зубцями та шнек з ріжучими елементами.

Ступінь дисперсності, який досягається при екструдерному способі переробки, становить приблизно від 2 мм до 10 мм.

Незважаючи на те, що вже існують експериментальні розрахунки та аналогічні моделі для цих типів перероблювальних пристроїв, вони потребують подальшого удосконалення та досліджень.

Варто звернути увагу на технологічний процес переробки відходів у екструдерних установках. По-перше, перед переробкою відходів у цих пристроях спочатку потрібно провести попереднє відділення різних матеріалів один від одного, тобто полімерів від текстилю, гуми від металу. По-друге, відходи потрібно попередньо подрібнити.

Порівняно з валковими подрібнювачами, екструдерні пристрої є набагато складнішими як в обслуговуванні, так і в будові конструкції самих установок.

Основними недоліками екструдерних пристроїв є інтенсивне налипання подрібненого матеріалу на робочі органи пристроїв, що значно ускладнює процес подальшої роботи установок; неможливість переробки твердих полімерів; значні енергетичні витрати на процес переробки.

Екструдерні пристрої перетирання. Їх використовують для переробки та розділення за розміром матеріалів малої твердості, наприклад резини; для виробництва регенерату. Такі пристрої знайшли застосування у шинній і регенератній промисловості [70]. Подрібнений матеріал використовують як наповнювач у різних композитах для виготовлення виробів з гуми.

Екструдерний подрібнювач складається з корпусу 1, в якому розміщений шнек 2 з шнековою головкою 3 (рис. 2.5). Подрібнювані матеріали подаються через завантажувальний бункер 4 у пристрій. Робочий орган шнек 2 слугує для транспортування подрібнюваного матеріалу, а точніше – для переміщення відходів вздовж корпусу 1. Між корпусом 1 і шнековою головкою 3 за рахунок сил стиснення відбувається перетирання і руйнування частинок матеріалу.

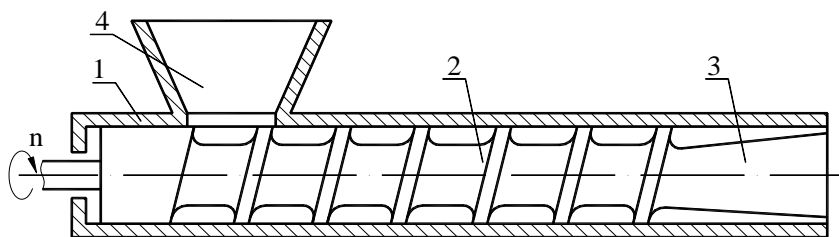


Рис. 2.5. Екструдерний пристрій для переробки відходів:
1 – корпус; 2 – шнек; 3 – шнекова головка; 4 – бункер

Ці пристрої використовують здебільшого для подрібнення гуми у високопластичному стані, який можна охарактеризувати як пружно-деформаційний. Суть цього способу переробки відходів полягає у використанні поля механічних сил, при якому матеріал підлягає стисненню зі зсувом. При взаємодії шнекової головки з корпусом пристрою відбувається перетирання, деструкція матеріалу і його перегрів за рахунок сил тертя.

Перевагою екструдерного пристрою перетирання є те, що пристрій використовують лише для подрібнення гумових відходів у високопластичному стані, хоча з іншого боку це також можна віднести і до недоліків. Крім того, недоліком пристроїв перетирання є велика металосмість та енергоємність обладнання; невизначений температурний режим, нагрів матеріалу, налипання подрібненого матеріалу на робочий орган, що уповільнює процес переробки.

Шнек із зубцями. Наступна група екструдерних пристроїв – пристрої, в яких робочим органом є шнек із зубцями. Ці пристрої використовують для масляних та пружних матеріалів, наприклад, для гуми.

Екструдерні пристрої, в яких шнек виконано із зубцями, знайшли застосування в масложировій, виноробній, консервній галузях харчової промисловості, в хімічній, будівельній і гідролізно-целюлозній промисловості, а також у сільському господарстві [70].

Подрібнені відходи використовують як наповнювач у полімерних композиціях, для одержання гумових виробів, плівки, а також для одержання олії, соку та інших продуктів харчування.

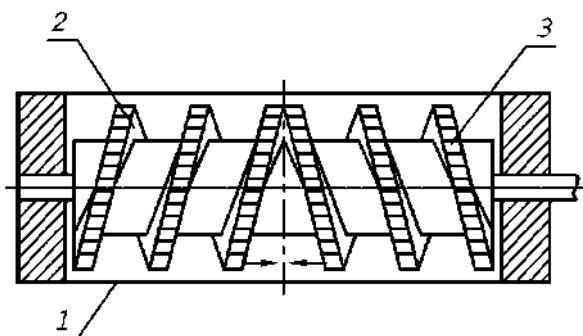


Рис. 2.6. Екструдерний пристрій зі шнеком з нарізаними зубцями

Екструдерні пристрої зі шнеком, на якому нарізані зубці, складаються з корпусу 1, в якому вмонтовано шнек 2 із зубцями 3 різної форми і розмірів (див. рис. 2.6). Подрібнюваний матеріал завантажується у завантажувальний бункер і подрібнюється за рахунок сил тертя і стиснення, що виникають між корпусом 1 та шнеком 2. У пристроях цього типу подрібнена маса налипає на поверхню шнека між западинами зубців і потім повільно обертається разом зі шнеком, що знижує якість подрібненого матеріалу, продуктивність процесу переробки та збільшує енергоємність пристрою.

Шнек з ріжучими елементами. Пристрої, у яких робочим органом є шнек з ріжучими елементами, використовують для переробки твердих та текстильних матеріалів.

Екструдерні пристрої типу шнек з ріжучими елементами застосовують у будівельній, текстильній та гірничорудній промисловості. Подрібнені матеріали використовуються у різних полімерних композиціях як домішки при виготовленні полімерних виробів. Подрібнені текстильні відходи йдуть на створення технічної вати, різних прокладок та інших виробів одноразового й короткочасного користування.

Шнекові перероблювальні пристрої із зубчастою поверхнею використовуються для подрібнення і роздирання текстильних відходів, забезпечуючи ефективний процес переробки. У такому типі пристроїв не тільки на шнековій поверхні розташовані зубці, але й поверхня зони переробки має зубчасту структуру, що сприяє більш ефективному подрібненню матеріалу. Такі шнекові перероблювальні пристрої можна успішно використовувати для попереднього подрібнення полімерних або інших великих шматків матеріалів. Цей процес допомагає знизити розміри вихідних матеріалів і зробити їх більш адаптивними для подальшої переробки та використання.

Розглянемо конструкцію будови цього перероблювального пристрою. Пристрій складається з корпусу 1, шнеків, які обертаються назустріч один одному [68]. На гвинтових навівках шнека закріплені подрібнювальні елементи типу зубців (рис. 2.7).

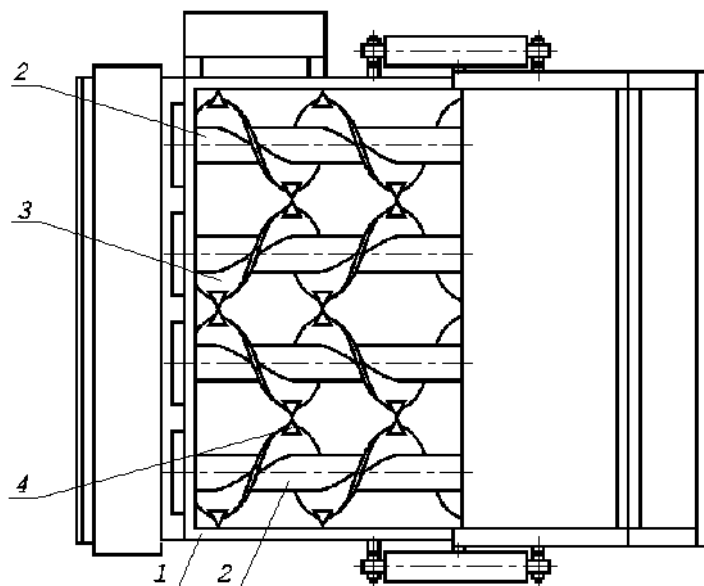


Рис. 2.7. Перероблювальний шнековий пристрій з ріжучими елементами:
1 – корпус; 2 – шнек; 3 – гвинтові навівки; 4 – зубці

Отже, шнекові перероблювальні пристрої із зубчастою поверхнею є ефективними та економічно вигідними засобами переробки відходів у різних галузях промисловості.

2.2.4. Голкові дезінтегратори та дисмембратори

Переробка відходів легкої промисловості в дезінтеграторах здійснюється за рахунок удару. До обладнання цього типу можна віднести пристрій, який має в собі ротор 3 і статор (рис. 2.8). Статор виконаний у вигляді корпусу, в якому розташовані контрножі і зроблено завантажувально-розвантажувальні отвори. В свою чергу, ротор виконаний у вигляді циліндричної металеві щітки – голкофреза або у вигляді набору пластин, паралельних до вісі, які мають різну величину (рис. 2.8, в) [71]. Такі перероблювальні пристрої можуть бути використані для подрібнення зношених автомобільних покришок, еластичних матеріалів, у т.ч. брикетів синтетичного каучуку, штучної та натуральної шкіри. Цей тип подрібнювача можна використовувати у хімічній, паперовій промисловості для отримання порошоків, у виробництві пластмас, наприклад, полістиролу, де від ступеня подрібнення каучуку залежить час розчинення його в стіролі, у виробництві полімерних будівельних матеріалів, де при створенні композицій потрібно подрібнювати каучук.

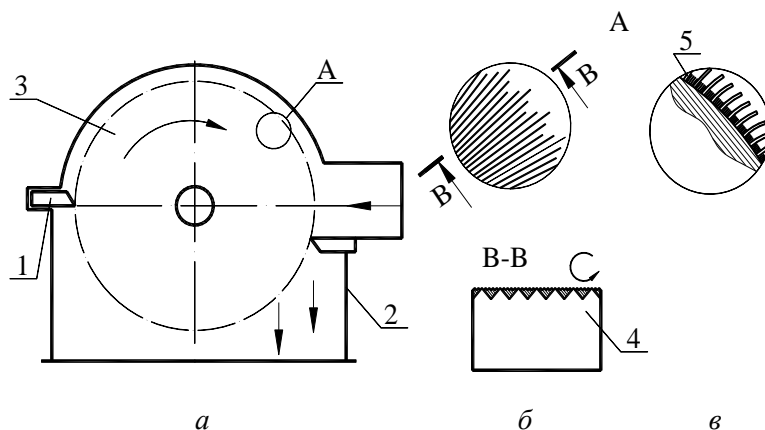


Рис. 2.8. Голкофрезний пристрій для переробки відходів:

a – дезінтегратор; *б* – пластинчатий ротор; *в* – голчатий ротор

1 – ножі статора; *2* – корпус; *3* – ротор; *4* – пластини дисмембратора; *5* – голки голкофрези

При подрібненні композиційних матеріалів голкофрезною з'являється можливість розділяти різноманітні матеріали, наприклад, відокремлювати монолітний матеріал від волокнистого. Водночас моноліт подрібнюється на порошок, а з волокнистого матеріалу отримують волокна; таким чином зберігаються основні властивості самих матеріалів, що є досить значною перевагою.

Отриманий після переробки матеріал можна використовувати як наповнювач для гумових сумішей і при виробництві полімерних виробів легкої промисловості. Використання цього наповнювача дозволить зменшити стирання виробів без зниження їхньої еластичності. Також цей перероблений матеріал можна застосовувати як наповнювач при переробці фенолформальдегідних смол.

У суміші з латексом чи з ПВХ цей подрібнений матеріал можна пресувати у тонкі плівки, на які можна наносити малюнок тисненням.

При переробці ворсистих матеріалів отриманий матеріал використовують для виготовлення доріжок, шнурків та як наповнювач для будівельних виробів.

Переробка відходів може здійснюватися у голкофрезному пристрої у різних режимах. Змінюючи кількість обертів і величину подачі матеріалу, можна регулювати дисперсність продукту, який перероблюється, в досить широких межах. Також для зменшення витрат енергії на руйнування матеріалу перед подрібненням його пружно дефор-

мують, при цьому в матеріалі виникають значні внутрішні напруження, що дозволяє підвищити продуктивність руйнування за рахунок того, що попередньо напружені тіла вимагають значно меншої енергії для їх руйнування.

Ступінь дисперсності, якого можна досягти при переробці відходів на такому обладнанні, складає 0,1–2 мм для монолітних матеріалів, від 1 до 45 мм для волокнистих матеріалів.

Незважаючи на те, що зазначене обладнання із зубчастою поверхнею має мало-вивчений і маловикористовуваний характер, воно виявляє свої переваги:

- можливість переробки в різних режимах, а також регулювання дисперсності вихідного продукту за рахунок зміни кількості обертів і величини подачі продукту;
- зберігаються основні властивості матеріалів; після подрібнення моноліту отримуємо порошок, після подрібнення волокнистих матеріалів – волокна.

Однак є й недоліки:

- робота таких подрібнювачів розрахована на подрібнення лише на дрібні фракції;
- продуктивність процесу подрібнення невисока.

Проведений аналіз показує, що переробка відходів легкої промисловості в голко-фрезових пристроях є досить ефективною з точки зору вимог до продукту подрібнення. На такому обладнанні можна здійснювати процес переробки матеріалів широкого діапазону з різними властивостями і структурою, зберігаючи при цьому основні властивості кожного з них.

2.2.5. Валкові пристрої для переробки відходів

Валкові пристрої є важливим обладнанням у переробці полімерів та композицій на їхній основі. Вони призначені для виконання різних операцій, включаючи змішування, дроблення та пластифікацію матеріалів. Валкові пристрої можуть дробити великі шматки полімерних матеріалів на менші частинки, що полегшує подальшу переробку та забезпечує рівномірний розподіл матеріалу у процесі обробки [72].

Матеріал подається на валки у вигляді гранул, порошкоподібних або волокнистих мас, окремих шматків. При обертанні валків, які рухаються у протилежних напрямках, а точніше назустріч один одному, внаслідок тертя матеріал, який завантажуються, затягується в зазор між валками і перероблюється. Спочатку матеріал піддається силам стиснення, в результаті чого відбувається пластична деформація матеріалу або його руйнування.

Валкові пристрої за конструкцією можуть мати від одного до декількох валків, які обертаються як в одному, так і в протилежних напрямках. Залежно від міцності матеріалу і ступеня його подрібнення, поверхні валків можуть бути гладкими, рифленими, зубчастими, дисковими, конусними тощо. Також, з метою покращення процесу переробки, валки можуть мати різноманітну форму. Вони можуть бути виконані у вигляді розташованих один відносно одного усічених конусів, а також у вигляді частин тора.

Перероблювальні пристрої валкового типу можуть бути виконані в двох варіантах: з постійним (див. рис. 2.9, а) і змінним (рис. 2.9, б) міжосьовим зазором. Можливість зміни міжосьового зазору забезпечується за рахунок виконання одного з валків підпружиненим.

За технічними ознаками валки для переробки полімерних відходів можна умовно поділити на змішувальні, пластифікувальні, фарботерні та подрібнювальні [73].

Вихідним матеріалом при такому способі переробки в основному є порошок, а у випадку монолітних полімерних матеріалів – невеликі шматки. Продуктивність валкових подрібнювачів коливається в межах від 10 м³/г до 400 м³/г, залежно від конструкції валків обладнання та матеріалу, що подрібнюється.

В обслуговуванні пристрої валкового типу є досить простими. Хоча вони також мають свої переваги та недоліки.

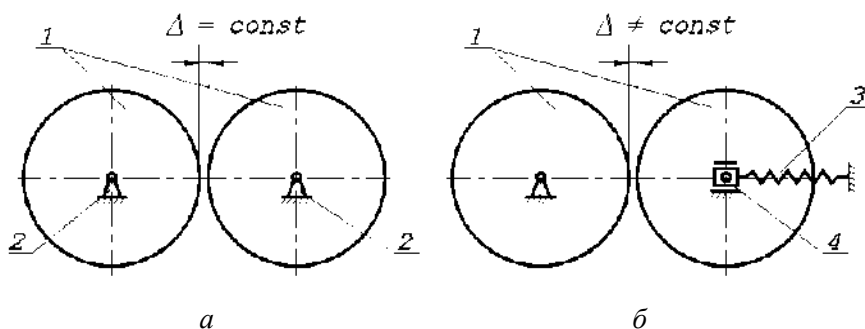


Рис. 2.9. Валкові пристрої для переробки відходів з постійним (а) та змінним (б) міжосьовим зазором: 1 – валки; 2 – нерухома опора; 3 – пружний елемент; 4 – повзун

До переваг цієї групи подрібнювачів відносять простоту та надійність роботи конструкції, можливість регулювання зазору між валками, що дозволяє регулювати величину дисперсності подрібнювального матеріалу.

Недоліком валкових подрібнювачів є відносно швидке зношення робочих поверхонь органів, великі енерговитрати на одиницю обсягу подрібнюваного матеріалу.

Гладкі валки. Валкові пристрої з гладкими валками використовуються для переробки сипучих, крихких, твердих та абразивних матеріалів (зерна, вугілля, полімерних матеріалів, різних рудних і нерудних матеріалів, фарб, шпаклівки) [74]. Тобто ці подрібнювачі використовують практично для всіх видів відходів, крім текстильних. Таке обладнання знайшло застосування в комбікормовій, пивоварній, будівельній, гірничорудній, хімічній та у легкій і харчовій промисловості.

Подрібнені відходи використовують як наповнювачі: у полімерних композиціях; для виготовлення спеціальних видів клею; у виготовленні лінолеуму; гумових сумішей.

Валкові пристрої з гладкими поверхнями валків у своїй конструкції мають корпус 1, в якому розташовані гладкі валки 2, завантажувальний бункер 3 і розвантажувальний бункер 4 (рис. 2.10).

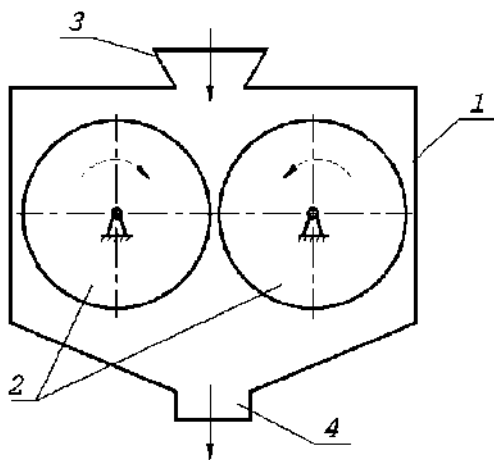


Рис. 2.10. Валковий перероблювальний пристрій з гладкими поверхнями валків

Через завантажувальний бункер подаються подрібнені відходи, які захвачуються валками, що обертаються назустріч один одному. За рахунок стискаючих деформацій

відбувається подрібнення матеріалу. І тільки у випадку, коли швидкості обертання валків різні, до стискаючих деформацій додаються ще й зсувні деформації. Величина стискаючих навантажень залежить від міжвалкового зазору та від деформації зсуву.

Процес подрібнення відходів у пристроях з гладкими валками є досить поширеним і добре дослідженим. Він досить простий за конструкцією установки та за обслуговуванням. Ступінь дисперсності, що досягається при такому способі, становить від 0,2 мм до 2 мм. Величину дисперсності можна налаштувати регулюванням зазору між валками. Можливість регулювати ступінь дисперсності дозволяє перероблювати майже всі види попередньо подрібнених відходів, простота конструкції пристрою, легкість і зручність в обслуговуванні – все це обумовлює широке використання валкових пристроїв з гладкими валками. Що ж стосується недоліків згаданих пристроїв, то одним з них є неможливість якісного подрібнення волокнистих матеріалів.

При подрібненні чистих речовин і хімічних реактивів головною проблемою є збереження чистоти матеріалу, що перероблюється. Підібрати відповідний конструкційний матеріал, з якого виготовляють валки і який би зміг задовольнити вимоги до переробки відходів, неможливо. Для цього використовують пустотілі валки з вакуумом всередині, що дозволяють подрібнювати згадані відходи. З подрібнюваного матеріалу на валках утворюється щільний шар за рахунок вакуумного всмоктування. Така конструкція дає ефект не тільки з огляду на економію дефіцитних конструкційних матеріалів, але й дозволяє вирішувати проблему переробки чистих речовин зі збереженням потрібної чистоти.

У багатьох перероблювальних пристроях використовують механізм «привалу-відвалу», який дозволяє усунути перекося валків при нерівномірній подачі матеріалу по робочій довжині валків чи при попаданні сторонніх предметів у міжвалковий зазор, а також дозволяє притискати валки рівномірно по їх робочій довжині [74].

Для подрібнення твердих та абразивних речовин застосовують пристрій, валки якого виконані у вигляді обичайок, змонтованих на валках безпосередньо набором гумових кілець, установлених по довжині обичайки і з'єднаних між собою за допомогою гвинтів. У процесі переробки валки з набором гумових кілець, стиснутих зусиллям, вищим за зусилля руйнування частинок відходів, не відхиляючись від обертання, руйнують частини цього матеріалу, забезпечуючи якість і ефективність подрібнення. Така конструкція валків забезпечує безступінчасте регулювання фрикційного зусилля при всебічному стисканні набору гумових кілець [75].

Існує перетирочний пристрій, який складається з двох валків, один з яких встановлений з можливістю обмеженого осьового зміщення і оснащений генератором віброковань з електромагнітною котушкою переминого струму [76].

Використання такого пристрою дозволяє підвищити ефективність переробки дрібних відходів і, відповідно, покращити якість подрібненого матеріалу. Ефективність досягається за рахунок досить великої амплітуди коливань валків відносно один одного. Конструкція пристрою досить проста і, відповідно, надійна. Також завдяки такій конструкції пристрою підвищується ефективність переробки вихідного матеріалу.

У таких пристроях валкового типу, крім основних робочих органів, гладких валків, можуть використовуватися також допоміжні подрібнювальні елементи. Наприклад, шнек, який установлений в живильному пристрої. Конструкція установки має підвищену продуктивність за рахунок того, що відходи можуть подрібнюватися шнеком живильника під дією примусової подачі в зону звуження в нижній частині корпусу, далі у міжвалковий зазор.

Зубчасті валкові подрібнювачі. Валкові пристрої із зубчастими валками призначені для подрібнення корисних копалин, різних будівельних матеріалів, сипучих матеріалів (зерна), полімерних матеріалів, кінофотоматеріалів, гуми, дерева, керамічних мас. Ці перероблювальні пристрої знайшли застосування в гірничорудній, будівельній, дерево-

обробній, целюлозно-паперовій, харчовій, комбікормовій та в інших галузях промисловості. Подрібнені відходи надалі можуть використовуватись як наповнювачі у полімерних композиціях, для одержання гумових виробів, різних харчових добавок.

Валкові пристрої із зубчастими валками [77] мають таку ж будову конструкції установки, як і подрібнювачі з гладкими валками (рис. 2.11). Різниця полягає лише у тому, що поверхня валків може бути виконана із зубцями різної конфігурації. Зубчасті валки за розташуванням зубців на валку можна поділити на дві основні групи:

1) валки, зубці яких виконані перпендикулярно до осі обертання. Використовуються для подрібнення листового матеріалу, наприклад, кінофотоматеріалів, паперу, листових полімерів;

2) валки, зубці яких виконані паралельно до осі обертання валка. Використовуються для подрібнення гранулоподібних матеріалів, наприклад, зерна, гуми.

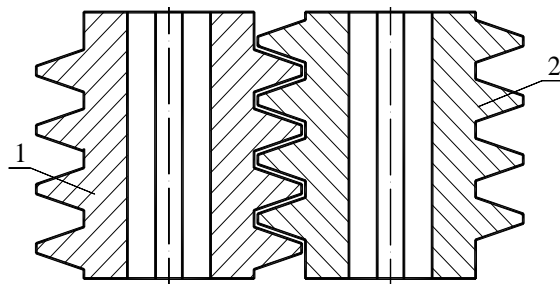


Рис. 2.11. Валковий перероблювальний пристрій із зубчастими валками:
1 – верхній; 2 – нижній

До основних видів зубчатих валкових пристроїв можна віднести пристрої з валками із зигзагоподібним профілем. В установці для переробки відходів [55, 69] всередині корпуса розміщено приводні валки 1 і 2 з повздовжнім зигзагоподібним профілем поверхні. Для підвищення ступеня подрібнення різних твердих частинок матеріалу, що перероблюється, і надійності роботи установки поверхні валків виконано з додатковим рифленням у вигляді кільцевих поперечних канавок (рис. 2.12).

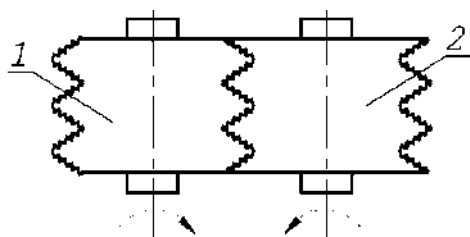


Рис. 2.12. Валки із зигзагоподібним профілем: 1, 2 – верхній та нижній

Існує аналогічний пристрій для подрібнення полімерної плівки [78]. Різниця полягає лише в тому, що з метою підвищення якості подрібнення, ріжучі елементи одного барабана 1 виконані у вигляді кільцевих ножів, кожен з яких має в поперечному перерізі трикутний профіль, а ріжучі елементи барабана 2 виконані у вигляді зубців зі скошеною ріжучою кромкою, причому кромки зубців двох з'єднаних рядів спрямовані у протилежні сторони (див. рис. 2.13).

Установки із зубчастими валками дозволяють переробляти відходи, орієнтуючись на тип подрібнюваного матеріалу. Тобто для подрібнення сипучих матеріалів ефективніше використовувати валки з повздовжнім виконанням зубців.

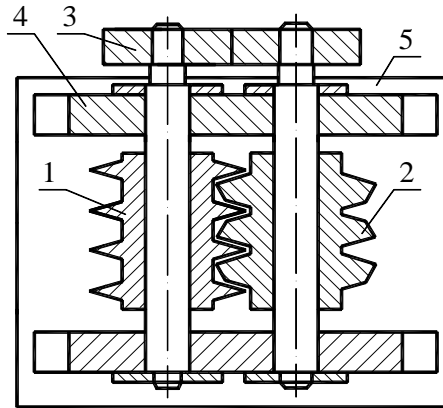


Рис. 2.13. Валковий пристрій для подрібнення полімерної плівки:
 1 – барабан з різьчастими зубцями; 2 – барабан із зубців зі скошеною ріжучою кромкою;
 3 – зубчаста передача; 4 – стійки; 5 – станина

Для подрібнення листових матеріалів доцільніше використовувати валки з поперечним виконанням зубців. Це дозволяє отримувати вищий ступінь дисперсності вихідного матеріалу, але водночас прискорює зношування поверхонь як валків, так і корпуса, а також знижує ККД подрібнювача, що є суттєвими недоліками такого пристрою.

Валки з криволінійною поверхнею. Валкові пристрої з криволінійною поверхнею [69, 79] використовують для подрібнення сипучих, полімерних, пластичних матеріалів (наприклад, гуми), рудних і нерудних копалин, зерна. Ці пристрої знайшли застосування в хімічній, харчовій, гірничорудній, комбікормовій, будівельній, сільськогосподарській та в інших галузях промисловості. Подрібнені відходи використовуються як наповнювачі для виготовлення бетонів, гумових виробів, муки, як наповнювачі у полімерних композиціях.

Установка для подрібнення інертних матеріалів при виготовленні будівельних бетонів, а також для подрібнення вугілля в котельних складається з корпуса, всередині якого по горизонтальних валах встановлено два валки 1 з криволінійною поверхнею, які мають квадратні торці. Ці валки з'єднані зубчатою парою з можливістю обертання в протилежні сторони і розміщені зі зміщенням на 45° сторін квадратних торців, які лежать в одній площині, з утворенням трикутної форми бокових граней (рис. 2.14) [79].

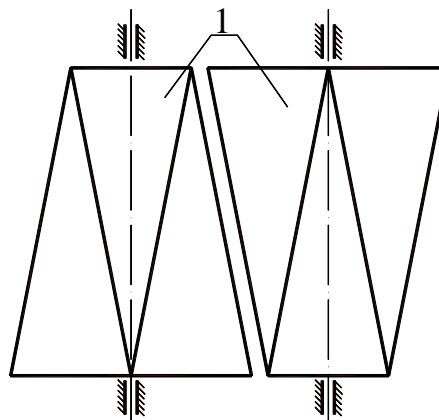


Рис. 2.14. Валковий перероблювальний пристрій з конічною поверхнею валків 1:

Процес подрібнення здійснюється за рахунок аналогічних процесів, притаманних гладким валкам. У цьому випадку покращення процесу подрібнення досягається за рахунок огранки валків. Ступінь дисперсності, якого можна досягти при такому способі подрібнення, становить від 0,1 мм до 4 мм.

Наявність криволінійної поверхні валків дозволяє розширити діапазон матеріалів, що переробляються, і, відповідно, розширити сферу застосування подібного обладнання. Стосовно недоліків, притаманних конструкціям з криволінійною поверхнею валків, варто зазначити, що основним з них є нерівномірність дисперсності вихідного матеріалу.

У валкових пристроях з криволінійною поверхнею використовують валки найрізноманітніших форм. Для отримання тонкодисперсних порошоків з полімерних еластичних матеріалів (гуми) використовують пристрій [55, 69], який складається з валка 1 з горизонтальною віссю обертання і криволінійною робочою поверхнею та з валка 2 з вертикальною віссю обертання у формі зрізаного конуса (рис. 2.15).

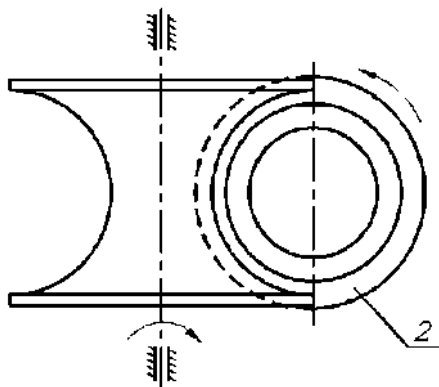


Рис. 2.15. Валковий пристрій для переробки відходів:

1 – з горизонтальною віссю обертання; 2 – з вертикальною віссю обертання

Руйнування матеріалу відбувається безпосередньо між валками 1 та 2, які є робочими органами цього перероблювального пристрою. Процес руйнування відбувається за рахунок стиску і зсуву шарів матеріалу, що перероблюється, між поверхнями валків у різних площинах. Ступінь дисперсності при такому способі переробки відходів становить від 0,1 мм до 4 мм. Валковий пристрій цієї конструкції забезпечує розширення технологічних можливостей і покращення якості вихідного продукту завдяки можливості досягнення рівномірного по довжині контакту криволінійних поверхонь зазору між валками, при зміні його величини в широких межах.

Усі характеристики цього валкового подрібнювача стосуються також і наступної конструкції перероблювального пристрою. Різниця між ними полягає лише в тому, що з метою підвищення ефективності процесу подрібнення валки цієї конструкції розташовані один над одним. Робоча поверхня верхнього валка 1 виконана у вигляді кулі, а робоча поверхня нижнього валка 2 відповідно ввігнута, причому лінія контакту валків виконана у формі півкулі (див. рис. 2.16).

Для розділення бракованих і стріляних гільз на поліетиленову трубку і металеву основу використовують пристрій [55, 69] з двома валками, які розміщені вертикально і виконані з лискою по всій циліндричній поверхні (рис. 2.17, а). Основною перевагою цього пристрою є те, що такий профіль валків враховує форму подрібнених відходів. Хоча цей аргумент можна також віднести і до недоліків описуваної конструкції, адже на пристроях з профільними валками можна перероблювати лише певний тип відходів, що відповідають згаданому профілю. Пристрій є простим в обслуговуванні та за конструкцією.

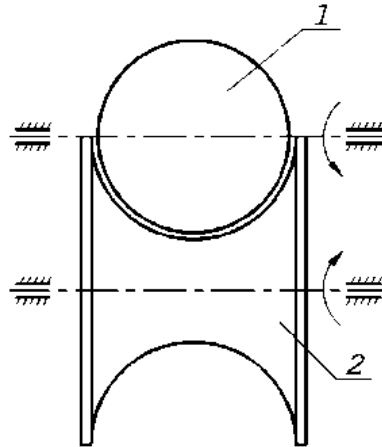


Рис. 2.16. Валковий пристрій для переробки відходів:
 1 – виконаний у вигляді кулі; 2 – з ввігнутою поверхнею

Валки (рис. 2.17, б), які в поперечному перерізі мають форму рівностороннього трикутника з випуклими сторонами і закругленими вершинами, використовують у подрібнювачах гірничорудної, хімічної та харчової промисловості [80].

Подрібнення матеріалу відбувається внаслідок утворення стискаючих деформацій.

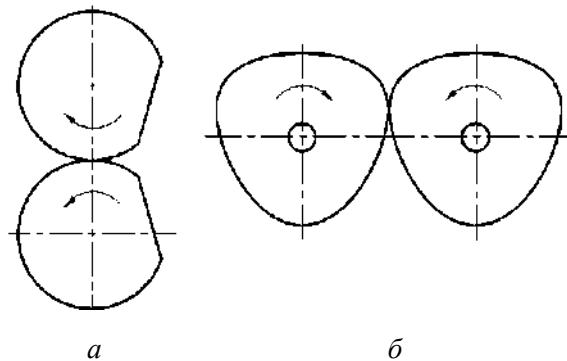


Рис. 2.17. Валкові пристрої для переробки відходів:
 а – розміщені вертикально і виконані з лискою по всій поверхні;
 б – мають форму рівностороннього трикутника з випуклими сторонами

Величина стискаючих навантажень залежить від міжвалкового зазору. Що ж стосується розмірів подрібненого матеріалу, то в перероблювальних пристроях подібної конструкції значно проблематично провести налаштування зазору, що є основним її недоліком. Головною перевагою пристроїв такої незвичної форми є збільшення кута захвату відходів, що перероблюються. Для розрахунку параметрів обладнання такого типу немає методики, хоча є методики для розрахунку параметрів змішувальних пристроїв, але вони недосконалі.

Як видно із зазначеного, спеціального обладнання для переробки полімерних відходів недостатньо, і часто воно не відповідає сучасним вимогам. Багато пристроїв, що використовуються для цих цілей, є експериментальними та несерійними.

Одним з основних факторів, що ускладнює використання спеціального обладнання, є високі витрати на його розробку та виготовлення. Запозичення обладнання з ін-

ших галузей промисловості може бути ефективним, але буде приводити до недостатньої адаптації для конкретних вимог переробки полімерних відходів.

Для подолання цих проблем важливим завданням є залучення додаткових досліджень та інвестицій в розробку спеціального обладнання, яке відповідає потребам переробки полімерних відходів.

2.3. Хімічні технології переробки

Аналіз хімічних технологій переробки відходів легкої промисловості є досить важливим етапом у розумінні можливостей та ефективності різних підходів до управління відходами, їх переробки та повторного використання. Розглянемо деякі типові технології разом з оцінкою рівня їх технологічної готовності (TRL). Опис кожної технології включатиме типові параметри процесу, вимоги до енергії та продукти [81].

Ієрархія відходів, яку встановлює рамкова директива, визначає пріоритетність різних методів управління відходами. Згідно із цією ієрархією, найважливішим є запобігання утворенню відходів, за якого слід прагнути, аби зменшити обсяг відходів, що утворюються взагалі (рис. 2.18). Далі йде підготовка до повторного використання, переробка, відновлення, і в кінцевому варіанті найменш перспективний метод – утилізація, який використовується лише тоді, коли інші альтернативи неможливі [82].



Рис. 2.18. Ієрархії поводження з відходами

Існує чотири загальні напрями у переробці полімерних відходів (див. рис. 2.19).

Первинна переробка, так звана переробка замкнутого циклу – це механічна повторна переробка окремого незабрудненого пластику, що призводить до отримання продукту еквівалентної якості [83].

Вторинна переробка – це механічна переробка, яка знижує якість переробленого матеріалу.

Третинна переробка – це хімічна переробка або переробка вихідної сировини, яка розщеплює полімери до мономерів із якісним відновленням переробленого матеріалу.

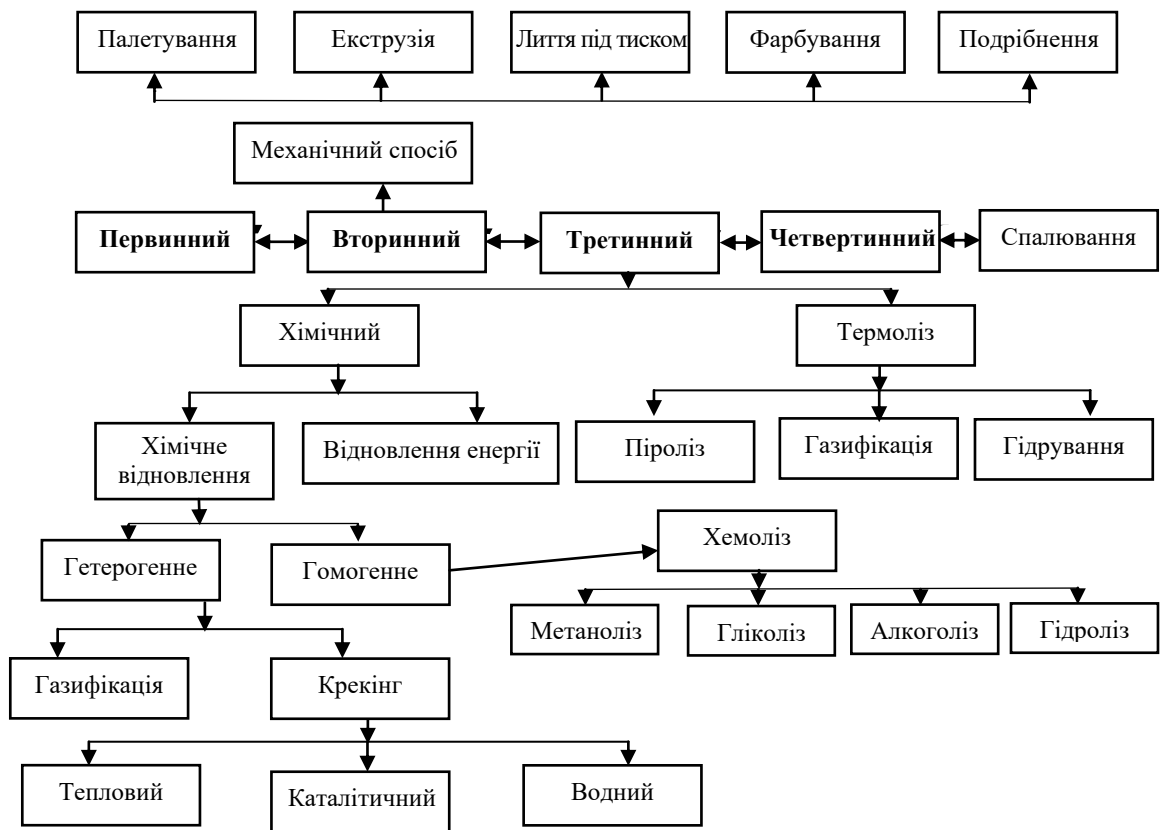


Рис. 2.19. Етапи переробки пластикових твердих відходів

Четвертинна переробка – це спалювання відходів для відновлення енергії.

Первинна переробка не використовується для твердих побутових відходів (ТПВ), оскільки вона не націлена на переробку забруднених змішаних пластиків. Чутливість технології можна зменшити шляхом підвищення температури процесу. Вторинна переробка вимагає ретельного сортування. Третинна переробка веде до виробництва сировини, дозволяє повторне використання пластику та цілком відповідає нинішнім прагненням замкнутого циклу використання пластику. Пластикові відходи мають великий потенціал як джерело для виробництва хімічних речовин і палива. Четвертинний метод скорочує термін служби матеріалу. Він використовується в багатьох країнах, але багато в чому є проміжним рішенням, оскільки не повністю узгоджується з принципами циклічної економіки і провокує викиди великих обсягів токсичних газів в атмосферу [84].

Традиційно єдиним способом переробки пластикових відходів була механічна переробка: процес, що включає сортування, подрібнення, відділення, промивання, плавлення та подальше охолодження до гранульованого переробленого пластику. Однак цей процес можливий лише з певними типами пластмас, і лише якщо вони складаються з окремих полімерів, але насправді багато пластикових виробів містять кілька типів полімерів, кілька шарів пластику, або забруднені їжею та брудом. Через це їх механічну переробку важко здійснити або занадто дорого. Натомість їх спалюють або відправляють на звалища. Ось чому фактично переробляється мало пластику: близько 15 % у Європі та 9 % – у США [85]. До того ж, пластик, який переробляється, зазвичай перетворюють на менш цінні продукти.

Хімічна переробка – це новий підхід до переробки пластикових відходів, який відкриває низку нових можливостей.

У науковій літературі, хімічна переробка позиціонується як третій за рівнем метод переробки в рамках чотирирівневої системи переробки. Третинна переробка охоплює як відновлення пластмас, так і виробництво палива та інших речовин [86–88]. Отже, у науковій літературі концепція переробки висвітлюється більш широко і комплексно, порівняно з тим, що визначено в директивах або інших офіційних документах.

Хімічна переробка – це загальний термін, який охоплює різні методи розкладання пластикових відходів на їх складові (наприклад, мономер, олігомери) та інші речовини, такі як рідкі, газоподібні або тверді вуглеводні [89]. Розкладання полімерів до мономерів або олігомерів називають деполімеризацією [90, 91]. Міжнародна організація стандартизації надала подібне визначення хімічної переробки в 2008 році: «перетворення на мономер або виробництво нової сировини шляхом зміни хімічної структури пластикових відходів шляхом крекінгу, газифікації або деполімеризації, за винятком відновлення енергії та спалювання».

У різних наукових джерелах по-різному трактується термін «хімічна переробка». Це призводить до різного розуміння продуктів хімічної переробки та різної класифікації таких технологій. У багатьох публікаціях використовуються два терміни – «хімічна переробка» і «переробка сировини» [92]. Іноді «переробка вихідної сировини» визначається як метод переробки пластикових відходів до вихідної сировини, яка використовується для виробництва нових полімерів [93]. Отже, як точно відзначили Davidson, деякі автори використовують переробку вихідної сировини як синонім деполімеризації. Однак останні огляди літератури щодо хімічної переробки розглядають її ширше, ніж деполімеризацію, і розглядають технології хімічної переробки, внаслідок яких утворюються рідини, гази та інші продукти [94, 95].

На відміну від інших методів переробки, впроваджується хімічна переробка як зміна хімічної структури полімеру. Наприклад, первинна та вторинна переробка призводять лише до фізичних змін полімерів шляхом такої обробки, як дроблення, повторне формування або плавлення [96]. Зміни в хімічній структурі є важливим критерієм для відмінності технологій хімічної переробки від інших підходів.

Розглянуті підходи в статтях [88, 92, 97, 98] відображають різні думки та уявлення про поняття хімічної переробки та її компоненти. Зокрема, вчені Crippa M., Hann S. та Patel D. вважають використання розчинників як частину технології хімічної переробки. Це означає, що процес розчинення є одним з підходів до зміни фізичних властивостей полімерів, хоча хімічна структура залишається практично незмінною.

З іншого боку, Cefic вважає, що розчинення полімерів не є типовим хімічним процесом перетворення, тому вони не пов'язують його з хімічною переробкою. Ця точка зору може базуватися на тому, що в хімічних переробних процесах зазвичай відбуваються більш суттєві зміни в структурі матеріалів. Такі різниці в підходах дозволяють науковим дослідникам розглядати поняття хімічної переробки з різних точок зору та розкривати різні аспекти цього процесу.

В основному у джерелах інформації розрізняють термічний і хімічний способи розкладання полімерів на основі типу агентів, що використовуються для цієї мети. Піроліз і газифікація є добре відомими прикладами технологій хімічної переробки, які використовують теплову енергію для переробки полімерів. Хімічне розкладання полімерів – це група технологій, які називають хемолізом (також хімічною деполімеризацією), які використовують хімічні агенти для розщеплення полімерів на мономер та олігомери [92].

Як слідує із зазначеного, переробка відходів із застосуванням саме хімічних технологій є досить актуальною. Однак, не всі хімічні технології переробки досягли однакового рівня технологічної і ринкової готовності. Деякі з них можуть бути обмеженими в своєму комерційному застосуванні або поки що не досягли рівня промислового використання.

Саме тому науковці продовжують працювати над удосконаленням та розвитком цих технологій з метою зменшення негативного впливу відходів на навколишнє середовище та реалізації більш стійкого та ефективного пластикової переробки.

Хімічна переробка розщеплює пластикові відходи на складові молекулярні частини. Коли пластик розщеплюється таким чином, це безпосередньо впливає на хімічний склад його полімерів, дозволяючи повернути їх до початкової сировини – і бути готовими до перетворення на нові полімери або нафтохімічну сировину. Такий метод стосується пластикових відходів, які неможливо механічно переробити з технічних чи економічних причин. Також хімічна переробка пропонує рішення для пластикових відходів, які або більш забруднені, або змішані та/або складаються з кількох матеріалів.

Кожна технологія хімічної переробки може обробляти певну сировину і, таким чином, пропонує додаткову модель для підтримки циклічної економіки для всіх видів пластику. Розрізняють різні технології хімічної переробки, які поділяються на три різні категорії залежно від позиції їх продукції в ланцюжку постачання пластмас: розчинення – полімер в полімер; термічна деполімеризація – полімер до мономерів шляхом термічної деградації; хімічна деполімеризація – полімер в мономери за допомогою хімічної реакції.

2.3.1. Розчинення полімерів

Розчинення (рис. 2.20) видаляє добавки з полімерів шляхом занурення їх у розчинники. Пластик розчиняється, повертаючи його на стадію полімеру. Потім полімери можна переробити в новий перероблений пластик. Розчинення здебільшого зосереджено на монопотоках, незалежно від сортованих за типами пластику: поліетилентерефталат ПЕТФ (включаючи волокна), поліамід (ПА), поліуретан (ПУ), поліметилметакрилат (ПММА) та полілактид (ПЛА).

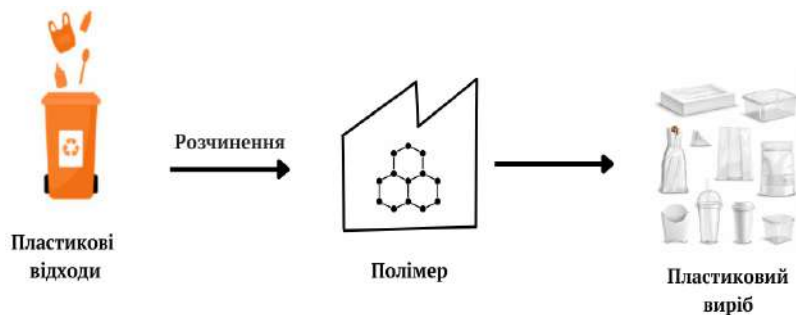


Рис. 2.20. Хімічна переробка полімерних відходів шляхом їх розчинення

Процес розчинення починається з етапу, коли пластикові відходи сортуються та готуються для подальшої обробки. У процесі розчинення використовується незначна кількість тепла та розчинників для розчинення пластику до розчинів полімерів і добавок, з яких він спочатку був виготовлений. На наступному етапі добавки відокремлюють від полімерів. У процесі розчинення структура полімеру не змінюється. На останньому етапі до полімерів додають нові добавки для виробництва нового переробленого пластику.

2.3.2. Термічна деполімеризація відходів

Результатом переробки вихідної сировини термічною деполімеризацією (термоперетворення) є основні хімічні речовини (наприклад, вуглеводні або синтетичний газ), які потребують подальшої обробки для отримання полімеру (рис. 2.21). Існує два різні підходи до досягнення такого результату, а саме, піроліз і газифікація. Це забезпечує гнучкість для повторного використання в нафтохімічній промисловості.

Піроліз (термічний крекінг): пластикові відходи нагрівають до температури понад 400 °С в умовах низького вмісту кисню. У процесі довгі полімерні ланцюги розкладаються на основні вуглеводневі продукти, такі як газ, віск, дизельне паливо та нафта, які можна подавати на нафтохімічні заводи, щоб знову перетворити на поліетилен та поліпропілен, або використовувати безпосередньо як паливо.

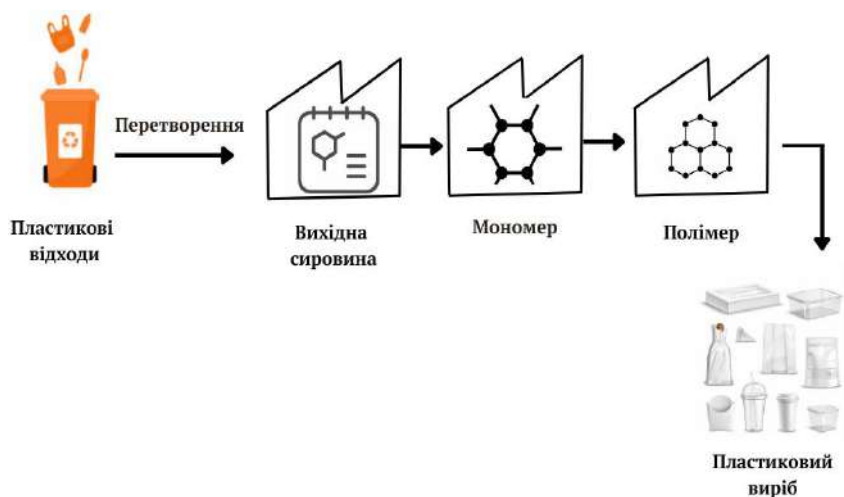


Рис. 2.21. Хімічна переробка полімерних відходів шляхом їх термічного перетворення (конверсії)

Процес переробки починається зі змішаних пластикових відходів, які сортуються та готуються до подальшої обробки. Потім процес перетворення відбувається безпосередньо в реакторі при відповідній температурі для розкладання пластикових відходів на рідку, нафтоподібну сировину (піроліз) або газоподібну сировину (газифікація). Процес відбувається за відсутності кисню (піроліз) або присутності кисню (газифікація), щоб забезпечити високу якість продукції. На наступному етапі потенційні забруднювачі ізолюються та вилучаються. Отримана рідка або газоподібна сировина (повторно) потрапляє в хімічний виробничий ланцюг на рівні нафтопереробного заводу як вторинна сировина, яка замінює щойно видобуту викопну сировину. Отримані продукти використовуються для виробництва хімікатів, у тому числі пластмас, такої ж якості, як ті, що виготовляються з традиційних природних ресурсів.

Піроліз здебільшого зосереджується на змішаних полімерах (включаючи багатошарові, мультиматеріали в контрольованих межах): поліетилен високого тиску (ПЕВТ), поліетилен низького тиску (ПЕНТ), поліпропілен (ПП), полістирол (ПС).

Параметри процесу, такі як температура, тиск, час перебування, впливають на кінцевий продукт [88]. Температура є одним із найважливіших параметрів, оскільки вона контролює реакцію розтріскування полімерного ланцюга та впливає на склад продукту. Вищі температури понад 500 °С дадуть більше газоподібних або обвуглених продуктів, тоді як нижчі температури 300–500 °С дадуть рідку нафту [94]. Процес піролізу є відносно простою технологією, придатною для переробки пластикових відходів, які важко деполімеризувати.

Тип обраного реактора має значний вплив на параметри процесу, такі як: час перебування, перемішування пластмас з каталізаторами, а також теплообмін і ефективність процесу. Піроліз виконується в багатьох різних типах реакторів: періодичного, напівперіодичного, киплячого та нерухомого шару, а також конічних реакторах з водяним шаром. Приклад конструкції піролізного реактора ВФВ показано на рис. 2.22 [92].

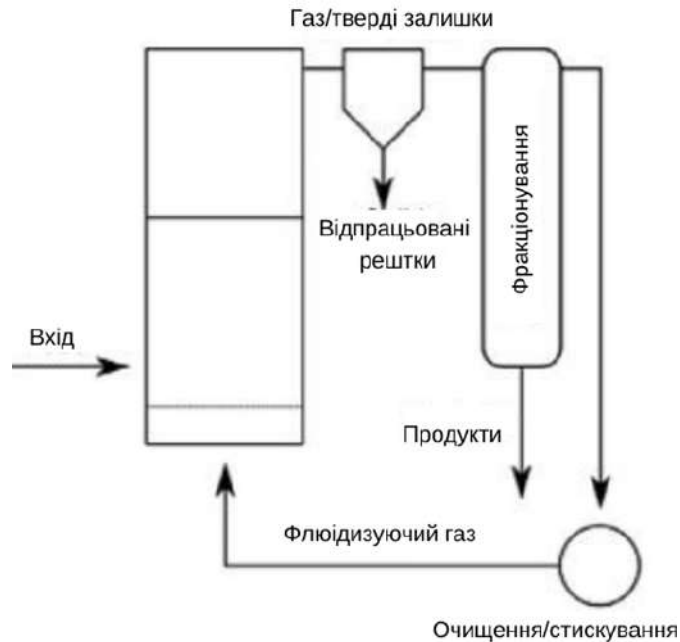


Рис. 2.22. Реактор ВФВ для піролізу відходів пластику

Використовуючи процес дистиляції, вуглеводневу пару, полімерні відходи можна потім перетворити на продукти, починаючи від важкого воску та масел до легких масел і газу. Можна змінити продукцію від важкої до легшої, регулюючи час і температуру процесу. Більш важкі вихідні продукти також можуть бути повторно введені в процес для додаткового крекінгу в більш легкі продукти.

Продукти піролізу можна переробляти майже так само, як нафту, використовуючи звичайні технології очищення для виробництва мономерних ланок для полімерів. Крім того, їх можна використовувати безпосередньо як паливо.

Використання піролізу для виготовлення сировини для виробництва поліетилену та поліпропілену може заповнити велику прогалину в обробці, оскільки поліетилен та поліпропілен не можуть бути деполімеризовані безпосередньо в мономери. Крім того, вироблений пластик буде полімером первинної якості і його можна буде використовувати в тих самих цілях (наприклад, упаковка харчових продуктів).

Процес піролізу можна посилити за допомогою каталітичного розкладання, де використовується відповідний каталізатор для сприяння реакції крекінгу. Наявність каталізатора дозволяє знизити температуру і час реакції. Процес приводить до значно вужчого розподілу кількості атомів вуглецю та збільшення виробництва легших вуглеводнів. Це допомагає збільшити частку вихідного продукту для використання у виробництві більшої кількості пластмас.

Каталітичний крекінг передбачає використання каталізаторів, таких як цеоліти та алюмосилікати, що знижує енергію активації процесу і збільшує швидкість реакції. Таким чином, додавання каталізатора дозволяє проводити процес при більш низьких температурах (300–350 °С) і зменшити енерговитрати. Крім того, це звужує розподіл вуглеводнів у кінцевих продуктах, дозволяючи отримувати рідку нафту з властивостями, подібними до традиційного палива [88, 99, 100]. Цей процес дає більший вихід вуглеводнів порівняно зі звичайним піролізом для більшості пластмас, але лише за умови вибору правильного каталізатора. Однак, каталітичний крекінг чутливий до забруднення пластику, оскільки

присутність компонентів хлориду та азоту в потоці пластикових відходів може дезактивувати каталізатор, а неорганічні матеріали можуть блокувати пори каталізатора [88]. Отже, для захисту каталізатора потрібна ретельна попередня обробка [92]. Процес обмежується чистими полімерами, такими як поліолефіни та полістирол [93].

Флюїд-каталітичний крекінг (ФКК) є основним вторинним процесом конверсії в нафтопереробній промисловості та забезпечує більшість світового бензину. Графічне зображення процесу представлено на рис. 2.23. У процесі каталізатор циркулює між двома реакторами і транспортує тепло від регенератора до реактора. Відпрацьований каталізатор, який частково покритий олією, направляється в установку парового відпарника для попереднього видалення адсорбованої олії та надходження в регенератор. Відпарені масляні пари спрямовуються у фракційну вежу для розділення на потоки бажаних параметрів. Каталітичний крекінг зазвичай проводять при температурі 450–550 °С, тоді як температура в регенераторі становить 540–680 °С і контролюється, оскільки занадто висока температура може дезактивувати каталізатор [101].



Рис. 2.23. Схематичне зображення процесу флюїдного каталітичного крекінгу

Основна проблема цієї технології полягає в тому, що каталізатор піддається впливу суворих умов реакції, дезактивує. За оцінками, термін служби частинок каталізатора ФКК становить приблизно один місяць, а зараз немає селективної технології для видалення лише дезактивованих частинок, тому всі частинки каталізатора видаляються через фіксовані проміжки часу [101].

Історично піроліз був комерціалізований у процесах, пов'язаних з деревним вугіллем, ТПВ та біомасою. У галузі переробки відходів піроліз змішаної пластмаси розвивався протягом останніх двох десятиліть, але лише зараз він став комерційною реальністю, оскільки кілька комерційних установок працюють, а протягом наступних кількох років очікується введення в експлуатацію багатьох інших промислових установок.

Газифікація – це процес, у якому змішані відходи нагрівають до дуже високої температури (~1000–1500 °С) у присутності обмеженої кількості кисню, що розщеплює молекули до найпростіших компонентів для отримання синтез-газу (суміш водню, оксиду вуглецю і трохи вуглекислого газу). Потім синтез-газ можна використовувати для виробництва різноманітних хімікатів (наприклад, метанолу, аміаку, вуглеводнів, оцтової кислоти) для виробництва пластмас, а також палива та добрив. Газифікація здебільшого зосереджена на змішаних полімерах.

Газифікація, як правило, здійснюється на більших технологічних установках, які призначені для досягнення ефекту масштабу. У разі піролізу такі установки зазвичай приймають змішаний вхідний потік відходів, що створює менший тиск на систему збору та сортування. Газифікація зазвичай вимагає попередньої обробки для видалення вологи та підвищення теплотворної здатності. Щоб задовольнити вимоги щодо застосування синтез-газу в хімічному виробництві, потрібна дуже ефективна система очищення газу при високій температурі процесу.

Вихідна сировина – це зазвичай всі пластики. Газифікація пластикових відходів призводить до виробництва синтетичного газу, потоку, що складається переважно з водню (H_2), оксиду вуглецю (CO), вуглекислого газу (CO_2), метану (CH_4) і азоту (N_2). Цей газ можна спалювати для отримання енергії або використовувати для виробництва нових вуглеводнів.

Газифікація змішаних відходів є досить поширеною технологією і застосовується вже давно. Газифікаційні установки споруджуються в більшому масштабі порівняно з піролізними пристроями. Основна причина цього полягає в різниці між процесами цих технологій. Газифікація передбачає термохімічний процес, в якому органічні матеріали перетворюються на газовий паливний продукт (синтез-газ) та золу. Такий синтез-газ може використовуватися для виробництва електроенергії або для виробництва різноманітних хімічних речовин.

Плазмова газифікація – це процес, у якому тепло забезпечується однією або кількома плазмовими дугами. Факели створюють електричну дугу та виробляють дуже високу температуру – до $15000\text{ }^\circ\text{C}$. Плазмовий газ дозволяє контролювати температуру незалежно від коливань властивостей і якості сировини, а також подачі газифікатора. Плазмові газифікатори забезпечують високу толерантність до низькоякісної сировини [102].

Плазмові газифікатори наступного покоління мають покращену конструкцію, яка враховує недоліки з попередніх проєктів, наприклад EcoValley. Компанія Alter NRG, яка купила Westinghouse Plasma Corporation, розробила та виробляє два стандартні реактори, приклад яких показано на рис. 2.24 [103].

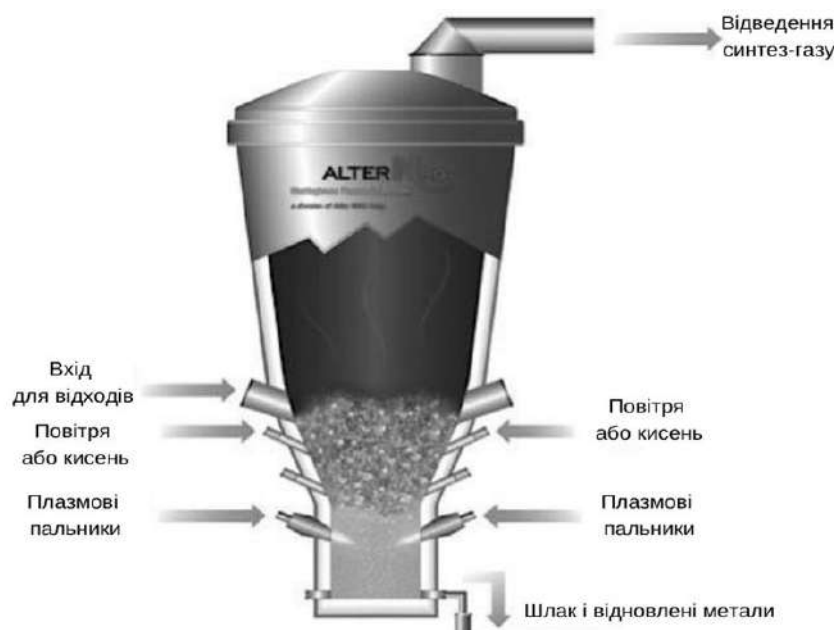


Рис. 2.24. Приклад реактора плазмової газифікації

Сьогодні плазмова газифікація в Європі не працює. У 2016 році розробник проекту Air Products прийняв рішення про закриття заводу. Це було пов'язано з технічними труднощами в забезпеченні правильної роботи установок. Інвестиційна вартість значно зросла, що зробило проект економічно недоцільним.

Ще один із способів, а саме, гідротермальна обробка (ГТО) передбачає проведення реакцій гідролізу. Гідроліз – це реакція, в якій сполука розщеплюється молекулами води в надкритичному стані. Як правило, умови температури та тиску в процесі становлять близько 160–240 °С з відповідним тиском, щоб підтримувати воду в рідкому стані. Особливі властивості води, що наближається до критичної температури та тиску, роблять її відмінним середовищем для розчинення органічних сполук. Крім того, цей спосіб є одним з прикладів практичного впровадження принципів «зеленої» хімії в технологіях переробки полімерних відходів. Основними реакціями ГТО є гідроліз, дегідратація, декарбоксілювання та деполімеризація. Гідротермальна обробка була використана для переробки відходів армованих вуглецевим волокном і друкованих плат у реакторі періодичної дії. На здатність «критичної» води розкладати смоли та пластмаси в композитних відходах значною мірою впливає наявність різних добавок та/або співрозчинників.

Основною сировиною в цьому процесі можуть бути використанні відходи пластикової упаковки (ПЕТФ) і вибрані пластики, а саме відходи пластику, армованого вуглецевим волокном, друкованих плат, полікарбонату, стирол-бутадієну, полі(молочної кислоти), нейлону 6, нейлону 66.

Технологія знаходиться на стадії розробки, комерційні операції плануються [104].

2.3.3. Хімічна деполімеризація відходів

Ще одним з видів хімічної переробки є деполімеризація (рис. 2.25), яка використовує хімічні речовини, розчинники та тепло для перетворення полімерів у менші молекули (мономери, або олігомери), які потім повертаються у процес виробництва пластику як вторинна сировина.

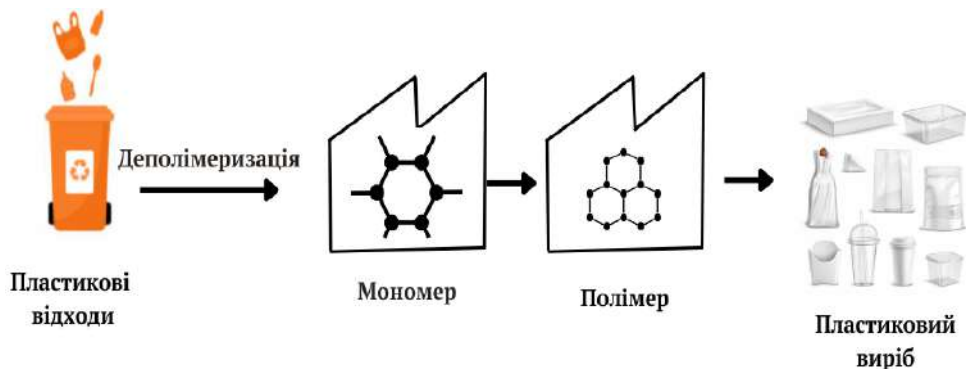


Рис. 2.25. Хімічна переробка полімерних відходів, шляхом деполімеризації хімічними реагентами

Процес переробки деполімеризацією починається з етапу, на якому пластикові відходи сортуються та готуються до подальшої обробки. Процес деполімеризації, який часто називають хемолізом або сольволізом, використовує різні агенти для розщеплення полімерів на мономери (олігомери). Мономери є основними ланками полімерів. На наступному етапі потенційні забруднення виділяють з мономерів. Потім мономери повертаються в звичайні процеси виробництва пластику як вторинна сировина. Пластмаси, виготовлені таким чином, мають таку ж якість, що й ті, що виготовляються з традиційних викопних ресурсів.

Існують різні типи хімічної деполімеризації залежно від типу задіяного хімічного агента: метаноліз, гліколіз, гідроліз, алкохоліз, аміноліз тощо [92]. Цей процес дає змогу отримувати мономери, які можна очистити шляхом фільтрації для отримання матеріалу первинної якості.

Таким чином, хемоліз відкриває можливості для різних промислових застосувань, де важливі чисті матеріали, наприклад, матеріали, що контактують з харчовими продуктами. Ця технологія може бути застосована лише до конденсаційних полімерів, таких як ПЕТФ та ПА і в основному підходить для однорідних пластикових відходів. Щоб отримати однорідний потік, змішані пластикові відходи можна відокремити та відсортувати за формою, щільністю, кольором, розміром або хімічним складом пластику. У хемолізі було виявлено кілька проблем, таких як відокремлення рідкого агента, розщеплення інших побічних продуктів, відновлення розчинених каталізаторів і мала площа контакту між агентом розщеплення та полімером.

На основі методу оцінки TRL [107] хемолізу можна присвоїти рівень 9, оскільки це комерційно доступна технологія. Гліколіз застосовують у комерційних масштабах відомі компанії, такі як DuPont/DOW, Goodyear, Shell Polyester, Zimmer і Eastman Kodak [88], а також Garbo, IBM, Ionica та PerPETual. Гідроліз також застосовувався в комерційних і пілотних масштабах такими компаніями, як Gr3n, Carbios і Aquafil, тоді як метаноліз застосовувався Loop Industries і в розробці Eastman.

Деполімеризацію пластмас за допомогою хімічних реагентів забезпечує висока конверсія до їх мономерів. Однак різні процеси та умови хімічної деполімеризації дають різний вихід мономерів. Наприклад, деполімеризація ПЕТФ може відновити 65–100 % мономеру залежно від процесу. Хемоліз ПУ може давати 70–95 % вихідного мономеру, ПС може досягати виходу 80–100 % і ПА – 78–90 % [93]. Етапи очищення зазвичай потрібні після процесу хемолізу, що збільшує виробничі витрати. Важливо звернути увагу на те, що мономери, отримані з хімічно перероблених полімерів, є дорожчими, ніж первинний матеріал через вартість сировини, капітальні інвестиції та масштаби виробництва.

Оцінка різних видів хемолізу полімерних відходів з точки зору технологічних, економічних та екологічних показників допоможе визначити найбільш оптимальні рішення для ефективної переробки відходів та збереження навколишнього середовища.

Технологічні показники будемо розглядати як:

– технологічна готовність (TRL) – рівень розвитку технології і готовність її до промислового застосування;

– типові параметри процесу – температура, тиск, час переробки, режим роботи устаткування та інші важливі фактори.

Економічні показники – це:

– вартість устаткування та інвестиційні витрати, запуск устаткування для конкретної технології;

– витрати на енергію;

– вартість вторинних продуктів – вартість отриманих продуктів після переробки, які можуть бути продані або використані.

Екологічні показники ґрунтуються на:

– викидах в атмосферу – гази або токсичні речовини викидаються під час процесу;

– стічних водах – якість води, яка викидається після переробки та її вплив на навколишнє середовище;

– використанні водних ресурсів.

Нижче наведено детальний аналіз за технологічними, економічними та екологічними показниками різних видів хемолізу полімерних відходів.

Узагальнююча характеристика процесу гліколізу

Технології

Вхідні потоки:

- підходить для полімерів поліконденсації, переважно використовується для ПЕТФ, ПА та ПУ;
- обробляє одноматеріальні потоки з відносно низьким рівнем забруднення;
- зазвичай необхідне попереднє сортування або попередня обробка.

Процес:

- вихідна сировина розчиняється в етиленгліколі;
- необхідна температура від 200 °С до 300 °С;
- реакція триває від 3 до 5 год;
- вихід деполімеризації становить від 93 % до 98 %.

Вихід:

- вихід загального ПЕТФ-гліколізу представляє біс(2-гідроксиетил)терефталат. Ця сполука може бути використана для виробництва нового ПЕТФ;
- вихід гліколізу ПА складається з гексаметилендіаміну, може бути використана для виробництва ПА6.6 знову. Однак адипінова кислота втрачається під час реакції і повинна бути додана для завершення деполімеризації;
- вихід гліколізу ПА6 складається з капролактаму. Ця сполука може бути використана для повторного виробництва ПА6;
- вихід ПУ – діольні суміші. Ця суміш може бути використана для виробництва нового поліуретану.

Майже в кожному випадку необхідні етапи очищення для видалення барвників і забруднень.

Отримана чистота близька до первинної смоли.

Можливість впровадження у виробництво

Середній рівень технологічної готовності:

- розрахунковий TRL = 3–7 (залежно від розробника технології);
- знаходиться на стадії розробки технологій, за винятком JEPLAN, який працює у промислових масштабах. PerPETual і JEPLAN є передовими розробниками технологій з точки зору розширення своїх технологій та/або потужності своїх установок (переважно з використанням прозорого ПЕТФ як вихідної сировини). Заплановані потужності коливаються від 10 до 160 т/рік.

Економічні показники

- високі витрати на попередню обробку через етапи сортування та знезараження;
- повторна обробка розчинника є додатковими витратами порівняно з механічною переробкою;
- обладнання повинно бути виготовлено з матеріалів, стійких до корозії;
- Біс(2-гідроксиетил)терефталат (та вищі олігомери), отримані в процесі гліколізу ПЕТФ, можна використовувати як основу для синтезу полімерів з вищою економічною цінністю (ненасичені полієфіри, пінополіуретан).

Екологічні показники

Гліколіз дозволяє уникнути використання метанолу, іноді в надкритичних умовах, який використовується в метанолізі, і обмежує вплив переробки на навколишнє середовище, оскільки сильні кислоти або основи, необхідні для гідролізу ПЕТФ, не використовуються.

Екологічні наслідки – менший вплив на навколишнє середовище, ніж спалювання, але сильніший, ніж при механічній переробці (якщо відсоток відмов нижче 10 %).

Енергетичні витрати – процес гліколізу споживає втричі більше енергії, ніж механічна переробка (частково через діапазон температур, необхідний для завершення процесу), але не зважаючи на це, майже в 2,5 рази краще, ніж виробництво первинних волокон.

Відсутність загальнодоступних даних щодо екологічної ефективності процесу.

Узагальнююча характеристика процесу метанолізу**Технології****Вхідні потоки:**

- підходить для поліконденсаційних полімерів і, в основному, для ПЕТФ;
- обробляє мономатеріальні потоки з відносно низьким рівнем забруднення (технічні вимоги циклу – більше 80 % вмісту ПЕТФ);
- необхідне попереднє сортування або попередня обробка.

Процес:

- вихідна сировина розчиняється в метанолі;
- необхідна температура коливається від 100 °С до 200 °С залежно від вихідної сировини, а тиск встановлюється приблизно на рівні 25 бар;
- реакція триває близько 5 год з каталізатором;
- у деяких випадках метаноліз можна проводити в надкритичних умовах. Час перебування становить приблизно 10 хв за відсутності каталізатора, а тиск, необхідний для цього процесу, становить приблизно 150 бар при температурі 300 °С.

Вихід:

- вихід метанолізу ПЕТФ складається з моноетиленгліколю і диметилтерефталату. Згодом ці мономері можна повторно полімеризувати в ПЕТФ;
- майже завжди необхідні етапи очищення для видалення барвників і забруднень;
- отримана чистота близька до первинної смоли.

Середній рівень технологічної готовності:

- розрахунковий TRL = 6–8;
- більшість розробників все ще знаходяться на стадії розробки технологій. Loop Industries планує свої перші промислові потужності. Eastman планував побудувати промисловий завод у Франції (160 тис. т/рік);
- виробництво на заводах зі значними масштабами – потужності варіюються від 40 до 160 т/рік.

Можливість впровадження у виробництво

Економічні показники

- потенційно високі витрати на попередню обробку через етапи сортування та дезактивації;
- повторна обробка розчинника є додатковими витратами порівняно з механічною переробкою;
- обладнання повинно бути виготовлено з матеріалів, стійких до корозії (оскільки використовується метанол).

Екологічні показники

Метанол, який використовується в процесі метанолізу, може мати негативний вплив на навколишнє середовище. Питання відновлення розчинника, яке може викликати занепокоєння з точки зору економічного чи екологічного впливу.

Екологічні наслідки – процес метанолізу викидає у 3 рази більше CO₂, порівняно з механічною переробкою, але краще, ніж виробництво чистого волокна.

Енергетичні витрати – процес метанолізу використовує майже в 4 рази більше енергії, ніж механічна переробка (частково через діапазон температур, необхідний для завершення процесу), але вдвічі менше, ніж виробництво первинного ПЕТФ для перетворення ПЕТФ-пляшок на волокна.

Узагальнююча характеристика процесу амінолізу

Технології

Вхідні потоки:

- більшість досліджень було проведено з використанням ПЕТ або ПУ піни як вихідної сировини;
- аміноліз використовує розчин аміну для руйнування зв'язків пластику;
- метиламін, етиламін і бутиламін – це аміни, які використовуються найчастіше.

Процес:

- відсутність доступних досліджень не дозволяє чітко визначити умови експлуатації (тиск, температура, час реакції тощо);
- процес не потребує високого тиску, а температура може коливатися від 20 °C до 100 °C.

Вихід:

- якщо використовується ПЕТФ як вхідний матеріал, отримані вихідні дані – мономери біс(2-гідроксиетил)терефталат аміну та етиленгліколь діаміни.
- обробка поліуретанової піни може призвести до погіршення якості продуктів;
- триетиламін забезпечив найвищий вихід продуктів поліфтетрафталат аміну та етиленгліколю при деградації ПЕТФ.

Середній рівень технологічної готовності:

- розрахунковий TRL = 2;
- незначна кількість наукових досліджень, що підтримують аміноліз;
- відсутність прогнозування майбутніх потужностей.
- висока вартість амінів;
- економічна невігідність як наслідок обмежених досліджень і відсутність промислового застосування.

Можливість впровадження у виробництво

Економічні показники

Екологічні показники

Узагальнююча характеристика процесу гідролізу

Технології

Вхідні потоки:

- підходить для поліконденсаційних полімерів, переважно використовується для ПЕТФ, ПА та ПУ;
- обробляє одноматеріальні потоки з відносно низьким рівнем забруднення від постпромислових або споживчих відходів;
- найчастіше необхідні попереднє сортування або попередня обробка.

Процес:

- сировину вміщують у воду в лужних, кислотних, нейтральних або докритичних/надкритичних умовах;
- для лужного гідролізу потрібні температури від 210 °С до 250 °С під тиском від 14 до 20 бар. Реакція може відбуватися з каталізаторами або без них і займає від 3 до 5 год у реакторі періодичної дії;
- кислотний гідроліз вимагає температур від 80 °С до 95 °С;
- для нейтрального гідролізу потрібні температури від 200 °С до 300 °С під тиском від 10 до 40 бар. Вихід отриманого терефталевої кислоти становить близько 95 %;
- субкритичний/надкритичний гідроліз вимагає температур від 150 °С до 400 °С під тиском від 220 до 240 бар. Час реакції становить ~30 хв для періодичного процесу. Вихід деполімеризації, отриманий у цьому процесі, становить приблизно 98 %.

Вихід:

- вихід ПЕТФ гідролізу складається з етиленгліколь та терефталева кислота. Ці дві основи, які необхідно повторно полімеризувати для отримання переробленого ПЕТФ;
- вихід ПА6 гідролізом складається з капролактаму, який необхідно повторно полімеризувати для отримання переробленого ПА6;
- майже в кожному випадку необхідні етапи очищення для видалення барвників і забруднень;
- отримана чистота близька до первинної смоли.

Середній рівень технологічної готовності:

- розрахунковий TRL = 3–4;
- більшість розробників технологій все ще знаходяться на стадії розробки технологій;
- технологія Gr3n є більш досконалою та має приблизно 6 TRL;
- технологія Aquafl має комерційний масштаб.

Поточні та майбутні потужності:

- Aquafl працює на двох заводах потужністю 40 000 і 16 000 т/рік;
- Gr3n завершив будівництво пілотного заводу (потужність невідома), який використовуватиметься як випробувальний центр для будівництва майбутніх промислових заводів (30 кт/рік).

Ці процеси мають відносно високу вартість, частково через значну вартість, необхідну для очищення терефталевої кислоти.

Gr3n провів оцінку життєвого циклу, що дало зниження CO₂ і спожитої енергії –60 % та –68 %, відповідно, порівняно з виробництвом первинного ПЕТФ. Ці цифри є лише орієнтовними.

Можливість продовження у виробництво

Економічні показники Екологічні показники

Екологічні наслідки - Aquafil стверджує, що виробництво сирого ПА6 з перероблених відходів ПА викидає 1,7 т CO₂ на 1 т продукції. За даними PlasticsEurope, виробництво первинного ПА6 в Європі викидає 6,7 т CO₂ на 1 т продукції.

Енергетичні витрати – понад 55 % викидів, що відносяться до гідролізу, спричинені споживанням енергії.

Узагальнююча характеристика процесу ферментативного гідролізу

Технології

Вхідні потоки:

- зосереджено на ПЕТФ;
- конкуренція з механічною переробкою, якщо вихідна сировина складається з пляшок (наприклад, Petrobras);
- обробляє одноматеріальні потоки з відносно низьким рівнем забруднення від постпромислових або споживчих відходів;
- заявлено, що складне сортування не потрібне, оскільки фермент націлений на ПЕТ-сировину.

Процес:

- сировина вміщується в розчин у присутності ферменту. Ферментативний процес біологічно розриває ланцюг на мономери, які після очищення можуть бути перероблені для повторного отримання ПЕТФ-полімеру;
- 97 % вихід деполімеризації, оголошений за 16-годинний процес.

Вихід:

- вихід гідролізу ПЕТ складається з етиленгліколю та терефталевої кислоти. Ці дві основи необхідно повторно полімеризувати для отримання переробленого ПЕТФ;
- заявлена чистота близька до первинної смоли.

Можливість впровадження у виробництво

Середній рівень технологічної готовності:

- розрахунковий TRL = 5;
- Carbios завершив будівництво демонстраційного заводу (потужність невідома). Промислове розгортання (40 тис. т/рік) заплановано на 2025 рік.

Економічні показники

Відсутність публічних даних.

Екологічні показники

Екологічні наслідки – відсутність публічних даних.

Енергетичні витрати – відсутність публічних даних.

Відповідно до різних умов та хімічних реагентів, які використовуються, хемоліз може давати різні продукти. Це можуть бути різноманітні хімічні сполуки, які можуть бути використані для виробництва нових матеріалів або хімічних продуктів.

У таблиці 2.1 узагальнено різні процеси хемолізу, отримані продукти та їхній вихід.

Згідно з оглядом літератури Datta & Korczyńska, аміноліз і метаноліз є звичайними процесами деполімеризації ПЕТ, а гідроліз часто використовується як для розкладання ПЕТ, так і для ПУ. Однак гліколіз було визначено як реакцію хемолізу, яка найкраще підходить для цих полімерів, оскільки вона дає високі виходи без потреби в дуже особливих умовах, таких як високий тиск, а технології, що використовують гліколіз, наразі є

найдосконалішими щодо демонстрації комерційної привабливості у більших масштабах (Barnard et al., 2021). Гліколіз також є типовим методом деполімеризації ПА (нейлону) та поліефірів. Метаноліз у суб- та надкритичних умовах є дуже ефективним способом деполімеризації РС.

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика видів хемолізу

Гідроліз	Гліколіз	Алкохоліз	Метаноліз	Аміноліз
Відходи ПЕТФ				
Продукти				
Терефталева кислота, натрій або калію терефталат, етиленгліколь	Дигідроксіетил-терефталат, диметил-терефталат, етиленгліколь	Діоктил-терефталат, етиленгліколь	Диметил-терефталат, етиленгліколь	Біс(2-гідроксіетил)-терефталат, амід, N, N'-диаліл-терефталатамід
Вихід, %				
70–100	85–99	95–100	65–90	75
Відходи ПУ				
Продукти				
Полііоли, аміномісткі проміжні продукти, діаміни	Полііоли ароматичні карбамати, сечовина, аміни	Полііол, амін	4,4'-метилен-дифенілкарбамат, аміни, диметиламін, бутандіол, тетрагідрофуран	Полііол, ароматичні аміни, диетиламін, метилендіамін
Вихід, %				
70–90	80–95	–	95	–
Відходи ПК				
Продукти				
Бісфенол, фенол	Моногідроксіетил ефір, бісгідроксіетил ефір, етилен карбонат	Бісфенол, диетилкарбонат	Бісфенол, диметилкарбонат, фенол, 4-бутилфенол	Бісфенол, диметилдиетиламін
Вихід, %				
80–100	50–80	90	90–95	Понад 80
Відходи ПА				
Продукти				
Капролактам, амінокапронова кислота	Гідроксіетилловий ефір, біс (гідроксіетил)-гексаноат, валеролактон	–	–	–
Вихід, %				
78–90	–	–	–	–

У загальному технології хімічної переробки покажемо на рис. 2.26.

З метою порівнянні різних способів хімічної переробки полімерних відходів проведено їх аналіз як за технологічними параметрами, так і за можливістю впровадження в промислових умовах.

У таблиці 2.2 наведено огляд комерційних і розроблених технологій хімічної переробки та типів полімерних відходів. Хоча деякі з цих технологій можуть працювати з широким спектром пластмас, інші можуть бути не настільки універсальними.

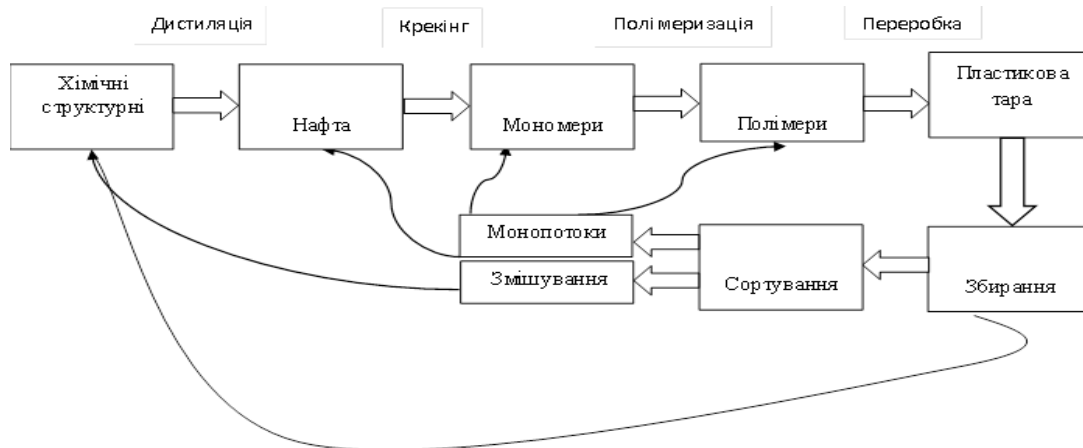


Рис. 2.26. Узагальнююча технологічна схеми хімічної переробки полімерних відходів

Таблиця 2.2

Технології хімічної переробки полімерів

Технологія	Масштаб роботи	Тип полімерних відходів	Рівень готовності технології (TRL)
Піроліз	Комерційний	ПЕВТ, ПЕНТ, ПП, ПММА, ПС, АБС, ПУ, змішаний ПЕ/ПП/ПС, армовані волокном композити, багатошарова пластикова упаковка	9
Каталітичний крекінг	Комерційний	ПЕВТ, ПЕНТ, ПП, ПС	9
Звичайна газифікація	Комерційний	Всі види пластмас, змішані пластики	9
Хемоліз	Комерційний	ПЕТФ, ПУ, ПС, ПА, ПЛА	9
Гідрокрекінг	Пілотний	Всі види пластмас, змішані пластики	7
Піроліз з in-line реформуванням	Пілотний	ПЕ, ПП, ПС, змішані пластики, (ПЕ/ПП/ПЕТФ)	4
Плазмовий піроліз	Лабораторний	Змішані пластики	4
Мікрохвильовий піроліз	Лабораторний	ПС/ПП суміші	4
Плазмова газифікація	Комерційний (розкладання небезпечних відходів)	Всі види пластмас, змішані	8

Переваги та недоліки кожної комерційно застосовуваної технології хімічної переробки [105]:

Переваги

Проста технологія.
Гнучкий процес.
Підходить для відходів пластику, які важко де полімеризувати.

Піроліз

Недоліки

Складність реакцій.
Висока потреба в енергії.
Низька толерантність до ПВХ.
Чутливість до забруднення вихідної сировини.
Часто потребує додаткової підготовки перед подальшим використанням.

Плазмовий піроліз

Переваги

Досить висока температура для розкладання токсичних сполук у газоподібні продукти – підходить для змішаних пластикових відходів.

Газ-продукт з низьким вмістом смол і високою теплотворною здатністю.

Обмежене утворення вільного хлору з HCl.

Недоліки

Висока потреба в електроенергії.

Мікрохвильовий піроліз

Переваги

Рівномірний розподіл тепла.

Підходить для обробки твердих побутових відходів.

Висока швидкість нагріву.

Більше контролю над процесом.

Збільшення швидкості виробництва.

Недоліки

Чутливий до великих коливань складу відходів.

Проблема ефективного використання діелектричних абсорбентів у промислових масштабах.

Вимагає великих обсягів сировини.

Каталітичний крекінг

Переваги

Порівняно з термічним крекінгом: нижча робоча температура і вищий вихід масла.

Коротший час реакції.

Можливе зниження витрат на виробництво.

Можливе зниження споживання енергії.

Продукт із подібними властивостями до вихідного палива.

Каталізатор допомагає оптимізувати розподіл продукту та вибірковість.

Можливе 100 % перетворення пластикових відходів.

Недоліки

Чутливий до забруднення вихідної сировини. Часто вимагає попередньої обробки.

Компоненти азоту та хлориду можуть деактивувати каталізатор.

Відсутність відповідної реакторної технології.

Наявність неорганічних компонентів може блокувати пори каталізатора.

Гідрокрекінг

Переваги

Продукт високої якості.

Недоліки

Висока вартість водню.

Можливість отруєння після гідрокрекінгу ПВХ.

Звичайна газифікація

Переваги

Можливий розпад полімеру: на водень і метан.

Багаторазове застосування газового продукту.

Підходить для змішаних пластикових відходів.

Відпрацьована технологія.

Газифікація чистого кисню генерує синтез-газ, майже вільний від атмосферного азоту.

Утворюється синтез-газ, вільний від азоту, який можна використовувати для синтезу і виробництва нових пластикових виробів.

Недоліки

Високі інвестиційні та експлуатаційні витрати.

Утворений газ потребує покращення якості перед його подальшим використанням.

Великі обсяги вихідної сировини для реалізації.

Смоли та вугілля в газоподібному продукті.

Витратність та енергоємність. Газифікація чистого кисню вимагає відділення кисню від повітря, що є дуже витратним.

Плазмова газифікація

Переваги

Можливе виробництво водню в результаті парової газифікації.
Більш висока чистота продукту газу, знижений рівень смол.
Висока толерантність до низькоякісної сировини.
Контроль температури незалежно від коливань властивостей сировини та її якості.

Недоліки

Високі інвестиційні та експлуатаційні витрати.
Дуже висока потреба в електроенергії.

Піроліз з *in-line* реформуванням

Переваги

Виробництво водню з процесу.
Отриманий газ без смол.
Домішки в пластикових відходах не контактують з каталізатором риформінгу.
У порівнянні зі звичайною газифікацією нижча температура процесу.
Нижча собівартість продукції.
Вихід водню вище, ніж при газифікації парою.

Недоліки

Питання дезактивації каталізатора потребує подальшого дослідження та вирішення.

Хемоліз

Переваги

Виробляє чисту продукцію з доданою вартістю.
Операційний для ПЕТФ.
Інтегровано в лінії виробництва полімерів.
Вимагає менших витрат енергії, ніж інші відомі процеси хімічної переробки, такі як піроліз і газифікація.

Недоліки

Вимагає великих обсягів, щоб бути рентабельним.
В основному підходить для конденсаційних полімерів (PET, PU, PC).
Підходить лише для однорідної пластмаси.
Перероблені полімери дорожчі, ніж первинні полімери.
Сприйнятливий до технологічних забруднень, таких як важкі метали.

Звичайний піроліз працює в найнижчому діапазоні температур порівняно з іншими оціненими технологіями. Чутливість до забруднення вихідної сировини є високою, і, якщо відходи містять ПВХ, у піролізній олії можуть утворюватися хлормісткі сполуки, що робить його використання складнішим. Піроліз призводить до помірного розпаду молекул і відносно низької якості кінцевого продукту, який потребує модернізації перед подальшим використанням. Через хімічні властивості різних компонентів піролітичної олії лише невелику частину можна використовувати для виробництва нового пластику. Таким чином, потенціал для отримання пластику первинної якості за допомогою цього процесу буде низьким.

Піроліз за допомогою мікрохвиль працює при більш високих температурах, ніж звичайний піроліз, і дозволяє більш детально розщеплювати полімер. Технологія чутлива до великих коливань у складі пластикових відходів, оскільки змішування діелектричного абсорбенту з різними пластиковими матеріалами може призвести до різної ефективності нагрівання та вплинути на співвідношення теплової потужності до введеної. Це впливає на швидкість процесу для різних матеріалів і робить процес складним.

Каталітичний крекінг дозволяє проектувати процес і контролювати температуру для отримання бажаного кінцевого продукту. Температура процесу порівнянна з температурою процесу термічного крекінгу. Технологія дуже чутлива до забруднення вихідної сировини, оскільки хлорид і азот у відходах можуть деактивувати каталізатор, а неорганічні матеріали блокують пори каталізаторів. Використання каталізатора дозволяє помірно розщеплювати полімер при зниженні температурних вимог. Як і у випадку термічного крекінгу, кінцевий продукт потребує модернізації перед подальшим використанням.

Каталітичний крекінг забезпечує помірне руйнування полімеру. Розпад полімеру в гідрокрекінгу відбувається в результаті використання водню в процесі.

Піроліз за допомогою мікрохвиль, звичайна газифікація та піроліз з поточним риформінгом працюють при вищих температурах процесу та середній чутливості до забруднення вихідної сировини.

Плазмові технології, плазмовий піроліз і плазмова газифікація працюють при найвищих температурах процесу та найнижчій чутливості до забруднення вихідної сировини.

Плазмові технології працюють при найвищих температурах серед усіх розглянутих технологій і можуть бути основою для отримання найдетальнішого розпаду молекул водню та оксиду вуглецю. Очікується, що ці технології забезпечать найвищий рівень якості відновлення перероблених пластикових відходів. Отриманий продукт не потребує модернізації перед використанням, але високі енерговитрати можуть зробити процес неможливим.

Гідрокрекінг здійснюється при низьких температурах. Використання водню в процесі дозволяє детально розщепити полімер. Технологія не може бути використана для ПВХ через ефект отруєння.

Піроліз з поточним риформінгом працює при температурах, нижчих за ті, що потрібні для звичайної газифікації, і дозволяє детально розщеплювати полімер. Каталізатор не має прямого контакту з будь-якими домішками в сировині, що запобігає його дезактивації. Це означає меншу чутливість до характеристик вихідної сировини, ніж у каталітичному або гідрокрекінгу.

Гідрокрекінг, мікрохвильовий піроліз і піроліз з поточним риформінгом не були випробувані в промислових масштабах для цілей управління відходами і необхідні подальші дослідження, перш ніж ці технології стануть привабливими.

Звичайна газифікація працює при вищих температурах і забезпечує більш детальний розпад, ніж термічний і каталітичний крекінг. Процес газифікації може підтримувати повторне використання пластикових матеріалів і використовується для виробництва проміжних хімічних речовин і різних пластмас, наприклад, на заводі Enerkem з переробки пластикових відходів на метанол/етанол у Канаді. Коли цей процес доведений до крайнього рівня, він може перетворити всю органіку в пластмасі на водень і чадний газ [27]. Отриманий продукт має високу чистоту з різними можливими застосуваннями. Під час газифікації небажані продукти, такі як смола та вугілля, утворюються в кількостях, які визначаються вмістом вихідної сировини. Більшість пластикових полімерів мають високий вміст летючих речовин, і їх газифікація призведе до утворення смоли та обуглення. Якість газу потрібно покращити, перш ніж його можна буде використовувати далі.

На основі зібраної інформації визначено TRL для різних технологій. Комерційно доступними технологіями з TRL 9 є піроліз, каталітичний крекінг, звичайна газифікація і хемоліз. Поточні проекти плазмової газифікації використовують технологію для постобробки, тобто для обробки небезпечних відходів, а також твердих залишків процесу газифікації, а не для обробки основного твердого залишку. Таким чином, вважається, що плазмова газифікація пластикових відходів має TRL 8. Технологія має потенціал незабаром стати комерційно доступною [105]. Гідрокрекінг має TRL 7, оскільки найбільшою

перешкодою для впровадження технології в промислових масштабах є вартість водню. Технологія доступна в пілотному масштабі та розроблена великими компаніями. Плазмовий піроліз, мікрохвильовий піроліз, піроліз з поточним риформінгом були класифіковані як TRL 4. Вони доступні в лабораторних масштабах, і необхідні подальші дослідження, перш ніж вони будуть доступні на ринку.

Основні технологічні параметри процесів хімічної переробки наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Основні параметри процесів в технологіях хімічної переробки полімерів

Технологія	Масштаб технології	Температура процесу, °C	Чутливість до якості вихідної сировини	Розпад полімеру (що впливає на вихід матеріалу)
Піроліз	Комерційний	300–700	Високий	Помірний
Плазмовий піроліз	Лабораторний	1800–10000	Низький	Дуже детальний
Мікрохвильовий піроліз	Лабораторний	До 1000	Середній	Детальний
Каталітичний крекінг	Комерційний	450–550	Високий	Помірний
Гідрокрекінг	Пілотний	375–500	Високий	Детальний
Звичайна газифікація	Комерційний	700–1200	Середній	Детальний
Плазмова газифікація	Комерційне розкладання небезпечних відходів	1200–15000	Низький	Дуже детальний
Піроліз з in-line реформуванням	Пілотний	500–900	Середній	Детальний
Хемоліз	Комерційний	210–250	Високий	Детальний

Як показано в таблиці 2.3, технології, які є найбільш поширеними комерційно, отримують різні продукти та побічні продукти, причому частина з них не сприяє циркулярній економіці. Піроліз, каталітичний крекінг і газифікація перетворюють пластикові відходи на паливо або енергію і, таким чином, не сприяють круговому використанню пластикових відходів. Хоча хемоліз є перспективним для відновлення пластмас, застосування цієї технології обмежується однорідними потоками пластикових відходів і конденсаційними полімерами. Більше того, вартість переробленого полімеру вища, ніж первинного, а процес вимагає великих обсягів відходів, щоб бути економічно ефективним. Отже, процеси хемолізу необхідно оптимізувати та зробити їх економічно життєздатними, щоб сприяти розвитку циклічної економіки.

Переваги хімічної переробки

1. Переробляє пластикові відходи, які завжди було важко переробити. Хімічна переробка дозволяє переробляти забруднені та змішані полімерні потоки відходів, які непридатні для механічної переробки. Проте більшість технологій хімічної переробки мають свої межі. Хімічна деполімеризація, наприклад, може бути застосована лише до «конденсаційних» полімерів, таких як ПЕТФ і ПА. Однак піроліз розкладає такі полімери, як ПЕ, ПП, ПВХ які складають більшість потоків пластикових відходів. Піролізні заводи не можуть переробляти ПЕФТ, оскільки він містить кисень. Таким чином, піроліз ідеально доповнює механічну переробку, яка в основному використовується для ПЕТФ-пляшки.

2. Виробляє пластик такої ж якості, як і первинна сировина. За допомогою хімічної переробки пластикові відходи розщеплюються та переробляються на нові хімічні речо-

вини та пластик, які працюють як первинні матеріали. Таким чином, отриманий пластик можна повторно використовувати у високоякісних продуктах, наприклад, для упаковки харчових продуктів.

3. Зменшує використання викопних ресурсів. Оскільки хімічно перероблений пластик можна повторно використовувати як сировину для виробництва нового пластику, потрібно менше видобутих викопних ресурсів.

4. Скорочує викиди CO₂. Хімічна переробка може усунути викиди, пов'язані зі спалюванням та відновленням енергії.

Таким чином, хімічна переробка є додатковим рішенням для традиційної механічної переробки, оскільки її можна використовувати для переробки більшої кількості пластикових відходів, які наразі непридатні для механічної переробки. Крім того, хімічна переробка долає деякі проблеми якості, з якими стикається механічна переробка, оскільки вона може виробляти основні хімічні речовини, необхідні для створення високоякісної харчової упаковки (ця якість досягається в основному механічною переробкою ПЕТФ). Таким чином, він усуває проблеми, пов'язані із запахом, кольором/форматом, обмеженою функціональністю (з точки зору застосування) та якістю переробленого вмісту. Цей підхід може дозволити використовувати полімер місткі відходи в більш широкому спектрі виробництва і виробляти різноманітні хімічні продукти.

Розділ 3.

Механічна та хімічна переробка полімермістких відходів

3.1. Структурна модель недеформованих полімерів

Розробка обладнання для переробки полімерних відходів вимагає створення структурної моделі полімеру, яка дозволяє простежити за змінами фізико-механічних властивостей полімеру під впливом напружено-деформованого стану, що створюється робочими органами перероблювального обладнання.

Пропонуємо полімерний матеріал розглядати у вигляді певної композитної структури, що складається з кристалічних та аморфних надмолекулярних утворень. Використання різноманітних методів досліджень суцільного анізотропного середовища дозволить якісно та кількісно описати процес зміни фізико-механічних характеристик певного полімерного матеріалу під дією механічного та температурного полів, що генеруються перероблювальним обладнанням.

З роботи [106] відомо, що полімер руйнується в першу чергу по границях структурних утворень, тому спочатку розглянемо будову надмолекулярної структури полімеру.

Аналіз підходів до питання про організацію макроструктури полімеру [107] та врахування того факту, що більшість полімерних виробів легкої промисловості отримують литтям під тиском (58 % від усіх виробів), дозволяє сформулювати уявлення про будову полімерних матеріалів.

Наявність великої кількості різних надмолекулярних утворень, що виникають залежно від різних умов отримання і переробки полімерів, не дозволяє сьогодні описати в рамках однієї моделі механічні властивості полімерів. Звідси основна ідея нашої роботи – модельна фіксація надмолекулярної структури полімеру, що змінюється при деформації.

Без сумніву, найбільш зручним об'єктом для вивчення структурних перетворень, що відбуваються у полімерах при їх деформації, є монокристали (див. рис. 3.1, *а*). Однак основним і найбільш поширеним структурним утворенням сьогодні є полімер сферолітної будови (див. рис. 3.1, *б*).

Структурна модель сферолітної будови полімеру (рис. 3.1, *б*) складається з двох взаємопов'язаних моделей, що описують два стани надмолекулярної структури полімерів: до деформації – модель неорієнтованої сферолітної структури; після деформації – модель орієнтованої сферолітної структури полімеру.

Розглянемо структурну модель стану полімеру до його деформації – модель неорієнтованої сферолітної структури полімеру. Структура неорієнтованого полімеру сферолітної будови відображає стан полімерного матеріалу, отриманого в результаті його формування в прес-формі.

У процесі лиття під тиском полімерних виробів [108–111] з метою уникнення утворення усадки після заповнення прес-форми, виріб деякий час необхідно підживлювати полімером, у результаті цього ступінь орієнтації структури полімерного матеріалу знижується.

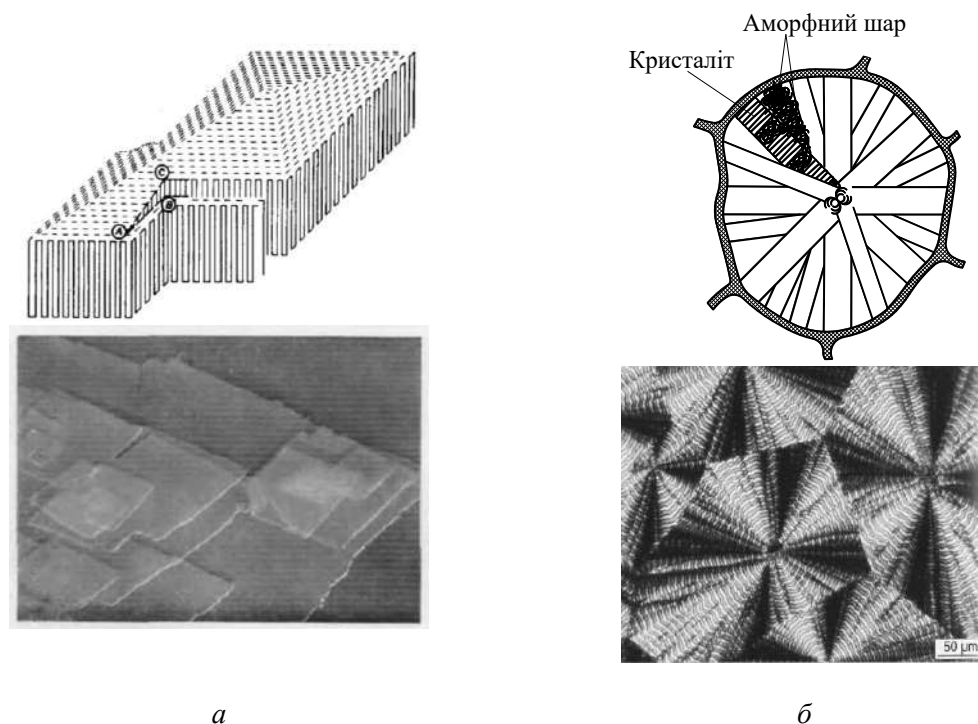


Рис. 3.1. Структурна модель будови полімерного матеріалу:
a – монокристал; *б* – сфероліт

Отже, всі полімерні вироби легкої промисловості, що були отримані литтям під тиском, мають неорієнтовану структуру. Тому, для можливості повторного використання полімерних відходів легкої промисловості, необхідно певним чином змінити їх структуру. Моделювання зміни структури неорієнтованого полімерного матеріалу під впливом механічного і температурного полів представлено в наступних підрозділах.

Модель сферолітної структури полімеру може бути представлена як необмежене в'язкопружне ізотропне середовище [112, 113], що складається зі сферолітної структури, поміщеної в однорідну аморфну матрицю. При побудові моделі були прийняті такі припущення: сфероліти мають однакову форму (сферичну) та розміри; сфероліти розташовані в кутах просторової решітки; все кристалічне середовище полімеру зосереджене у сферолітах (рис. 3.2).

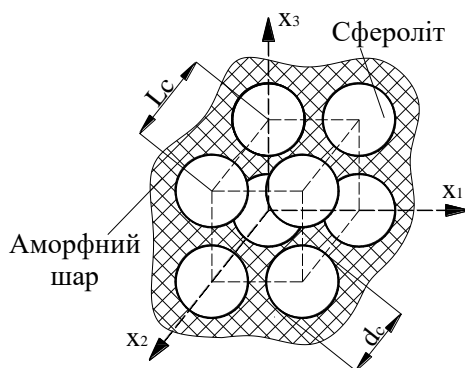


Рис. 3.2. Модель сферолітної структури полімерного матеріалу

Для побудови теорії ефективних модулів сферолітної структури в першому наближенні першорядного значення набувають: визначення відносного об'ємного наповнення середовища сферолітами ξ , розмірів сферолітів, що мають форму сфери діаметром d_c ; вид упаковки μ і циклічна симетрія в його структурі.

Як характеристику, що визначає ймовірний тип просторової решітки, а також форму і тип сферолітів, будемо використовувати показник ступеня об'ємної кристалічності полімерного матеріалу [112–114]:

$$\chi = \frac{\rho - \rho_a}{\rho_c - \rho_a}, \quad (3.1)$$

де ρ – щільність зразка; ρ_a , ρ_c – відповідно, щільність аморфної та кристалічної фази полімеру (можуть бути визначені за допомогою рентгеноструктурного аналізу).

Враховуючи припущення, що вся кристалічна частина полімеру зосереджена у сферолітах, які складаються з ламелярних кристалічних областей, що чергуються, і між-ламелярних аморфних прошарків (див. рис. 3.1, б) [115, 116], можна припустити, що ступінь об'ємної кристалічності χ зв'язаний з відносним об'ємом наповнення середовища сферолітами ξ та коефіцієнтом компактності просторової решітки μ [9]:

$$\xi = \chi^2 = k^2 \cdot \mu, \quad (3.2)$$

де $k = d_c / L_c$ – коефіцієнт щільності упаковки матеріалу сферолітами ($0 \leq k \leq 1$); L_c – відстань між центрами сферолітів.

Коефіцієнт компактності просторової решітки, в кутах якої розташовані сфероліти, визначається її видом. Так, вираз $\mu = \pi / 6$ – відповідає найпростішій кубічній решітці; $\mu = \pi / 3$ – об'ємноцентрованої кубічній решітці; $\mu = 2\pi / 3$ – гранецентрованої кубічній решітці; $\mu = \sqrt{2}\pi / 6$ – гексагональній структурі кубічної решітки.

Зрозуміло, що найбільш щільній упаковці сфер, радіусом $d_c / 2$, а отже граничному заповненню просторової решітки, відповідає така структура, коли сфери дотикаються одна до іншої, тобто при $d_c = L_c$. В такому випадку $k = 1$, а $\xi = \chi^2 = \mu$.

Завданням нашого моделювання сферолітної надмолекулярної структури полімерного матеріалу є визначення ступеня впливу фізико-механічних властивостей полімеру і його напружено-деформованого стану на вид просторової решітки і форму та розміри сферолітів, що дасть змогу прогнозувати зміну форми просторової решітки, в кутах якої розташовані сфероліти, та форму і розміри самих сферолітів при будь-якій деформації полімеру сферолітної будови.

Отримані в результаті побудови моделі закономірності впливу в'язкопружних постійних на форму і розміри сферолітів та на вид їх взаємного розташування можна буде використати при побудові моделі сферолітної структури, що формується в процесі витягування полімерів.

Враховуючи викладене, розглянемо напружено-деформований стан сферичної кристалічної фази, що знаходиться в ізотропному необмеженому аморфному середовищі, яке піддається розтягу вздовж вісі x_3 (див. рис. 3.3).

Припустивши, що аморфна та кристалічна область полімеру є ізотропним середовищем, а також, що сфероліти упаковані в гексагональну решітку і між ними діють невідомі однорідні напруження взаємодії, будемо вирішувати задачу в криволінійній

системі координат (q^1, q^2, q^3) , що пов'язана з міжфазною границею середовища, а початок координат розташований у центрі сфероліту.

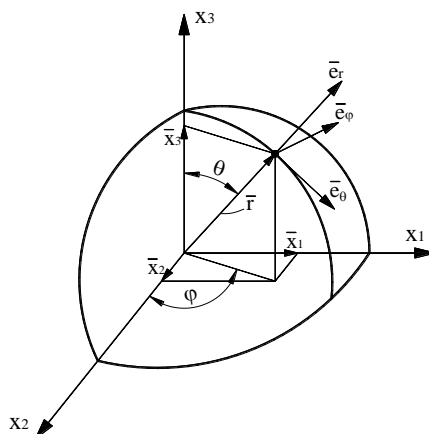


Рис. 3.3. Схема напружено-деформованого стану сфероліту в структурі полімеру

Як відомо з [117], вектори основного локального базису криволінійної системи координат визначають за формулою:

$$\vec{e}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial q^i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.3)$$

i є дотичними до координатних ліній q^i , що проходять через точку $\vec{r} = \vec{r}(q^1, q^2, q^3)$. Координати q^1, q^2, q^3 однозначно визначають вектор \vec{r} в криволінійній системі координат, а координати x_1, x_2, x_3 однозначно визначають цей вектор в декартовій системі координат (див. рис. 3.3). Декартові координати x_i та криволінійні q^i можуть мати різну розмірність, тобто компоненти базису криволінійної та декартової системи координат можуть бути різними.

Для врахування цього необхідно визначити довжини відповідних векторів локального основного базису криволінійної системи координат:

$$H_v = \sqrt{\left(\frac{\partial x_1}{\partial q^v}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial q^v}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_3}{\partial q^v}\right)^2}, \quad v = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

i розділити на них ці вектори, тобто:

$$\vec{e}_{(v)} = \frac{\vec{e}_v}{H_v}. \quad (3.5)$$

Локальний базис з одиничних векторів $\vec{e}_{(v)}$ у науковій літературі називають «фізичним» базисом, а його використання є досить зручним при розв'язуванні фізичних задач. Тоді, положення вектора \vec{r} однозначно будуть визначати сферичні координати r, θ, ϕ . З рис. 3.2 визначимо декартові координати x_1, x_2, x_3 вектора \vec{r} через сферичні координати r, θ, ϕ :

$$x_1 = r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad x_2 = r \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi, \quad x_3 = r \cdot \cos \theta, \quad (3.6)$$

при цьому $0 \leq r < \infty$, $0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

Використовуючи рівняння (3.3) та вирази (3.6), розкладемо одиничні вектори сферичної системи координат за ортами декартової системи координат:

$$\begin{aligned} \vec{e}_r &= \sin \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + \sin \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 + \cos \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\theta &= r \cdot \cos \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + r \cdot \cos \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 - r \sin \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\varphi &= r \cdot \sin \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_1 - r \cdot \sin \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_2 + 0 \cdot \vec{e}_3. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Приведемо розмірність компонентів базису криволінійної системи координат до розмірності вектора \vec{r} (або до розмірності базису декартових координат), тобто до 1. Для цього розділимо одиничні вектори сферичної системи координат на їх довжини (параметри Ламе H_v ($v=1,2,3$)), що визначаються з рівняння (3.4). В результаті систему (3.7) перепишемо таким чином:

$$\begin{aligned} \vec{e}_{(r)} &= \sin \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + \sin \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 + \cos \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_{(\theta)} &= \cos \theta \sin \varphi \cdot \vec{e}_1 + \cos \theta \cos \varphi \cdot \vec{e}_2 - \sin \theta \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_{(\varphi)} &= \cos \varphi \cdot \vec{e}_1 - \sin \varphi \cdot \vec{e}_2 + 0 \cdot \vec{e}_3, \end{aligned} \quad (3.8)$$

де $e_{(v)}$ ($v=1,2,3$) – приведений або «фізичний» базис. В подальшому дужки, що стоять біля індексу, будемо опускати.

Отже, ортогональну матрицю переходу від декартового базису до сферичного запишемо таким чином:

$$\begin{aligned} \vec{e}_r &= a_{11} \cdot \vec{e}_1 + a_{12} \cdot \vec{e}_2 + a_{13} \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\theta &= a_{21} \cdot \vec{e}_1 + a_{22} \cdot \vec{e}_2 + a_{23} \cdot \vec{e}_3, \\ \vec{e}_\varphi &= a_{31} \cdot \vec{e}_1 + a_{32} \cdot \vec{e}_2 + a_{33} \cdot \vec{e}_3, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де a_{ij} – компоненти ортогональної матриці переходу від декартового базису до сферичного:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sin \theta \sin \varphi, & a_{12} &= \sin \theta \cos \varphi, & a_{13} &= \cos \theta, \\ a_{21} &= \cos \theta \sin \varphi, & a_{22} &= \cos \theta \cos \varphi, & a_{23} &= -\sin \theta, \\ a_{31} &= \cos \varphi, & a_{32} &= -\sin \varphi, & a_{33} &= 0. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Зворотне перетворення здійснюється за такими рівняннями:

$$\begin{aligned} \vec{e}_1 &= a_{11} \cdot \vec{e}_r + a_{21} \cdot \vec{e}_\theta + a_{31} \cdot \vec{e}_\varphi, \\ \vec{e}_2 &= a_{12} \cdot \vec{e}_r + a_{22} \cdot \vec{e}_\theta + a_{32} \cdot \vec{e}_\varphi, \\ \vec{e}_3 &= a_{13} \cdot \vec{e}_r + a_{23} \cdot \vec{e}_\theta + a_{33} \cdot \vec{e}_\varphi. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Для визначення пружних властивостей (модуля пружності та коефіцієнта Пуассона) в напрямку осі витягування полімеру (осі x_3) розглянемо випадок повздовжнього

розтягу неорієнтованої сферолітної будови. Під час розтягу в сфероліті виникає напружений стан, що згідно з діадним представленням [118], можна описати таким чином:

$$\mathbf{T} = \vec{e}_x \vec{e}_x \sigma_{xx} + \vec{e}_y \vec{e}_y \sigma_{yy} + \vec{e}_z \vec{e}_z \sigma_{zz} + (\vec{e}_x \vec{e}_y + \vec{e}_y \vec{e}_x) \cdot \sigma_{xy} + (\vec{e}_y \vec{e}_z + \vec{e}_z \vec{e}_y) \cdot \sigma_{yz} + (\vec{e}_z \vec{e}_x + \vec{e}_x \vec{e}_z) \cdot \sigma_{zx}, \quad (3.12)$$

де $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – одиничні орти декартової системи координат; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ – нормальні напруження, що діють на площадках, перпендикулярних до відповідних осей системи координат; $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$ – тангенціальні (дотичні) напруження, що діють на тих самих площадках.

Зорієнтуємо осі координат таким чином, щоб на площадках елементарного об'єму, обмеженого сферичною поверхнею, тангенціальні напруження були відсутні. Тоді рівняння (3.12) переписеться таким чином:

$$\mathbf{T} = \vec{e}_1 \vec{e}_1 \sigma_1 + \vec{e}_2 \vec{e}_2 \sigma_2 + \vec{e}_3 \vec{e}_3 \sigma_3, \quad (3.13)$$

де $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ – одиничні орти декартової системи координат x_1, x_2, x_3 ; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – напруження на головних площадках, перпендикулярних до відповідних осей системи координат x_1, x_2, x_3 .

Представимо кожне головне напруження як добуток середнього напруження $\hat{\sigma}_3$, що діє на сфероліт вздовж осі x_3 , та невідомих постійних σ^0 , що характеризують рівень напружень однорідної взаємодії і рівень напружень на головних площадках:

$$\mathbf{T}^c = (\vec{e}_1 \vec{e}_1 \sigma_1^0 + \vec{e}_2 \vec{e}_2 \sigma_2^0 + \vec{e}_3 \vec{e}_3 \sigma_3^0) \hat{\sigma}_3, \quad (3.14)$$

Напруження однорідної взаємодії між сферолітами виникають в результаті зміни напружено-деформованого стану сферолітів.

У сферичних координатах (3.6) тензор напружень (3.14) можна виразити таким чином [9]:

$$\mathbf{T}^c = (\vec{e}_r \vec{e}_r \sigma_r^0 + \vec{e}_\theta \vec{e}_\theta \sigma_\theta^0 + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\varphi \sigma_\varphi^0 + (\vec{e}_r \vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta \vec{e}_r) \cdot \sigma_{r\theta}^0) \hat{\sigma}_3, \quad (3.15)$$

Невідомі постійні σ^0 у сферичних координатах виразимо через декартові координати підстановкою виразів (3.11) у рівняння (3.14):

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^c = & \left[\vec{e}_r \vec{e}_r (a_{11}^2 \sigma_1^0 + a_{12}^2 \sigma_2^0 + a_{13}^2 \sigma_3^0) + \vec{e}_\theta \vec{e}_\theta (a_{21}^2 \sigma_1^0 + a_{22}^2 \sigma_2^0 + a_{23}^2 \sigma_3^0) + \right. \\ & + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\varphi (a_{31}^2 \sigma_1^0 + a_{32}^2 \sigma_2^0 + a_{33}^2 \sigma_3^0) + (\vec{e}_r \vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta \vec{e}_r) \cdot (a_{11} a_{21} \sigma_1^0 + a_{12} a_{22} \sigma_2^0 + a_{13} a_{23} \sigma_3^0) + \\ & + (\vec{e}_r \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_r) \cdot (a_{11} a_{31} \sigma_1^0 + a_{12} a_{32} \sigma_2^0 + a_{13} a_{33} \sigma_3^0) + \\ & \left. + (\vec{e}_\theta \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\theta) \cdot (a_{21} a_{31} \sigma_1^0 + a_{22} a_{32} \sigma_2^0 + a_{23} a_{33} \sigma_3^0) \right] \cdot \hat{\sigma}_3. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Раніше було зроблено припущення, що сфероліти утворюють гексагональну просторову решітку. В мікроструктурі, що відповідає гексагональній упаковці, пружні властивості не залежать від обраного напрямку (ϵ ізотропними), тому в прийнятому набли-

женні спрямуємо вісь x_3 так, щоб напружений стан сферолітів не залежав від кута φ . У цьому випадку прийемо, що кут $\varphi = 0$, і з врахуванням виразів (3.10) отримаємо:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^c = & \left[\bar{e}_r \bar{e}_r (a_{23}^2 \sigma_2^0 + a_{22}^2 \sigma_3^0) + \bar{e}_\theta \bar{e}_\theta (a_{22}^2 \sigma_2^0 + a_{23}^2 \sigma_3^0) + \right. \\ & \left. + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\varphi \sigma_1^0 + (\bar{e}_r \bar{e}_\theta + \bar{e}_\theta \bar{e}_r) \cdot (\sigma_3^0 - \sigma_2^0) \cdot a_{22} a_{23} \right] \cdot \hat{\sigma}_3. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Порівнявши отриманий вираз (3.17) з рівнянням (3.15) визначимо невідомі компоненти тензора напружень сфероліту:

$$\begin{aligned} \sigma_r^c &= (a_{23}^2 \sigma_2^0 + a_{22}^2 \sigma_3^0) \cdot \hat{\sigma}_3, \\ \sigma_\theta^c &= (a_{22}^2 \sigma_2^0 + a_{23}^2 \sigma_3^0) \cdot \hat{\sigma}_3 \\ \sigma_\phi^c &= \sigma_1^0 \cdot \hat{\sigma}_3, \\ \sigma_{r\theta}^c &= (\sigma_3^0 - \sigma_2^0) \cdot a_{22} a_{23} \cdot \hat{\sigma}_3. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Відповідно до розв'язку задачі теорії пружності про осесиметричний напружено-деформований стан сфери, невідомі компоненти тензора напружень сфероліту визначимо наступним чином:

$$\begin{aligned} \sigma_r^c &= -2 \cdot E_c \cdot A_0 - \frac{2 \cdot E_c}{1 + \nu_c} \cdot (3 \cdot A_2 \cdot \nu_c \cdot r^2 - B_2) \cdot P_2(\cos \theta), \\ \sigma_{r\theta}^c &= \left(\frac{E_c}{1 + \nu_c} \cdot (A_2 \cdot (2\nu_c + 7) \cdot r^2 + B_2) \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \\ \sigma_\theta^c &= -2E_c \cdot A_0 - \frac{2E_c}{1 + \nu_c} (3A_2 \cdot r^2 (7 + \nu_c) + 2B_2) \cdot P_2(\cos \theta) - \\ & - \frac{E_c}{1 + \nu_c} (A_2 \cdot r^2 (7 - 4\nu_c) + B_2) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta, \\ \sigma_\phi^c &= -2E_c \cdot A_0 - \frac{E_c}{1 + \nu_c} (30 \cdot A_2 \cdot \nu_c \cdot r^2 - 2B_2) \cdot P_2(\cos \theta) + \\ & + \frac{E_c}{1 + \nu_c} (A_2 \cdot r^2 (7 - 4\nu_c) + B_2) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta. \end{aligned} \quad (3.19)$$

де E_c – модуль пружності сфероліту; ν_c – коефіцієнт Пуассона сфероліту; $P_0(\cos \theta)$, $P_1(\cos \theta)$, $P_2(\cos \theta)$ – поліноми Лежандра першого роду нульового, першого та другого порядку, відповідно; A_0 , A_1 , A_2 , B_2 – невідомі постійні, які знаходяться з граничних умов; r – радіус-вектор точки об'єму сфероліту.

Компоненти вектора переміщень для сфероліта виразимо в сферичній системі координат:

$$\mathbf{u}^c = \bar{e}_r u_r^c + \bar{e}_\theta u_\theta^c + \bar{e}_\varphi u_\varphi^c. \quad (3.20)$$

Невідомі компоненти вектора переміщень сфероліту визначимо наступним чином:

$$\begin{aligned}
u_r^c &= A_0 \cdot r \cdot (-2)(1-2\nu_c) \cdot P_0(\cos\theta) + (A_1 \cdot r^2 \cdot 2 \cdot (-1+4\nu_c) + B_1) \cdot P_1(\cos\theta) + \\
&+ (A_2 \cdot r^3 \cdot 3 \cdot 4\nu_c + 2B_2 \cdot r) \cdot P_2(\cos\theta) = -2 \cdot (1-2\nu_c) \cdot A_0 \cdot r + 2 \cdot (A_2 \cdot r^3 \cdot 6\nu_c + B_2 \cdot r) \cdot P_2(\cos\theta), \\
u_\theta^c &= (A_0 \cdot r \cdot (5-4\nu_c) + B_0 \cdot r^{-1}) \cdot \frac{dP_0(\cos\theta)}{d\theta} + (A_1 \cdot r^2 \cdot (6-4\nu_c) + B_1) \cdot \frac{dP_1(\cos\theta)}{d\theta} + \\
&+ (A_2 \cdot r^3 \cdot (7-4\nu_c) + B_2 \cdot r) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} = (A_2 \cdot r^3 \cdot (7-4\nu_c) + B_2 \cdot r) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta}, \quad u_\phi^c = 0.
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Згідно з [119], компоненти напруження в кожній точці аморфної області полімерного матеріалу можна представити таким чином:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^a &= \frac{1}{3} \cdot Q + \frac{2 \cdot E_a}{1+\nu_a} \cdot \frac{D_0}{r^3} + \left(\frac{2 \cdot E_a}{1+\nu_a} \cdot \left(\frac{6 \cdot D_2}{r^5} - \frac{C_2}{r^3} \cdot (10-2\nu_a) \right) + \frac{2}{3} \cdot Q \right) \cdot P_2(\cos\theta), \\
\sigma_{r\theta}^a &= \left(\frac{2 \cdot E_a}{r^3} \cdot C_2 - \frac{4 \cdot E_a}{1+\nu_a} \cdot \frac{D_2}{r^5} + \frac{1}{3} Q \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta}, \\
\sigma_\theta^a &= \frac{2}{3} Q - \frac{E_a}{1+\nu_a} \frac{D_0}{r^3} - \left(\frac{2E_a}{1+\nu_a} \frac{C_2}{r^3} (1-2\nu_a) - \frac{9E_a}{1+\nu_a} \frac{D_2}{r^5} - \frac{2}{3} Q \right) \cdot P_2(\cos\theta) - \\
&- \left(2E_a \cdot \frac{C_2}{r^3} \cdot \frac{1-2\nu_a}{1+\nu_a} + \frac{E_a}{1+\nu_a} \cdot \frac{D_2}{r^5} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \cdot \text{ctg}\theta, \\
\sigma_\phi^a &= -\frac{E_a}{1+\nu_a} \frac{D_0}{r^3} + \frac{E_a}{1+\nu_a} \left(\frac{C_2}{r^3} (10-20\nu_a) - \frac{3D_2}{r^5} \right) \cdot P_2(\cos\theta) + \\
&+ \frac{E_a}{1+\nu_a} \left(\frac{C_2}{r^3} \cdot (2-4\nu_a) + \frac{D_2}{r^5} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \cdot \text{ctg}\theta, \\
\sigma_r^a &= \frac{1}{3} \cdot Q + \frac{2 \cdot E_a}{1+\nu_a} \cdot \frac{D_0}{r^3} + \left(\frac{2 \cdot E_a}{1+\nu_a} \cdot \left(\frac{6 \cdot D_2}{r^5} - \frac{C_2}{r^3} \cdot (10-2\nu_a) \right) + \frac{2}{3} \cdot Q \right) \cdot P_2(\cos\theta), \\
\sigma_{r\theta}^a &= \left(\frac{2 \cdot E_a}{r^3} \cdot C_2 - \frac{4 \cdot E_a}{1+\nu_a} \cdot \frac{D_2}{r^5} + \frac{1}{3} Q \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta}, \\
\sigma_\theta^a &= \frac{2}{3} Q - \frac{E_a}{1+\nu_a} \frac{D_0}{r^3} - \left(\frac{2E_a}{1+\nu_a} \frac{C_2}{r^3} (1-2\nu_a) - \frac{9E_a}{1+\nu_a} \frac{D_2}{r^5} - \frac{2}{3} Q \right) \cdot P_2(\cos\theta) - \\
&- \left(2E_a \cdot \frac{C_2}{r^3} \cdot \frac{1-2\nu_a}{1+\nu_a} + \frac{E_a}{1+\nu_a} \cdot \frac{D_2}{r^5} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \cdot \text{ctg}\theta, \\
\sigma_\phi^a &= -\frac{E_a}{1+\nu_a} \frac{D_0}{r^3} + \frac{E_a}{1+\nu_a} \left(\frac{C_2}{r^3} (10-20\nu_a) - \frac{3D_2}{r^5} \right) \cdot P_2(\cos\theta) + \\
&+ \frac{E_a}{1+\nu_a} \left(\frac{C_2}{r^3} \cdot (2-4\nu_a) + \frac{D_2}{r^5} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \cdot \text{ctg}\theta.
\end{aligned} \tag{3.22}$$

де E_a – модуль пружності аморфної матриці; ν_a – коефіцієнт Пуассона аморфної матриці; Q – однорідне напруження взаємодії сферолітів; $P_0(\cos \theta)$, $P_2(\cos \theta)$ – поліноми Лежандра першого роду нульового та другого порядку; D_0 , D_2 , C_2 – невідомі постійні, які знаходяться з граничних умов; r – радіус-вектор точки об'єму сфероліту.

Із системи рівнянь (3.22) видно, що напруження, що виникають в певній точці аморфної матриці, зменшуються з віддаленням від початку системи координат. Це пояснюється тим, що деформуючись сфероліт здійснює певний вплив на аморфну фазу полімеру, яка складається з прохідних мікрофібрил, що з'єднують сфероліти. І чим більша відстань від сфероліту до точки аморфної фази полімеру, тим менший вплив на неї здійснює деформація цього сфероліту.

Компоненти вектора переміщення для аморфної фази представимо так:

$$\mathbf{u}^a = \bar{\mathbf{e}}_r u_r^a + \bar{\mathbf{e}}_\theta u_\theta^a + \bar{\mathbf{e}}_\phi u_\phi^a. \quad (3.23)$$

Компоненти переміщення в кожній точці аморфної фази полімерного матеріалу можна представити таким чином:

$$u_r^a = \frac{1-2\nu_a}{E_a} \cdot \frac{Q \cdot r}{3} - \frac{D_0}{r^2} + \left(\frac{C_2}{r^2} \cdot (10-8\nu_a) + \frac{2(1+\nu_a)}{E_a} \cdot \frac{Q \cdot r}{3} - \frac{3D_2}{r^4} \right) \cdot P_2(\cos \theta),$$

$$u_\theta^a = \left((1-2\nu_a) \cdot \frac{2C_2}{r^2} + \frac{1+\nu_a}{E_a} \cdot \frac{Q \cdot r}{3} + \frac{D_2}{r^4} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \quad (3.24)$$

$$u_\phi^a = 0.$$

Невідомі постійні A_0 , A_2 , B_2 , D_0 , D_2 , C_2 можна визначити з умов ідеального контакту поверхонь сфероліту та аморфної матриці, що мають місце у випадку дотику сферолітів, тобто при:

$$r = L_c / 2 = a, \quad (3.25)$$

$$u_\theta^a = u_\theta^c; u_r^a = u_r^c; \sigma_r^a = \sigma_r^c; \sigma_\theta^a = \sigma_\theta^c; \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^c. \quad (3.26)$$

Таким чином, вирішуючи системи рівнянь (3.21) – (3.24) можна визначити поле напружень та деформацій сферолітів в будь-який момент часу при одноосьовому витягуванні полімерного матеріалу.

У рівняння систем (3.22) та (3.24) входить однорідне напруження взаємодії сферолітів Q , якого немає в рівняннях систем (3.21) та (3.23). Це пояснюється тим, що сфероліти здійснюють вплив один на інший через аморфну фазу, що їх оточує. В результаті чого в аморфній матриці виникає додаткове напруження, що викликане взаємодією між сферолітами, через вплив на полімерний матеріал певного навантаження.

В результаті проведеного теоретичного дослідження було отримано математичну модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури, за допомогою якої можна розраховувати поля напружень та деформацій в будь-якій точці сфероліту. Це дозволить визначити необхідні деформації полімерного матеріалу, які необхідно створювати перероблювальним обладнанням для забезпечення заданої довжини витягнення сферолітів, що є надзвичайно важливим при вторинній переробці відходів полімерних матеріалів для виготовлення готових виробів.

У подальшому передбачається проведення експериментальних досліджень впливу витягу полімерного матеріалу сферолітної будови на його експлуатаційні властивості.

3.2. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей недеформованих полімерів

На основі розробленої математичної моделі, беручи до уваги [118], визначили в'язкопружні властивості полімерів сферолітної будови, дослідили вплив деформації полімерного матеріалу на деформацію сферолітів, що є важливим при проектуванні перероблювального обладнання. Так, знаючи значення деформації полімеру, яке сприятиме витягненню сферолітів на необхідну довжину, можна спроектувати перероблювальний пристрій, що забезпечить необхідні зусилля та напрямки їх дії для початку процесу руйнування полімерного матеріалу. Задовольняючи умови ідеального контакту [112] і прирівнюючи коефіцієнти при поліномах Лежандра, отримаємо вирази для невідомих постійних A_0, A, B, C, D_0, D через однорідне напруження взаємодії Q .

Підставивши значення коефіцієнтів у рівняння для визначення компонент напруження в кожній точці кристалічної та аморфної фази полімерного матеріалу [3], отримаємо рішення крайової задачі одноосового розтягування ізотропного необмеженого аморфного середовища, що містить сфероліт. У результаті матимемо такі вирази компонентів вектора переміщень \mathbf{u} і тензора напружень \mathbf{T}_σ :

– для сфероліту:

$$\sigma_r^c = E_c \cdot Q \cdot \left(\frac{1 - \nu_a}{E_c(1 + \nu_a) + E_a(1 - 2\nu_c)} + \frac{10(1 - \nu_a^2)}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \cdot P_2(\cos \theta) \right),$$

$$\sigma_{r\theta}^c = E_c \cdot Q \cdot \left(\frac{5(1 - \nu_a^2)}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \right) \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta},$$

$$\sigma_\theta^c = E_c \cdot Q \cdot \left(\frac{1 - \nu_a}{E_c(1 + \nu_a) + E_a(1 - 2\nu_c)} - \frac{5(1 - \nu_a^2)}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \right) \times \left(4P_2(\cos \theta) + \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta \right), \quad (3.27)$$

$$\sigma_\phi^c = E_c \cdot Q \cdot \left(\frac{1 - \nu_a}{E_c(1 + \nu_a) + E_a(1 - 2\nu_c)} + \frac{5(1 - \nu_a^2)}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \right) \times \left(2P_2(\cos \theta) + \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta \right),$$

$$u_r^c = Q \cdot r \cdot (1 - \nu_a) \left(\frac{1 - 2\nu_c}{E_c(1 + \nu_a) + E_a(1 - 2\nu_c)} + \frac{10(1 + \nu_a)(1 + \nu_c)}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \cdot P_2(\cos \theta) \right),$$

$$u_\theta^c = Q \cdot r \cdot \frac{5(1 - \nu_a^2)(1 + \nu_c)}{E_c(1 + \nu_a)(8 - 10\nu_a) + E_a(7 - 5\nu_a)(1 + \nu_c)} \cdot \frac{dP_2(\cos \theta)}{d\theta}, \quad (3.28)$$

$$u_\phi^c = 0;$$

– для аморфної матриці:

$$\begin{aligned}\sigma_r^a &= Q \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} r \left(\frac{E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{3} + \frac{E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \cdot \left(\frac{5}{3}(10-2\nu_a) - 12 \right) \right) \cdot P_2(\cos\theta) \right), \\ \sigma_\varphi^a &= -Q \cdot \left(\frac{E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)}{3[E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)]} - \frac{E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[\left(\frac{25}{3}(1-2\nu_a) + 3 \right) \cdot P_2(\cos\theta) - \left(\frac{5}{3}(1-2\nu_a) + 1 \right) \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \operatorname{ctg}\theta \right] \right),\end{aligned}\quad (3.29)$$

$$\begin{aligned}\sigma_\theta^a &= Q \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3} P_2(\cos\theta) - \frac{E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)}, \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{113}{12} P_2(\cos\theta) - \frac{8}{3} \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \operatorname{ctg}\theta \right) \right),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{r\theta}^a &= Q \cdot \left[\frac{1}{3} \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} - \frac{E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c)}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \times \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{5}{6}(1+\nu_a) - 4 \right) \cdot \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta} \right].\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}u_r^a &= Q \cdot r \cdot \left[\frac{1-2\nu_a}{3E_a} - \frac{(1+\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{3 \cdot r \cdot E_a(E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c))} + \frac{2(1+\nu_a)}{3E_a} \cdot P_2(\cos\theta) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_a(E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c))} \cdot \left(\frac{5}{6}(1-8\nu_a) - 3 \right) P_2(\cos\theta) \right], \\ u_\theta^a &= Q \cdot r \cdot \left[\frac{1+2\nu_a}{3E_a} - \frac{(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_a(E_c(8-10\nu_a)(1+\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c))} \left(\frac{5}{3}(1-2\nu_a) + 1 \right) \right] \times \\ &\quad \times \frac{dP_2(\cos\theta)}{d\theta},\end{aligned}\quad (3.30)$$

$$u_\varphi^a = 0.$$

Для визначення напруження однорідної взаємодії Q скористаємося методом послідовної регуляризації, що дозволяє виразити потенційну енергію пружної деформації U через поверхневий інтеграл:

$$U = \frac{1}{2V} \sum_{k=1} \int_{V_k} \sigma_{ik} \cdot \varepsilon_{ik} \cdot dV = \frac{1}{2V} \sum_{S_0} \int \sigma_{in} \cdot u_i \cdot df_n, \quad (3.31)$$

де df_n – елемент з нормаллю n до поверхні, що обмежує об'єм V ; σ_{in} , u_i – компоненти тензора напруження \mathbf{T}_σ і вектора переміщень \mathbf{u} , що діють на поверхні S_0 .

Використовуючи перше представлення пружної енергії через середні значення напружень $\bar{\sigma}_1$ і деформацій $\bar{\varepsilon}_1$:

$$U = \frac{1}{2} \bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\varepsilon}_1 \quad (3.32)$$

і виразивши компоненти вектора переміщень \mathbf{u}^a у сферичній системі координат через середні значення деформації $\bar{\varepsilon}_1$, знайдемо пружний потенціал для аморфно-кристалічного тіла сферолітного будови:

$$\frac{1}{2V} \iint_{(S)} \left[\sigma_r^a \bar{\varepsilon}_1 r (\cos^2 \theta - \nu_a \sin^2 \theta) - \sigma_{r\theta}^a \bar{\varepsilon}_1 r (1 + \nu_a) \sin \theta \cos \theta \right] r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \frac{1}{2} \bar{\sigma}_1 \bar{\varepsilon}_1. \quad (3.33)$$

Підставивши в отриманий вираз значення напружень σ_r^a та $\sigma_{r\theta}^a$ з рівняння (3.29), проінтегрувавши по ϕ на інтервалі $0 \leq \phi \leq 2\pi$ і по θ – на інтервалі $0 \leq \theta \leq \pi$ (звівши тим самим елементарну комірку до концентричної зі сферолітом радіусом r), визначимо однорідне напруження взаємодії Q між сферолітами через задані середні напруження розтягу $\bar{\sigma}_1$:

$$Q = \frac{\bar{\sigma}_1}{1 + \frac{2}{3} \chi^2 \left(\frac{(1-2\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} + \frac{(7-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)}. \quad (3.34)$$

Компоненти тензора напружень \mathbf{T}_σ і вектора переміщень \mathbf{u} можуть бути знайдені з рівнянь (3.27), (3.29) та (3.28), (3.30) при підстановці в них значення однорідного напруження взаємодії з виразу (3.34). Компоненти тензора деформацій \mathbf{T}_ε отримаємо з таких рівнянь:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_\phi = \frac{u_\theta}{r} \operatorname{ctg} \theta + \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}; \quad \varepsilon_{\theta\phi} = \varepsilon_{\phi r} = 0. \quad (3.35)$$

Для визначення модуля пружності аморфно-кристалічного середовища сферолітної будови E замінимо праву частину рівняння (3.33) другим представленням енергії [158], а напруження σ_r^a та $\sigma_{r\theta}^a$ в підінтегральній функції – середніми значеннями напружень $\bar{\sigma}_1$:

$$\sigma_r^a = \bar{\sigma}_1 \cos^2 \theta, \quad \tau_{r\theta}^a = -\bar{\sigma}_1 \sin \theta \cos \theta$$

в результаті отримаємо

$$U = \frac{\bar{\sigma}_1}{2V} \iint_{(S)} \left(u_r^a \cos^2 \theta - u_{r\theta}^a \sin \theta \cos \theta \right) r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\bar{\sigma}_1^2}{2E}. \quad (3.36)$$

Підставляючи в (3.36) значення переміщень u_r^a та u_θ^a з (3.34), значення напружень однорідної взаємодії Q і розв'язуючи вираз (3.36) відносно E , знайдемо модуль пружності аморфно-кристалічного середовища сферолітної будови:

$$E = E_a \frac{1 + \frac{2}{3}\chi^2 \left(\frac{(1-2\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} + \frac{(7-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)}{1 - \frac{1}{3}\chi^2 \left(\frac{(1+\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} - \frac{4(4-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)}. \quad (3.37)$$

Пружні властивості будь-якого ізотропного матеріалу обумовлені двома незалежними константами. Другу постійну – модуль об'ємної пружності E_V визначимо, розглядаючи рівномірне всебічне розтягування ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tilde{\sigma}$) аморфно-кристалічного ізотропного середовища сферолітної будови. Повторюючи викладені міркування, отримаємо вирази для напруження, яке характеризує

– однорідну взаємодію між сферолітами \tilde{Q} :

$$\tilde{Q} = \frac{(1-2\nu_c)(1+\nu_a)[E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)]}{E_c(1+\nu_a) + 2\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + 2E_a(1-\chi^2)(1-2\nu_c)}; \quad (3.38)$$

– модуль об'ємної пружності E_V :

$$E_V = E_a \frac{E_c(1+\nu_a) + 2\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + 2E_a(1-\chi^2)(1-2\nu_c)}{3[E_c(1-\chi^2)(1-2\nu_a)(1+\nu_a) + \chi^2 E_a(1+\nu_a)(1-2\nu_c) + 2E_a(1-2\nu_a)(1-2\nu_c)]}. \quad (3.39)$$

Ефективні постійні E_V та E дозволяють визначити інші пружні константи аморфно-кристалічного полімеру (коефіцієнт Пуассона ν і модуль зсуву G):

$$\nu = \frac{3E_V - E}{6E_V}; \quad G = \frac{3E_V E}{9E_V - E}. \quad (3.40)$$

Вирази (3.37), (3.39), (3.40) дозволяють прогнозувати фізико-механічні властивості полімерних матеріалів залежно від ступеня кристалічності і вимагають у першому наближенні знання фізико-механічних властивостей аморфної фази E_a , ν_a і сферолітів E_c , ν_c .

Якщо в'язкопружні константи різних полімерів в аморфному стані можуть бути виміряні або взяті з довідникової літератури, то використання модуля пружності кристалічної решітки полімерів як константи кристалічної фази, як це зроблено в більшості робіт [120–124], на нашу думку, є не зовсім коректним. По-перше, це пов'язано зі складною будовою сферолітів, які є третім, після кристалітів і ламелей, рівнем НМС, і в якому і кристаліти, і ламелі, маючи різну орієнтацію в просторі, з'єднані між собою аморфними прошарками, що не дозволяє розглядати сфероліти та інші структурні утворення як єдині кристалічні морфози. По-друге, в деяких роботах, наприклад [112, 117], встановлено, що сфероліти навіть при високих кінцевих деформаціях деформуються з полімером як єдине ціле (рис. 3.4) [125], витягаючись у напрямку навантаження і лише незначно відстаючи від деформації зразка.

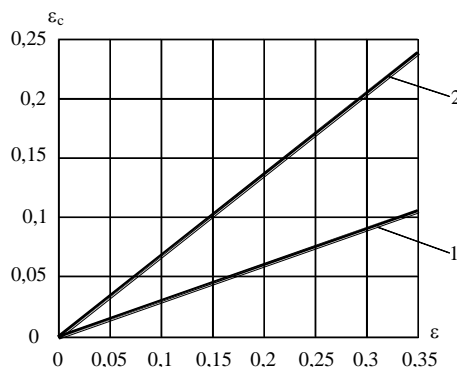


Рис. 3.4. Залежності деформації сферолітів ε_c від деформації ε поліпропіленової (крива 1) і поліетиленової (крива 2) плівки при температурі $T = 20^\circ\text{C}$

При співвідношенні між пружними постійними кристалітів E_k і аморфної фази E_a , що дорівнює для поліетилену $\sim 5 \cdot 10^3$ ($E_k/E_a = 250 \cdot 10^3 / 0,05 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^3$) [6, 10], таке явище не спостерігається. Як пружні константи для сферолітів E_c запропоновано використовувати значення пружних постійних, визначених з рівнянь (3.37), (3.39), (3.40) при ступені кристалічності χ_{\max} , що відповідає максимально можливій для такого полімеру, у разі припущення про ідеальну будову сферолітів, тобто при підстановці в (3.37) величини E_k замість E_c . Отримане значення модуля пружності E можна використовувати в подальшому як модуль пружності сферолітів E_c при прогнозуванні пружних властивостей.

Перевірка описаної моделі проведена на поліетилені і поліетилентерефталаті, які є представниками високо- та середньокристалічних полімерів. На рис. 3.5 представлені залежності в'язкопружного модуля поліетилену (криві 1 та 3, шкала значень В) і поліетилентерефталату (криві 2 та 4, шкала значень А) від ступеня кристалічності χ . Криві 1 і 2 отримані в цій роботі при використанні E_c , ν_c як результатів першого наближення ($E_c = E$). Вихідні дані при побудові кривих 1 та 2: для поліетилену $E_c = 1020$ МПа, $\nu_c = 0,2$, $E_a = 77$ МПа, $\nu_a = 0,39$; для поліетилентерефталату $E_c = 8240$ МПа, $\nu_c = 0,2$, $E_a = 2000$ МПа, $\nu_a = 0,39$.

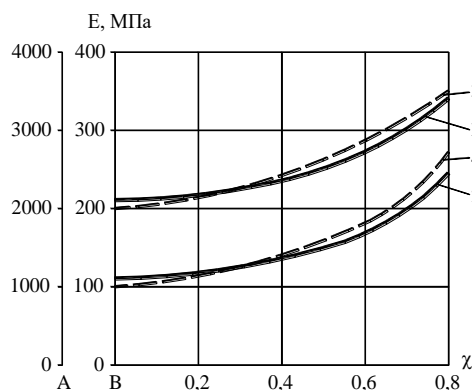


Рис. 3.5. Залежності в'язкопружного модуля E поліетилену (криві 1, 3; шкала значень В) і поліетилентерефталату (криві 2, 4; шкала значень А) від ступеня кристалічності: 1, 2 – дані, отримані в цій роботі; 3, 4 – експериментальні дані, отримані в роботі [125]

Аналіз наведених на рис. 3.5 даних показав задовільний збіг прогнозованих та вимірних значень модуля Юнга; найбільший розкид значень не перевищує 15 % для поліетилентерефталату та 12 % – для поліетилену.

Пружні постійні E_V та E , які отримані в результаті побудови моделі, що беруться як вихідні дані, можуть використовуватися при побудові моделі надмолекулярної структури аморфно-кристалічного полімеру, що формується в процесі його розтягу.

3.3. Структурна модель орієнтованого полімеру

Процес переходу з неорієнтованого стану кристалічних полімерів до орієнтованого є невід'ємною стадією переробки полімерних відходів. Зміну фізико-механічних властивостей полімерів у процесі деформації розтягу можна пов'язати з кінцевою деформацією основних рівнів надмолекулярної структури. Аналітичне вирішення цієї задачі слід знаходити методом послідовного врахування взаємодії різних рівнів надмолекулярної структури полімеру шляхом встановлення функціональної залежності фізико-механічних властивостей матеріалу від зміни надмолекулярної структури при деформації полімерного матеріалу. В результаті аналізу [126], встановлено, що в неорієнтованому стані полімерів сферолітної будови можна виділити два основних рівні надмолекулярної структури полімеру – сфероліти, що мають гетерогенну кристалічну структуру, і аморфну фазу, що має однорідну невпорядковану структуру. В роботі [118] запропоновано модель неорієнтованої структури полімеру сферолітної будови, що задовільно пов'язує показники фізико-механічних властивостей полімерного матеріалу зі зміною його структури при деформації.

Наявні моделі структури полімерів не враховують особливості будови надмолекулярної структури полімерів, взаємозв'язок між аморфними і кристалічними компонентами і не дозволяють кількісно описувати структурні зміни, що відбуваються в процесі деформації полімеру.

Для визначення раціональних конструктивних та технологічних параметрів обладнання для переробки полімерних відходів легкої промисловості, при яких забезпечуються потрібна фракція та структура переробленого полімеру, а також мінімальні витрати енергії, необхідно створити структурну модель орієнтованого стану полімерів, на основі якої розробити метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою структурою залежно від напрямку і виду деформації.

Прийнявши як вихідну модель (рис. 3.6) і врахувавши характеристики структурних елементів [127] – сферолітів і аморфної області, а також їх внутрішню будову, нехтуючи дисипативними явищами в цих елементах, у першому наближенні розіб'ємо весь процес витягування полімеру на скінченну кількість станів з фіксованим ступенем деформації сферолітів. Було встановлено [118], що при ступені витягування, що відповідає природньому, зберігається прямий генетичний зв'язок між вихідним сферолітним порядком і орієнтаційним. При цьому зі збільшенням ступеня витягування, збільшується ступінь сплюсненості сферолітів, тобто вони змінюють сферичну форму, стаючи витягнутими в напрямку орієнтації. Наведені факти є основою для гіпотези про існування кількісного зв'язку між параметрами витягування сферолітів і фізико-механічними властивостями полімерів у кожному зі згаданих станів.

Розглянемо модель неорієнтованого стану сферолітної структури [128], яка піддається одноосовій орієнтації зі ступенем витягування λ . На рис. 3.6 представлено модель перетворення вихідної неорієнтованої сферолітної структури на орієнтовану. Врахувавши той факт, що зміна форми сферолітів у результаті орієнтаційного витягування відбува-

ється однорідно в напрямку осі x_1 і при незмінному об'ємі сферолітів ($\rho_c = \text{const}$), будемо моделювати орієнтаційну витяжку як рівномірне стиснення (розтягнення) простору з коефіцієнтом η , чисельно рівним ступеню витяжки полімеру $\eta = \lambda$. При цьому фактично відбувається рівномірне стиснення (розтягнення) сфероліту в напрямку від площини $x_2 O x_3$, прийнятої за основну (рис. 3.6).

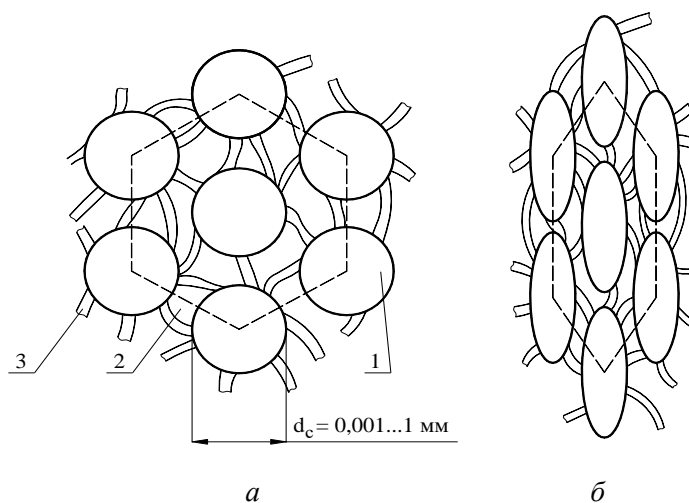


Рис. 3.6. Модель сферолітної структури полімерів у неорієнтованому (а) і орієнтованому (б) стані: 1 – аморфна область; 2 – сфероліти (кристалічна область); 3 – прохідні фібрили

Формули перетворення координат з урахуванням незмінності об'єму сфероліту матимуть вигляд $x_1^* = \lambda x_1$, $x_2^* = x_3^* = \lambda^{-1/2} x_2$. При цьому можуть мати місце два випадки:

- 1) при $\lambda > 1$ має місце одноосьове розтягнення простору (отримання волокон і плівок методом витяжки);
- 2) при $\lambda < 1$ – одноосьовий стиск простору (отримання листів і плівок методом прокатки або каландруванням).

Рівняння сфероліту радіусом r_c ($x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = r_c^2$), що піддається рівномірному розтягуванню з коефіцієнтом витяжки λ , в результаті підстановки формул перетворення координат і приведення його до канонічного вигляду набуде вигляду:

$$\frac{(x_1^*)^2}{\lambda^2 r_c^2} + \lambda \frac{(x_2^*)^2 + (x_3^*)^2}{r_c^2} = 1. \quad (3.41)$$

Вираз (3.41) представляє собою рівняння еліпсоїда обертання (сфероїда).

Слід мати на увазі, що якщо $\lambda > 1$, то сфероліт має форму витягнутого в напрямку осі x_1 еліпсоїда обертання, а якщо $\lambda < 1$ – він стиснутий в цьому ж напрямку. Таким чином, при одноосній орієнтації відбувається перетворення форми сферолітів зі сферичної в еліпсоїдальну, що задовільно узгоджується з результатами електронно-мікроскопічних і дифрактометричних досліджень. Зміна форми сферолітів, як буде показано нижче, в процесі витягування сприяє виникненню загальної анізотропії полімерного середовища при ізотропності елементів надмолекулярної структури (сферолітів і аморфної області).

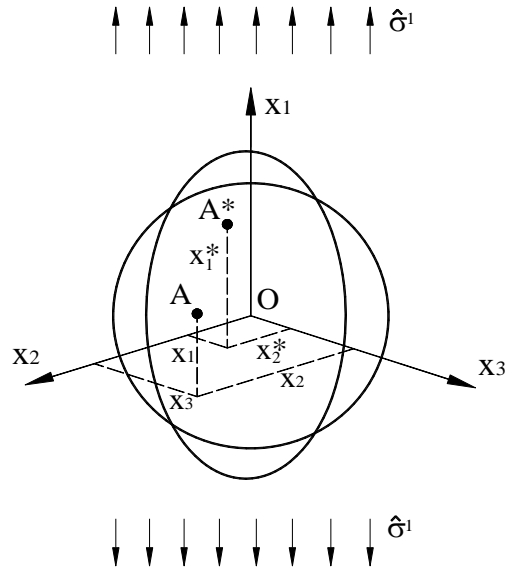


Рис. 3.7. Модель витягування полімеру сферолітної будови

В'язкопружні постійні орієнтованого полімеру будемо визначати, виходячи з позицій мікромеханіки композитних матеріалів [119] із залученням як декартової, так і криволінійної систем вироджених еліпсоїдальних координат r , θ , φ , взаємозв'язок між якими (рис. 3.7) визначається такими виразами:

$$\begin{aligned} x_1 &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} \operatorname{ch} r \cdot \cos \theta, \\ x_2 + i x_3 &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} \operatorname{sh} r \cdot \sin \theta e^{i\varphi}. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Коефіцієнти Ламе системи (3.42) виражені такими рівняннями:

$$\begin{aligned} H_r^2 &= H_\theta^2 = r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta), \\ H_\varphi^2 &= r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \cdot \operatorname{sh}^2 r \cdot \sin^2 \theta. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Першу квадратичну форму елемента довжини дуги ds знаходимо з такого виразу:

$$ds^2 = r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \left[(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta) (dr^2 + d\theta^2) + \operatorname{sh}^2 r \sin^2 \theta d\varphi^2 \right]. \quad (3.44)$$

Одиничні вектори криволінійної \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_θ , \mathbf{e}_φ та декартової \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 , \mathbf{e}_3 систем координат зв'язані такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_r &= a_{11} \cdot \mathbf{e}_1 + a_{12} \cdot \mathbf{e}_2 + a_{13} \cdot \mathbf{e}_3, \\ \mathbf{e}_\theta &= a_{21} \cdot \mathbf{e}_1 + a_{22} \cdot \mathbf{e}_2 + a_{23} \cdot \mathbf{e}_3, \\ \mathbf{e}_\varphi &= a_{31} \cdot \mathbf{e}_1 + a_{32} \cdot \mathbf{e}_2 + a_{33} \cdot \mathbf{e}_3, \end{aligned} \quad (3.45)$$

де

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \frac{shr \cos \theta}{\sqrt{sh^2 r + \sin^2 \theta}}; & a_{21} &= -\frac{chr \sin \theta}{\sqrt{sh^2 r + \sin^2 \theta}}; \\
a_{12} &= \frac{chr \sin \theta \cos \varphi}{\sqrt{sh^2 r + \sin^2 \theta}}; & a_{22} &= \frac{shr \cos \theta \cos \varphi}{\sqrt{sh^2 r + \sin^2 \theta}}; \\
a_{13} &= \frac{chr \sin \theta \sin \varphi}{\sqrt{sh^2 r + \sin^2 \theta}}; & a_{23} &= \frac{shr \cos \theta \sin \varphi}{\sqrt{sh^2 r + \sin^2 \theta}}; \\
a_{31} &= 0; & a_{32} &= -\sin \varphi; & a_{33} &= \cos \varphi.
\end{aligned} \tag{3.46}$$

Зворотне перетворення здійснюється за такими рівняннями:

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}_1 &= a_{11} \cdot \mathbf{e}_r + a_{21} \cdot \mathbf{e}_\theta + a_{31} \cdot \mathbf{e}_\varphi, \\
\mathbf{e}_2 &= a_{12} \cdot \mathbf{e}_r + a_{22} \cdot \mathbf{e}_\theta + a_{32} \cdot \mathbf{e}_\varphi, \\
\mathbf{e}_3 &= a_{13} \cdot \mathbf{e}_r + a_{23} \cdot \mathbf{e}_\theta + a_{33} \cdot \mathbf{e}_\varphi.
\end{aligned} \tag{3.47}$$

Для визначення в'язкопружних постійних загальний напружений стан представимо як суперпозицію елементарних напружених станів – поздовжнього і двовимірного поперечного розтягування, поздовжнього розтягування і повздовжнього зсуву. Детальний розгляд деформації сферолітної структури дозволяє виявити два типи деформації надмолекулярної структури при витягуванні: однорідної і неоднорідної. Однорідний характер деформації сферолітної структури відповідає сфероліту, всі частини якого розтягуються одночасно і пропорційно. Виходячи з цього, робимо висновок, що при дії однорідних напружень в полімерному середовищі напруження в сфероліті є також однорідними і однотипними, тобто нормальні і дотичні напруження в сфероліті на головних площадках не змішуються між собою. Для міжсферолітного простору характерна наявність як однорідної, так і неоднорідної деформації, що свідчить про розсіяння механічної енергії витягування в основному в міжсферолітному просторі. Таким чином, в межах лінійної теорії можна прийняти, що між елементами надмолекулярної структури діють невідомі напруження взаємодії між сферолітами α_1^0 .

Для визначення модуля пружності E_1 в напрямку осі витяжки x_1 розглянемо випадок повздовжнього розтягу полімерного матеріалу сферолітної будови на безмежності напруженнями $\hat{\sigma}_1 \alpha_1^0$. При цьому в сфероліті (рис. 3.7) виникає напружений стан:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_1^c + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 \alpha_2^c + \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3 \alpha_3^c) \hat{\sigma}_1, \tag{3.48}$$

де α_1^c , α_2^c , α_3^c – невідомі постійні, що характеризують рівень структурних напружень в сфероліті на головних площадках; $\hat{\sigma}_1$ – середнє напруження розтягу, що діє на сфероліти та аморфне середовище.

В сферичній системі координат (3.42) тензор напружень (3.48) можна представити таким чином:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^c + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^c + \mathbf{e}_\varphi \mathbf{e}_\varphi \alpha_\varphi^c + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^c) \hat{\sigma}_1. \tag{3.49}$$

Невідомі компоненти тензора напруження сфероліти будемо визначати з рівняння (3.49) з врахуванням рівнянь (3.44), (3.45) та (3.46):

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^c &= \hat{\sigma}_1 \alpha_r^c = (a_{21}^2 \alpha_2^c + a_{11}^2 \alpha_1^c) \cdot \hat{\sigma}_1, \\
 \sigma_\theta^c &= \hat{\sigma}_1 \alpha_\theta^c = (a_{21}^2 \alpha_1^c + a_{11}^2 \alpha_2^c) \cdot \hat{\sigma}_1, \\
 \sigma_{r\theta}^c &= \hat{\sigma}_1 \alpha_{r\theta}^c = (\alpha_2^c - \alpha_1^c) \cdot a_{11} a_{21} \cdot \hat{\sigma}_1.
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

Компоненти вектора переміщень для сферолітів виразимо у сферичній системі координат з урахуванням рівнянь (3.42) – (3.46):

$$\begin{aligned}
 u_r^c &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\varepsilon_1^c a_{11} \operatorname{ch} r \cos \theta - \varepsilon_2^c a_{21} \operatorname{sh} r \sin \theta), \\
 u_\theta^c &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\varepsilon_1^c a_{21} \operatorname{ch} r \cos \theta + \varepsilon_2^c a_{11} \operatorname{sh} r \sin \theta),
 \end{aligned} \tag{3.51}$$

де $\varepsilon_1^c, \varepsilon_2^c = \varepsilon_3^c$ – компоненти тензора деформації сфероліту.

$$\varepsilon_1^c = \frac{1}{E_c} (\alpha_1^c - 2\nu_c \alpha_2^c) \hat{\sigma}_1, \quad \varepsilon_2^c = \varepsilon_3^c = \frac{1}{E_c} (\alpha_2^c (1 - \nu_c) - \nu_c \alpha_1^c) \hat{\sigma}_1, \tag{3.52}$$

де E_c, ν_c – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона сфероліту, відповідно.

Поле напружень в аморфному середовищі представимо у вигляді суми однорідного поля взаємодії між сферолітами і двох складових, що розсіюються на сферолітах і спадають у міру віддалення від них. Для орієнтованого полімеру сферолітної будови поле однорідної взаємодії між сферолітами в аморфному середовищі при розтягу напруженням $\hat{\sigma}_1 \alpha_1^0$ представимо в такому вигляді:

$$\mathbf{T}^a = \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_1^a \hat{\sigma}_1 = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^a + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^a + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^a) \hat{\sigma}_1, \tag{3.53}$$

де $\alpha_r^a, \alpha_\theta^a, \alpha_{r\theta}^a$ – невідомі постійні, що характеризують рівень напруження на головних площадках аморфного середовища в результаті однорідної взаємодії між сферолітами, які виразимо з таких рівнянь:

$$\alpha_r^a = a_{11}^2 \alpha_1^a, \quad \alpha_\theta^a = a_{21}^2 \alpha_1^a, \quad \alpha_{r\theta}^a = a_{11} a_{21} \alpha_1^a. \tag{3.54}$$

Компоненти вектора переміщень з урахуванням виразів (3.42) – (3.46) визначимо в такий спосіб:

$$\begin{aligned}
 u_r^a &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\varepsilon_1^a a_{11} \operatorname{ch} r \cos \theta - \varepsilon_2^a a_{21} \operatorname{sh} r \sin \theta), \\
 u_\theta^a &= r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} (\varepsilon_1^a a_{21} \operatorname{ch} r \cos \theta + \varepsilon_2^a a_{11} \operatorname{sh} r \sin \theta), \\
 u_\varphi^a &= 0,
 \end{aligned} \tag{3.55}$$

де $\varepsilon_1^a, \varepsilon_2^a = \varepsilon_3^a$ – компоненти тензора деформації аморфного середовища.

$$\varepsilon_1^a = \frac{1}{E_a} \alpha_1^a \hat{\sigma}_1, \quad \varepsilon_2^a = \varepsilon_3^a = -\frac{\nu_a}{E_a} \alpha_1^a \hat{\sigma}_1, \tag{3.56}$$

де E_a, ν_a – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона аморфного середовища [112].

Складові полів напружень, що розсіюються між сферолітами в аморфному просторі, будемо визначати, скориставшись вирішенням зовнішньої задачі для витягнутого еліпсоїда обертання, отриманим у роботах [129]. Як перше розсіяне поле будемо розглядати соленоїдальне поле переміщень, яке задовольняє рівнянню нерозривності поля [129]:

$$\operatorname{div} \mathbf{u}^* = 0. \quad (3.57)$$

Компоненти вектора переміщень аморфного середовища в результаті однорідної взаємодії між сферолітами, що задовольняють умову нерозривності (3.57), згідно з [158, 203, 204], визначимо в такий спосіб:

$$u_r^* = \frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + \nu_a}{4E_a} A \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot \left(\left[2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r - Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r \right] + \left[2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r + Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r \right] \cdot \cos 2\theta \right), \quad (3.58)$$

$$u_\theta^* = -\frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + \nu_a}{4E_a} A \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot \left[2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r + Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r \right] \cdot \sin 2\theta,$$

$$u_\phi^* = 0,$$

де A – невідома постійна (визначимо нижче); $Q_1(\operatorname{ch} r)$, $Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r)$ – приєднувальні функції Лежандра 2-го роду першого степеня нульового і першого порядку.

Визначимо вектор напруження \mathbf{W}_r^* в аморфному середовищі на площадці з нормаллю \mathbf{e}_r через переміщення (3.58), що задовольняють умові (3.57) з врахуванням:

$$\mathbf{W}_r^* = \frac{E_a}{1 + \nu_a} \left(\frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \operatorname{rot} \mathbf{u}^* \right). \quad (3.59)$$

Вирішуючи рівняння (3.59) і враховуючи вирази (3.43), (3.45) – (3.47) та (3.58), визначимо напруження на поверхні, що співфокусна сфероліту.

$$\sigma_r^* = \frac{A \cdot \hat{\sigma}_1}{4(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \cdot \left(\left[2Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r + \frac{dQ_1^{(1)}(\operatorname{ch} r)}{dr} \cdot \operatorname{ch} r \right] \cdot \cos 2\theta + \left[2Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r - \frac{dQ_1^{(1)}(\operatorname{ch} r)}{dr} \cdot \operatorname{ch} r \right] \right), \quad (3.60)$$

$$\sigma_{r\theta}^* = -\frac{A \cdot \hat{\sigma}_1}{4(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \cdot \left[2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r + Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r \right] \cdot \sin 2\theta.$$

Переміщення аморфного середовища під впливом другого розсіяного поля визначимо за допомогою рішення Папковича–Нейбера [117]:

$$\mathbf{u}^{**} = \frac{\hat{\sigma}_1 (1 + \nu_a)}{E_a} \cdot \left[(3 - 4\nu_a) \cdot \mathbf{e}_1 \cdot B_1 - \operatorname{grad} (B_1 x_1 + B_0) \right], \quad (3.61)$$

де B_0 , B_1 , $B_2 = B_3 = 0$ – функції Папковича–Нейбера, що задовольняють умовам:

$$\begin{aligned}
 B_0 &= -\frac{1}{2} r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) F \cdot \operatorname{ch}^2 r_0 \cdot Q_2(\operatorname{ch} r) P_2(\cos \theta), \\
 B_1 &= \frac{1}{2} r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} F \cdot Q_1(\operatorname{ch} r) P_1(\cos \theta),
 \end{aligned}
 \tag{3.62}$$

де $P_1(\cos \theta)$, $P_2(\cos \theta)$ – приєднувальні функції Лежандра 1-го роду;

$$P_1(\cos \theta) = \cos \theta, \quad P_2(\cos \theta) = 1/2(3 \cos^2 \theta - 1);
 \tag{3.63}$$

F – невідома постійна, яку визначимо нижче.

Компоненти вектора переміщення для другого розсіяного поля у сферичній системі координат визначають з виразу (3.61), з урахуванням рівнянь (3.43), (3.45) – (3.47):

$$\begin{aligned}
 u_r^{**} &= \frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + v_a}{8E_a} F \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot \left(\left[2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r \cdot (3 - 4v_a) - 2Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. Q_2^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch}^2 r_0 \right] + \left[2Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{sh} r \cdot (3 - 4v_a) - 2Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r + 3Q_2^{(1)}(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch}^2 r_0 \right] \cdot \cos 2\theta \right), \\
 u_\theta^* &= -\frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta}} \frac{1 + v_a}{8E_a} F \cdot \hat{\sigma}_1 \cdot \left[2(1 - 2v_a) Q_1(\operatorname{ch} r) \cdot \operatorname{ch} r + 3 \operatorname{ch}^2 r_0 \cdot Q_2(\operatorname{ch} r) \right] \cdot \sin 2\theta, \\
 u_\varphi^{**} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3.64}$$

Розв'язуючи рівняння (3.64) з урахуванням (3.43), (3.45) – (3.47) та (3.61), (3.63), отримаємо напруження другого розсіяного поля в міжсферолітному просторі на поверхнях сферолітів:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^{**} &= \frac{F \cdot \hat{\sigma}_1}{2(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \left\{ 2(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta) \left[(1 - v_a) \operatorname{sh} r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} - v_a \cdot \operatorname{ch} r \cdot \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right] - \right. \\
 &- (\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta) \cdot \left(\frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r^2} + \operatorname{ch} r \cdot \cos \theta \frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r^2} \right) + \operatorname{ch} r \cdot \cos \theta \times \\
 &\times \left. \left(\operatorname{ch} r \cdot \operatorname{sh} r \frac{\partial B_1^*}{\partial r} - \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right) + \operatorname{ch} r \cdot \operatorname{sh} r \frac{\partial B_0^*}{\partial r} - \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} \right\}, \\
 \sigma_{r\theta}^{**} &= \frac{F \cdot \hat{\sigma}_1}{2(\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \left\{ (\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta) \left[(1 - 2v_a) \left(\operatorname{sh} r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \operatorname{ch} r \cdot \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} \right) - \right. \right. \\
 &- \left. \frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r \partial \theta} - \operatorname{ch} r \cdot \cos \theta \frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r \partial \theta} \right] + \operatorname{ch} r \cdot \sin \theta \cdot \left(\sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} + \operatorname{ch} r \cdot \operatorname{sh} r \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right) + \\
 &+ \left. \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial B_0^*}{\partial r} + \operatorname{ch} r \cdot \operatorname{sh} r \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} \right\}, \\
 &\text{де } B_0^* = 1/2 r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \cdot F \cdot B_0; \quad B_1^* = 1/2 r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2} \cdot F \cdot B_1.
 \end{aligned}
 \tag{3.65}$$

Компоненти тензора напружень аморфного середовища \mathbf{T}_a , що створюються в результаті однорідної взаємодії між сферолітами, визначимо як суму напруження однорідної взаємодії σ_r^0 та $\sigma_{r\theta}^0$ (3.53), напруження, що відповідає першому розсіяному полю σ_r^* та $\sigma_{r\theta}^*$ (3.60), і напруження, що відповідає другому розсіяному полю σ_r^{**} та $\sigma_{r\theta}^{**}$ (3.65):

$$\sigma_r^a = \sigma_r^0 + \sigma_r^* + \sigma_r^{**}, \quad \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^0 + \sigma_{r\theta}^* + \sigma_{r\theta}^{**}. \quad (3.66)$$

Відповідні їм компоненти вектора переміщення \mathbf{u}_a визначимо як суму компонентів вектора переміщення однорідної взаємодії u_r^0 та u_θ^0 (3.55), переміщення під дією першого розсіяного поля u_r^* та u_θ^* (3.58), і переміщення під дією другого розсіяного поля u_r^{**} та u_θ^{**} (3.63):

$$u_r^a = u_r^0 + u_r^* + u_r^{**}, \quad u_\theta^a = u_\theta^0 + u_\theta^* + u_\theta^{**}. \quad (3.67)$$

Постійні A та F , що входять в рівняння (3.58), (3.60), (3.62), (3.63), (3.65), визначимо з крайових умов, за які приймемо умови ідеальності адгезійної взаємодії сфероліта та аморфного середовища, що виражається в неперервності полів напружень і переміщень:

$$u_r^c = u_r^a, \quad u_\theta^c = u_\theta^a, \quad \sigma_{r\theta}^c = \sigma_{r\theta}^a, \quad \sigma_r^c = \sigma_r^a. \quad (3.68)$$

Задовольняючи умови неперервності полів напружень і переміщень (деформацій) на поверхні сфероліту, при підстановці рівнянь (3.50) в (3.66) і (3.51) в (3.67), отримаємо вирази для невідомих постійних A та F через напруження однорідної взаємодії α_1^0 :

$$A = \alpha_1^0 \left(\frac{2[E_c(1+v_a) - E_a(1+v_c)] \{E_c(1+v_a)\beta_1 - E_a[(1-v_c)\beta_4 + (1-3v_c)(\beta_3 + \beta_4)]\} - [E_a(1+v_c)\gamma_3 - E_c(1+v_a)\gamma_2] \{E_c(1+v_a)\beta_1 - E_a[(1-v_c)\beta_4 + (1-3v_c)(\beta_3 + \beta_4)]\}}{[E_c(1+v_a)\beta_2 + E_a(1+v_c)\beta_3] [E_c(1-v_a) - E_a(1-v_c)]} + \frac{[E_c(1+v_a)\beta_2 + E_a(1+v_c)\beta_3] \{E_c(1+v_a)\gamma_1 - E_a[(1-v_c)\gamma_4 + (1-3v_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\}}{[E_c(1+v_a)\beta_2 + E_a(1+v_c)\beta_3] \{E_c(1+v_a)\gamma_1 - E_a[(1-v_c)\gamma_4 + (1-3v_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\}} \right), \quad (3.69)$$

$$F = \alpha_1^0 \left(\frac{2[E_c(1+v_a)\gamma_2 - E_a(1+v_c)\gamma_3] [E_c(1-v_a) - E_a(1-v_c)] - [E_c(1+v_a) - E_a(1+v_c)] \cdot \{E_c(1+v_a)\gamma_1 - E_a[(1-v_c)\gamma_4 + (1-3v_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\}}{[E_c(1+v_a)\beta_2 + E_a(1+v_c)\beta_3] \{E_c(1+v_a)\gamma_1 - E_a[(1-v_c)\gamma_4 + (1-3v_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\}} - \frac{[E_c(1+v_a)\beta_2 + E_a(1+v_c)\beta_3] \{E_c(1+v_a)\gamma_1 - E_a[(1-v_c)\gamma_4 + (1-3v_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\}}{[E_c(1+v_a)\beta_2 + E_a(1+v_c)\beta_3] \{E_c(1+v_a)\gamma_1 - E_a[(1-v_c)\gamma_4 + (1-3v_c)(\gamma_4 - \gamma_3)]\}} \right),$$

де

$$\begin{aligned}
 \gamma_1 &= \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{2 \operatorname{sh} u_0}, & \gamma_2 &= \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{2 \operatorname{sh} u_0}, \\
 \gamma_3 &= \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} - \frac{1}{2 \operatorname{ch} u_0} \frac{dQ_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, & \gamma_4 &= \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0}; \\
 \beta_1 &= (3 - 4\nu_a) \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} + \frac{\operatorname{ch} u_0}{2 \operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, \\
 \beta_2 &= (3 - 4\nu_a) \frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} + \frac{3 \operatorname{ch} u_0}{2 \operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, & (3.70) \\
 \beta_3 &= -(1 - 2\nu_a) \left(\frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} \right) + 3 \frac{\operatorname{ch} u_0}{\operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}, \\
 \beta_4 &= 2(1 - 2\nu_a) \left(\frac{Q_1(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{ch} u_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\operatorname{ch} u_0)}{\operatorname{sh} u_0} \right) + 3 \frac{\operatorname{ch} u_0}{\operatorname{sh} u_0} \frac{dQ_2(\operatorname{ch} u_0)}{du_0}.
 \end{aligned}$$

Підставивши значення постійних у рівняння (3.50), (3.51), (3.66), (3.67), отримаємо в криволінійних координатах (3.42) вирішення крайової задачі розтягу полімерного матеріалу сферолітної будови в напрямку вісі x_1 (див. рис. 3.6).

3.4. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою структурою

Для розрахунку значень фізико-механічних властивостей полімерного матеріалу орієнтованої сферолітної будови необхідно знати напруження взаємодії між сферолітами, що виникає в аморфному середовищі в процесі деформації полімеру. Для визначення напруження взаємодії між сферолітами α_1^0 скористаємося теоремою про еквівалентні стани [119], виражаючи потенціальну енергію деформації U через поверхневий інтеграл:

$$U = \frac{1}{2V} \sum_{k=1}^N \int_{V_k} \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} dV = \frac{1}{2V} \int_{S_*} \sigma_{in} u_i dS, \quad (3.71)$$

де S_* – приведена поверхня.

Перше представлення пружної енергії через середні напруження $\hat{\sigma}_{ij}$ і деформації $\hat{\varepsilon}_{ij}$ в разі поздовжнього розтягування має такий вигляд:

$$U = \frac{1}{2} \hat{\sigma}_1 \hat{\varepsilon}_1. \quad (3.72)$$

Виражаючи елементарну площадку (3.44) як

$$ds = H_\theta d\theta H_\varphi d\varphi = r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\operatorname{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0.5} \operatorname{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi$$

і прирівнюючи в першому наближенні приведену поверхню інтегрування S_* у виразі (3.49) до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, сфокусованого зі сферолітом, отримаємо ви-

раз для потенціальної енергії:

$$U = \frac{1}{2V_*} \int_{S_*} \sigma_{in} u_i r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \text{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (3.73)$$

де $V_* = \frac{4}{3} \pi r_c^3 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{3/2} \text{ch} r \text{sh}^2 r$ – об'єм еліпсоїда, обмеженого приведеною

поверхнею S_* .

Враховуючи, що $\sigma_{in} u_i = \sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a$ і використовуючи перший вираз пружної енергії, отримаємо:

$$\hat{\sigma}_1 \hat{\varepsilon}_1 = \frac{1}{V_*} \iint_{(S_*)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a) r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \text{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (3.74)$$

Підставляючи в рівняння (3.74) значення однорідних переміщень u_r^0 та u_θ^0 , значення напружень σ_r^a , $\sigma_{r\theta}^a$ з [205], інтегруючи (3.74) по φ від 0 до 2π і по θ від 0 до π та використовуючи вирази для постійних (3.69), отримаємо значення напруження однорідної взаємодії α_1^0 залежно від діючого середнього напруження $\hat{\sigma}_1$ і ступеня витяжки λ :

$$\alpha_1^0 = \frac{\hat{\sigma}_1}{1 + (1 - 2\nu_a) \chi^2 A_* + (1 + \nu_a) \chi^2 F_*}, \quad (3.75)$$

де χ – ступінь кристалічності [129]; A_* , F_* – постійні, що мають структуру, яка відповідає виразам (3.69), і в яких функції $\gamma_1^* \dots \gamma_4^*$, $\beta_1^* \dots \beta_4^*$, що визначають форму сферолітів, виражені через:

$$\begin{aligned} \gamma_1^* &= \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + (4 - 2\lambda^3) \sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1})}, & \gamma_2^* &= \frac{3\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + (4 + 2\lambda^3) \sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1})}, \\ \gamma_3^* &= \frac{(1 - \lambda^3) \sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}}, & \gamma_4^* &= 1; \\ \beta_1^* &= (1 - 2\nu_a) \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}} + \frac{(2\lambda^3 + 1) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda^4 - \lambda}}{4(\lambda^3 - 1)} + \gamma_1^*, \\ \beta_2^* &= 2(1 - 2\nu_a) \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda \sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}} + 3 \frac{(2\lambda^3 + 1) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda^4 - \lambda}}{4(\lambda^3 - 1)} + \gamma_2^*, \\ \beta_3^* &= -4(1 - 2\nu_a) + 3 \frac{(2\lambda^3 + 1) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda^4 - \lambda}}{2(\lambda^3 - 1)}, \\ \beta_4^* &= 2(1 - 2\nu_a) - 3 \frac{(2\lambda^3 + 1) \ln a + 6\lambda \sqrt{\lambda^4 - \lambda} + 2(\lambda^3 - 1)}{2(\lambda^3 - 1)}, \quad \ln a = \ln \frac{\lambda \sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda \sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda^3 - 1}}. \end{aligned} \quad (3.76)$$

Згідно з [129] запишемо друге представлення енергії у такому вигляді:

$$\frac{\hat{\sigma}_1^2}{2E_1} = \frac{r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})}{2V_*} \iint_{(S_*)} (\sigma_r^0 u_r^a + \sigma_{r\theta}^0 u_\theta^a) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0,5} \text{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (3.77)$$

Підставляючи в (3.77) значення однорідних напружень σ_r^0 та $\sigma_{r\theta}^0$, значення переміщень u_r^a і u_θ^a з [129] і розв'язуючи вираз (3.72) відносно E_1 , визначимо модуль пружності орієнтованого аморфно-кристалічного середовища сферолітної будови в напрямку x_1 :

$$E_1 = E_a \frac{1 + (1 - 2\nu_a)\chi^2 A_* + (1 + \nu_a)\chi^2 F_*}{1 - (1 + \nu_a)\chi^2 A_{**} - (1 + \nu_a)\chi^2 F_{**}}, \quad (3.78)$$

де A_{**} , F_{**} – постійні, що мають структуру, яка відповідає виразам (3.75), де функції $\gamma_1^{**} \dots \gamma_4^{**}$, $\beta_1^{**} \dots \beta_4^{**}$, що визначають форму сферолітів, виражені через ступень витяжки λ таким чином:

$$\gamma_1^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 - 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})}, \quad \gamma_2^{**} = \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 + 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})},$$

$$\gamma_3^{**} = \frac{(2 - 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}, \quad \gamma_4^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}};$$

$$\beta_1^{**} = 2 - 4\nu_a + \frac{1}{2} \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \left[(1 + 2\lambda^3) \ln a + 6\lambda\sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)} \right]}{(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)} + \gamma_1^{**},$$

$$\beta_2^{**} = 2 - 4\nu_a + \frac{3}{2} \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \left[(1 + 2\lambda^3) \ln a + 6\lambda\sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)} \right]}{(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)} + \gamma_2^{**},$$

$$\beta_3^{**} = 4\nu_a - 2 + 3 \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \left[(1 + 2\lambda^3) \ln a + 6\lambda\sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)} \right]}{(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)},$$

$$\beta_4^{**} = (2 - 4\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(1 - \lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}} - \frac{3}{2} \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \left[(1 + 2\lambda^3) \ln a + 6\lambda\sqrt{\lambda(\lambda^3 - 1)} \right]}{(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})(\lambda^3 - 1)}.$$

Вираз (3.78) дозволяє прогнозувати фізико-механічні властивості орієнтованих полімерних матеріалів сферолітної будови в напрямку осі витягування і вимагає в першому

наближенні значення фізико-механічних властивостей аморфної фази властивостей E_a , ν_a , сферолітів E_c , ν_c і конструктивних та технологічних параметрів технологічного процесу переробки, що сприяє зміні вихідної ізотропної неорієнтованої структури і формуванню орієнтованої структури полімерного середовища. Приклавши до отриманої орієнтованої структури полімеру поперечний розтяг або поздовжній зсув, можна остаточно зруйнувати полімерний матеріал на задані за розміром і формою частинки.

Як в'язкопружні константи орієнтованих сферолітів E_c , ν_c пропонуємо використувати значення в'язкопружних постійних, визначених на підставі рівняння (3.78) для в'язкопружного модуля і з [130] для коефіцієнта Пуассона, при ступені кристалічності $\chi_c = \chi_{\max}$, що є максимально можливим для цього полімеру. Іншими словами, моделюється ідеальна будова сфероліта як аморфно-кристалічного середовища, в якому кристаліти і (або) ламелі представляються еліпсоїдальними включеннями в аморфній матриці (див. рис. 3.6, а), що ідеально адгезійно пов'язані між собою. Пружний модуль таких моделей сферолітів дорівнює в'язкопружному модулю кристалічної решітки ($E_c^* = E_p$). Отримані таким чином значення в'язкопружних констант можна використовувати в подальших обчисленнях як пружні константи сферолітів E_c , ν_c при прогнозуванні фізико-механічних властивостей.

З метою визначення ступеня витягування, за яким починається перетворення вихідної неорієнтованої сферолітної структури полімеру на високоорієнтовану, яку легше зруйнувати на окремі частинки заданої форми та розміру, в роботі запропоновано метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою сферолітною структурою.

На рис. 3.8 представлені залежності, що дозволяють визначити ступінь витягування λ , при якій починається руйнування сферолітної структури поліетилентерефталату (ПЕТФ), поліаміду (ПІ) і поліетилену (ПЕ). Вихідні дані для отримання кривих 2, 4, 6 [131–135]:

$$\text{ПЕТФ} - E_c = 8239 \text{ МПа}, \nu_c = 0,32; E_a = 2000 \text{ МПа}, \nu_a = 0,39; \chi = 0,40.$$

$$\text{ПІ} - E_c = 5500 \text{ МПа}, \nu_c = 0,35; E_a = 3400 \text{ МПа}, \nu_a = 0,39; \chi = 0,10.$$

$$\text{ПЕ} - E_c = 1020 \text{ МПа}, \nu_c = 0,37; E_a = 77 \text{ МПа}, \nu_a = 0,39; \chi = 0,68.$$

Криві 1, 3, 5 відповідають експериментальним даним, отриманим у роботі [182] (на рис. 3.8. позначено «○»). За допомогою позначки «●» нанесено результати, отримані з інших джерел [136] для ПЕТФ і для ПЕ.

Аналіз даних (див. рис. 3.8) показує задовільний збіг прогнозованих і вимірених значень в'язкопружного модуля E_1 , найбільший розкид значень не перевищує 14 % для ПЕТФ, 16 % – для ПІ та 18 % – для ПЕ. Слід зазначити, що при отриманні орієнтованих полімерів як технологічні значення ступеня витягування λ вибираються значення, що відповідають прямолінійним ділянкам залежностей.

Для цих ділянок розкид значень між прогнозованими і вимірюваними значеннями набагато менший і становить не більше 8 % для ПЕТФ, не більше 10 % – для ПЕ, а також практично повний збіг для ПІ. Збільшення розкиду між прогнозованими і експериментальними значеннями при великих ступенях витягування пояснюється, мабуть, особливостями початкової стадії руйнування вихідної неорієнтованої сферолітної структури і перетворенням її на високоорієнтовану.

Залежності, представлені на рис. 3.8, дозволяють визначити ступінь витягування, що відповідає природному, при якому починається руйнування сферолітної структури. На

прикладі кривої 2 (точка В) показана методика визначення ступеня природного витягування λ_p , яка може служити орієнтиром при проєктуванні обладнання, призначеного для переробки полімерних відходів.

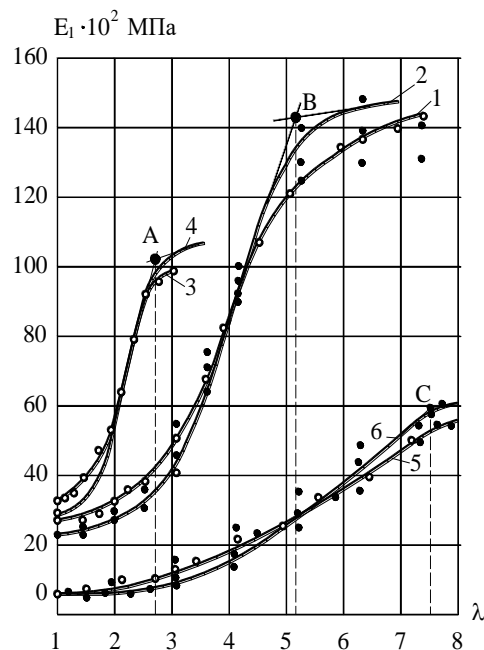


Рис. 3.8. Залежності в'язкопружного модуля для ПЕТФ (1, 2), ПІ (3, 4) і ПЕ (5, 6) від ступеня витягування

Розглядаючи граничний перехід у рівнянні (3.78) при $\lambda = 1$, можна показати, що рівняння (3.78) набуває вигляду, що відповідає моделі неорієнтованого стану ізотропного середовища і задовільно описує експериментальні дані.

Розрахувавши в'язкопружний модуль при розтягу за рівнянням (3.78) та врахувавши вирази (3.75) і (3.38), можна визначити граничну деформацію розтягу, при якій надмолекулярна структура полімеру орієнтується, а сфероліти витягуються вздовж напрямку орієнтації.

3.5. Визначення фізико-механічних властивостей орієнтованих полімерів (у напрямку, поперечному до орієнтації)

У попередніх підрозділах було запропоновано модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури та змодельовано процес її зміни під впливом розтягуючих напружень [128]. У результаті було розроблено метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою сферолітною структурою.

Розглянемо зміну орієнтованої структури полімерного матеріалу сферолітної будови при дії на нього напружень розтягу в поперечному до попередньої орієнтації напрямку.

Завданням дослідження є розробка математичної моделі руйнування попередньо витягнутого полімерного матеріалу в поперечному до витягування напрямку. Це дозволить визначити необхідну деформацію полімерного матеріалу, при якій в'язкопружний

модуль в поперечному до витягування напрямку найменший, що дасть можливість розрахувати мінімальні зусилля, які потрібно прикласти до полімерного матеріалу, щоб почався процес руйнування його структури.

Розробка математичної моделі руйнування полімерних відходів, яка дозволяє простежити за направленими змінами внутрішньої структури полімеру, що приводять до її руйнування при різних видах напружено-деформованого стану, які генеруються технологічними пристроями в процесі переробки полімерних відходів, дозволить розробити таке обладнання, яке б зберегло в переробленому полімері фізико-механічні характеристики первинного матеріалу при мінімальних витратах енергії.

Розробка математичної моделі вимагає проведення структурного аналізу. В роботі [137] було встановлено, що в неорієнтованому стані полімерних матеріалів сферолітної будови можна виділити два основних рівні надмолекулярної структури – сфероліти з мікрогетерогенною кристалічною структурою і однорідну аморфну частину середовища з неврегульованою структурою. В роботі [112] запропоновано модель неорієнтованої структури полімерних матеріалів, яка задовільно пов'язала показники їх фізико-механічних властивостей з параметрами структури і результатами експериментів інших дослідників. У роботі [127] було визначено ступінь витягування, що відповідає природному, при якому в полімерному матеріалі, що перероблюється, утворюються орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів структури. На прикладі було показано методику визначення ступеня природного витягування, яка може служити орієнтиром при проектуванні обладнання, призначеного для переробки полімерних відходів. В роботі [125] змодельований процес витягнення полімерного матеріалу сферолітної будови, на основі чого досліджено зміну фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів у напрямку їх деформації розтягу.

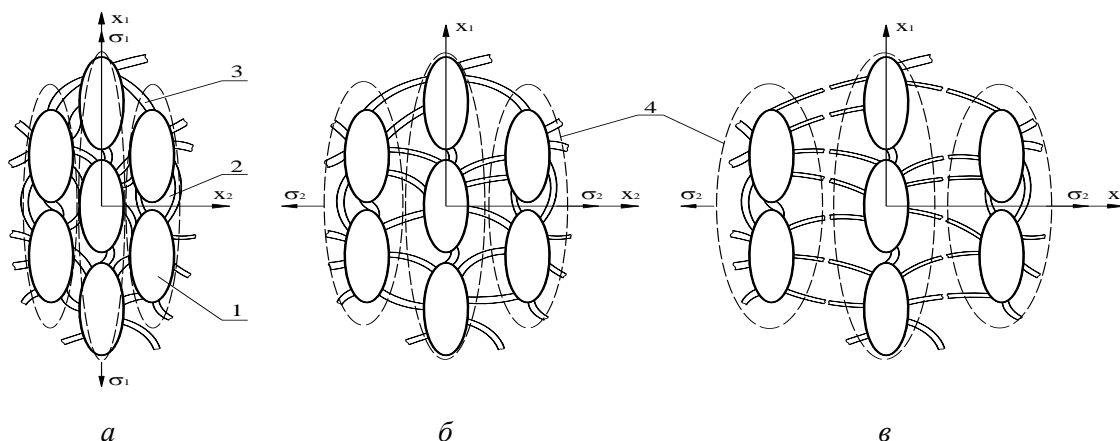
На відміну від розглянутих публікацій, розробляємо математичну модель, що описує зміну фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів в поперечному до попереднього витягування напрямку.

Розіб'ємо весь процес руйнування структури полімерного матеріалу на чотири етапи: початковий неорієнтований стан (див. рис. 3.9, *a*), орієнтований стан (рис. 3.9, *б, в*) – орієнтована сферолітна структура і руйнування полімерного матеріалу під дією навантаження в поперечному до орієнтації сферолітів напрямку.

Раніше було встановлено [127], що при значеннях ступеня витягування в межах $1 \leq \lambda \leq 9 \dots 10$, зберігається прямий генетичний зв'язок між вихідним сферолітним порядком і орієнтаційним. Зазначені факти є основою для гіпотези про існування кількісного зв'язку між параметрами витягування сферолітів і показниками механічних характеристик середовища в кожному із зазначених станів.

Розглянемо модель руйнування полімерного матеріалу сферолітної будови [127], який спочатку піддається одноосьовій орієнтації зі ступенем витягування λ , а після цього – поперечному до попередньої орієнтації витягуванню. На рис. 3.9 представлена модель руйнування вихідної сферолітної структури полімерного матеріалу при послідовній дії на нього напружень розтягу в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Припустимо, що зміна форми сферолітів у результаті орієнтаційного витягування відбувається однорідно в напрямку осі x_1 та при незмінному об'ємі сферолітів [138] ($\rho_c = \text{const}$), а в поперечному до попередньої орієнтації напрямку, тобто в напрямку осі x_2 , витягнуті сфероліти майже не деформуються, а тільки розтягуються прохідні фібрили (напружені зв'язки) між ними (див. рис. 3.9), будемо моделювати орієнтаційне витягування як рівномірний стиск або розтяг простору з коефіцієнтом η , чисельно рівним ступеню витягування полімеру: $\eta = \lambda$.



a – орієнтований стан (еліпсоїдальна форма);
б – поперечний розтяг орієнтованих сферолітів (утворення напружених зв'язків);
в – руйнування полімеру на конгломерати витягнутих сферолітів.

Рис. 3.9. Модель зміни орієнтованої структури полімеру під час впливу на нього поперечних до орієнтації напружень:
1 – сфероліти; 2 – аморфний простір; 3 – прохідні фібрили;
4 – конгломерати витягнутих сферолітів

Фізико-механічні властивості полімеру орієнтованої структури в напрямку, перпендикулярному до напрямку витягування, визначимо з розгляду двоосьового рівномірного розтягу надмолекулярної структури в напрямку осей x_2 та x_3 напруженнями $\hat{\sigma}_2 \alpha_2^0 = \hat{\sigma}_3 \alpha_3^0$ (рис. 3.10).

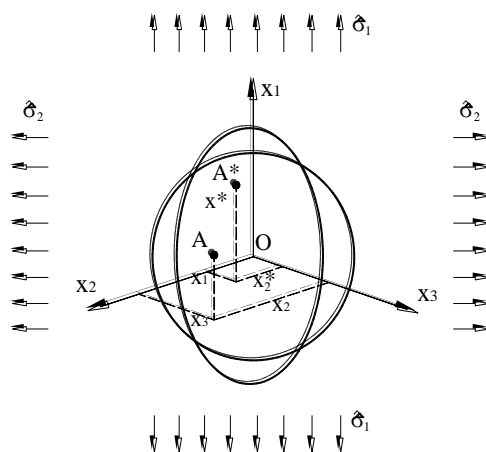


Рис. 3.10. Модель витягнутого сфероліта

В'язкопружні постійні орієнтованого полімерного матеріалу будемо визначати, виходячи з позицій мікромеханіки композитних матеріалів [112, 127] із залученням як декартової, так і криволінійної систем координат r, θ, φ .

При двоосьовому рівномірному розтягу орієнтованої надмолекулярної структури в напрямку осей x_2 та x_3 в полімерному матеріалі (рис. 3.10) виникає певний напружений стан:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_1^c + \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 \alpha_2^c + \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3 \alpha_3^c) \hat{\sigma}_2, \quad (3.79)$$

де $\alpha_2^c = \alpha_3^c$, α_1^c , α_2^c , α_3^c – постійні, що характеризують рівень структурних напружень на головних площадках сфероліту; $\hat{\sigma}_2$ – середні напруження розтягу, які діють перпендикулярно до орієнтації сферолітів, тобто вздовж осі x_2 .

Тензор напружень (3.79) у витягнутому сфероліті в криволінійних координатах [112] запишеться так:

$$\mathbf{T}^c = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^c + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^c + \mathbf{e}_\phi \mathbf{e}_\phi \alpha_\phi^c + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \alpha_{r\theta}^c) \hat{\sigma}_2. \quad (3.80)$$

Компоненти тензора напружень витягнутого сфероліту з рівняння (3.80) в криволінійних координатах, використовуючи вирази (3.9) запишемо таким чином:

$$\sigma_r^c = \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \times \\ \times \left\{ \alpha_1^c \left[(\text{ch} 2r - 1) + \cos 2\theta (\text{ch} 2r - 1) \right] + \alpha_2^c \left[(\text{ch} 2r + 1) - \cos 2\theta (\text{ch} 2r + 1) \right] \right\}; \quad (3.81)$$

$$\sigma_{r\theta}^c = \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} (\alpha_2^c - \alpha_1^c) \text{sh} 2r \cdot \sin 2\theta.$$

Компоненти вектора переміщень для витягнутого сфероліту \bar{u}^c в криволінійних координатах (3.42) будуть виражені таким чином:

$$u_r^c = \frac{\hat{\sigma}_2 r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_c (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{1/2}} \text{sh} 2r \left\{ \left[\alpha_1^c (1 - \nu_c) + \alpha_2^c (1 - 3\nu_c) \right] + (\alpha_1^c - \alpha_2^c) (1 + \nu_c) \cos 2\theta \right\}; \quad (3.82)$$

$$u_\theta^c = \frac{\hat{\sigma}_2 r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_c (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{1/2}} \sin 2\theta \left\{ (\alpha_2^c - \alpha_1^c) (1 + \nu_c) \text{ch} 2r - \left[\alpha_1^c (1 - \nu_c) + \alpha_2^c (1 - 3\nu_c) \right] \right\}.$$

де E_c – модуль пружності сфероліту; ν_c – коефіцієнт Пуассона сфероліту.

Поле напружень у міжсферолітному просторі виразимо як суму таких полів: поля взаємодії між витягнутими сферолітами, що утворюють надмолекулярну структуру полімеру (гексагональне пакування витягнутих сферолітів – рис. 3.9, б, в), та двох полів, які розсіюються на сферолітах і спадають у міру віддалення від сферолітів. Поле взаємодії між сферолітами у міжсферолітному просторі, при розтягу напруженнями $\hat{\sigma}_2 \alpha_2^o$, виражаємо, з урахуванням [184] таким чином:

$$\mathbf{T}^a = \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 \alpha_2^o \hat{\sigma}_2 = (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \alpha_r^o + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_\theta \alpha_\theta^o + \mathbf{e}_\phi \mathbf{e}_\phi \alpha_\phi^o + (\mathbf{e}_r \mathbf{e}_\theta + \mathbf{e}_\theta \mathbf{e}_r) \alpha_{r\theta}^o) \hat{\sigma}_2. \quad (2.83)$$

Компоненти тензора напружень взаємодії між витягнутими сферолітами для міжсферолітного простору (аморфної фази) при розтягу орієнтованої структури полімеру в напрямку осі x_2 , з урахуванням [112], можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}\sigma_r^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \alpha_2^0 [(\text{sh} 2r - 1) + \cos 2\theta (\text{ch} 2r - 1)]; \\ \sigma_{r\theta}^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \alpha_2^0 \text{sh} 2r \cdot \sin 2\theta.\end{aligned}\quad (3.84)$$

Компоненти вектора переміщень міжсферолітного простору, які залежать від поля взаємодії між витягнутими сферолітами при розтягу орієнтованої структури полімеру перпендикулярно до напрямку орієнтаційного витягування, тобто в напрямку осі x_2 , з урахуванням [112], запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned}u_u^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2 r (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_a (\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)^{1/2}} \alpha_2^0 [(1 - 3\nu_a) - \nu_a \cos 2\vartheta] \text{sh} 2u; \\ u_\vartheta^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2 r (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{4 E_a (\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)^{1/2}} \alpha_2^0 [(1 + \nu_a) \text{ch} 2u - (1 - 3\nu_a)] \sin 2\vartheta; \\ u_\varphi^0 &= 0.\end{aligned}\quad (3.85)$$

де E_a – модуль пружності міжсферолітного простору; ν_a – коефіцієнт Пуассона міжсферолітного простору.

Прийmemo, що функція, яка задовольняє умову $\text{div} \vec{u}^* = 0$, є переміщенням полімерного середовища у напрямку осі витягування x_1 . В результаті отримаємо рівняння для компонентів вектора переміщень, що відповідають першому розсіяному полю [127], при розтягу орієнтованого полімеру в напрямку осей x_2 та x_3 :

$$\begin{aligned}u_u^* &= \frac{r (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1 + \nu_a)}{4 E_a} B \hat{\sigma}_2 \times \\ &\quad \times \left\{ \left[2Q_1(\text{ch} u) \text{sh} u - Q_1^{(1)}(\text{ch} u) \text{ch} u \right] + \left[2Q_1(\text{ch} u) \text{sh} u + Q_1^{(1)}(\text{ch} u) \text{ch} u \right] \cos 2\vartheta \right\}, \\ u_\vartheta^* &= - \frac{r (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1 + \nu_a)}{4 E_a} B \hat{\sigma}_2 \left\{ \left[2Q_1(\text{ch} u) \text{ch} u + Q_1^{(1)}(\text{ch} u) \text{sh} u \right] \sin 2\vartheta \right\}, \\ u_\varphi^* &= 0,\end{aligned}\quad (3.86)$$

де $Q_1(\text{ch} r)$ та $Q_1^{(1)}(\text{ch} r)$ – приєднані функції Лежандра першого та другого ступенів, нульового та першого порядку; B – постійна, що характеризує рівень напружень першого розсіяного поля, тобто на головних площадках міжсферолітного простору.

Компоненти тензора напружень першого розсіяного поля \mathbf{T}_a^* в міжсферолітному просторі в криволінійній системі координат $(\bar{e}_r, \bar{e}_\theta, \bar{e}_\varphi)$ на поверхні витягнутого сфероліту при $u = \text{const}$, визначаються шляхом розкладання вектора напружень

$$\mathbf{W}_r^* = \frac{E_a}{1+\nu_a} \left(\frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \text{rot } \mathbf{u}^* \right)$$

за ортами криволінійної системи координат з урахуванням виразу (3.86):

$$\begin{aligned} \sigma_u^* &= \frac{B \hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)} \times \\ &\times \left\{ \left[2Q_1^{(1)}(\text{ch } u) \text{sh } u - \frac{dQ_1^{(1)}(\text{ch } u)}{du} \text{ch } u \right] + \left[2Q_1^{(1)}(\text{ch } u) \text{sh } u + \frac{dQ_1^{(1)}(\text{ch } u)}{du} \text{ch } u \right] \cos 2\vartheta \right\}, \quad (3.87) \\ \sigma_{u\vartheta}^* &= -\frac{B \hat{\sigma}_2}{4(\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta)} \left[\frac{3}{2} Q_1^{(1)}(\text{ch } u) \text{ch } u + \frac{1}{2} \frac{dQ_1^{(1)}(\text{ch } u)}{du} \text{sh } u + Q_1(\text{ch } u) \text{sh } u \right] \sin 2\vartheta. \end{aligned}$$

Поля напружень і переміщень, у випадку другого розсіяного поля, визначимо таким самим способом, як і у попередній задачі, тобто розв'язуючи рівняння Папковича–Нейбера. Таким чином, отримуємо компоненти вектора переміщення у криволінійній системі координат для аморфного середовища (міжсферолітного простору):

$$\begin{aligned} u_u^{**} &= \frac{r(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1+\nu_a)}{4E_a} C \hat{\sigma}_2 \left\{ \left[(3-4\nu_a) Q_1(\text{ch } u) \text{sh } u - Q_1^{(1)}(\text{ch } u) \text{ch } u + \right. \right. \\ &+ \left. \frac{dQ_2(\text{ch } u)}{du} \frac{\text{ch}^2 u_0}{2} \right] + \left[(3-4\nu_a) Q_1(\text{ch } u) \text{sh } u - Q_1^{(1)}(\text{ch } u) \text{ch } u + \right. \\ &+ \left. \left. \frac{dQ_2(\text{ch } u)}{du} \frac{3\text{ch}^2 u_0}{2} \right] \right\} \cdot \cos 2\vartheta, \quad (3.88) \\ u_\vartheta^{**} &= -\frac{r(\lambda^2 - \lambda^{-1})^{1/2}}{\sqrt{\text{sh}^2 u + \sin^2 \vartheta}} \frac{(1+\nu_a)}{4E_a} C \hat{\sigma}_2 \left[(2-4\nu_a) Q_1(\text{ch } u) \text{ch } u + 3Q_2(\text{ch } u) \text{ch}^2 u_0 \right] \sin 2\vartheta. \end{aligned}$$

де C – постійна, що характеризує рівень напружень другого розсіяного поля в міжсферолітному просторі орієнтованого полімеру.

Компоненти тензора напружень другого розсіяного поля, що діють на поверхні витягнутих сферолітів ($u = \text{const}$), в криволінійній системі координат $(\bar{e}_r, \bar{e}_\vartheta, \bar{e}_\phi)$, визначаються шляхом розкладання вектора напружень:

$$\mathbf{W}_r^{**} = \frac{E_a}{1+\nu_a} \left(\frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \text{rot } \mathbf{u}^{**} + \frac{\mathbf{e}_r \nu_a}{1-2\nu_a} \text{div } \mathbf{u}^{**} \right)$$

за ортами даної системи координат з урахуванням виразу (3.88):

$$\begin{aligned} \sigma_r^{**} = & \frac{C \hat{\sigma}_2}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} \left\{ 2 \left[(1 - \nu_a) \text{sh } r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} - \nu_a \text{ch } r \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} \right] - \text{ch } r \cdot \cos \theta \times \right. \\ & \times \left(\frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r^2} + \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \frac{\text{sh } 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r^2} - \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} + \\ & \left. + \frac{\text{sh } 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial r} \right\}, \end{aligned} \quad (3.89)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{r\theta}^{**} = & -\frac{C \hat{\sigma}_2}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} \left[(1 - 2\nu_a) \left(\text{sh } r \cos \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \text{ch } r \sin \theta \frac{\partial B_1^*}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 B_1^*}{\partial r \partial \theta} + \right. \\ & \left. + \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial r} + \frac{\text{sh } 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_1^*}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 B_0^*}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sin 2\theta}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial r} + \frac{\text{sh } 2r}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \frac{\partial B_0^*}{\partial \theta} \right], \end{aligned}$$

$$\text{де } B_0^* = 0,5 r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \cdot C, \quad B_1^* = 0,5 r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} C.$$

Поля переміщень та напружень в аморфному середовищі (міжсферолітному просторі) визначаються як сума полів взаємодії між витягнутими сферолітами (3.84) та (3.85), першого розсіяного поля (3.86) та (3.87) і другого розсіяного поля (3.88) та (3.89):

$$u_r^a = u_r^0 + u_r^* + u_r^{**}, \quad u_\theta^a = u_\theta^0 + u_\theta^* + u_\theta^{**}. \quad (3.90)$$

$$\sigma_r^a = \sigma_r^0 + \sigma_r^* + \sigma_r^{**}, \quad \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^0 + \sigma_{r\theta}^* + \sigma_{r\theta}^{**}. \quad (3.91)$$

Невідомі постійні α_2^0 , α_1^c , α_2^c , B , C , що входять до рівняння (3.81) – (3.91) визначаємо з граничних умов, якими є умови ідеального контакту поверхонь витягнутих сферолітів і міжсферолітного простору (аморфної фази), що виражається умовою неперервності полів напружень та переміщень у вигляді:

$$u_r^c = u_r^a, \quad u_\theta^c = u_\theta^a, \quad \sigma_r^c = \sigma_r^a, \quad \sigma_{r\theta}^c = \sigma_{r\theta}^a. \quad (3.92)$$

Задовольняючи умову ідеального контакту (3.92), тобто прирівнюючи коефіцієнти при поліномах Лежандра, отримаємо вирази для невідомих постійних через напруження взаємодії між витягнутими сферолітами, що лишилося невідомим:

$$\begin{aligned} \alpha_1^c = & 2\alpha_2^0 \frac{E_c \left\{ [\beta_1 \gamma_3 - \gamma_4 (\beta_2 - \beta_1)] + 2\nu_a [\gamma_4 (\beta_4 - \beta_2 + 5\beta_3) - 3\beta_4 \gamma_3] \right\} + E_a (1 - 3\nu_c) \beta_4 \gamma_3}{E_c (1 + \nu_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \\ \alpha_2^c = & \alpha_2^0 \frac{E_c \left\{ [\gamma_1 (\beta_3 - \beta_1) - \beta_1 \gamma_3] + \nu_a [\gamma_4 (3\beta_1 \gamma_3 - 3\gamma_1 \beta_3 - \beta_1 \gamma_1)] \right\} + E_a (1 - \nu_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}{E_c (1 + \nu_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \\ B = & \alpha_2^0 \frac{E_c \left\{ (1 + \nu_a) \beta_1 + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3 \right\} - 4E_a (1 - 2\nu_c) \beta_4}{E_c (1 + \nu_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \\ C = & 4\alpha_2^0 \frac{E_c (1 + \nu_a) (\gamma_2 - \gamma_1) + E_a (1 + \nu_c) (\gamma_4 - \gamma_3)}{E_c (1 + \nu_a) (\beta_1 \gamma_2 - 2\beta_2 \gamma_1) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (\beta_4 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_4)}, \end{aligned} \quad (3.93)$$

де $\gamma_1 \dots \gamma_4$ та $\beta_1 \dots \beta_4$ – функції, що визначають з таких рівнянь:

$$\begin{aligned}
 \gamma_1 &= \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0}, & \gamma_2 &= \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0}, \\
 \gamma_3 &= \frac{3Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{2\text{sh } r_0} + \frac{Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + \frac{1}{2\text{ch } r_0} \frac{dQ_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{dr_0}, & \gamma_4 &= \frac{1}{2\text{ch } r_0} \frac{dQ_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{dr_0}; \\
 \beta_1 &= (3-4\nu_a) \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} - \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0} + \frac{\text{ch } r_0}{2\text{sh } r_0} \frac{dQ_2(\text{ch } r_0)}{dr_0}, \\
 \beta_2 &= (1-2\nu_a) \frac{2Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + 3Q_2(\text{ch } r_0), \\
 \beta_3 &= (1-2\nu_a) \left(\frac{Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0} + \frac{Q_1^{(1)}(\text{ch } r_0)}{\text{sh } r_0} \right) - 3 \frac{\text{ch } r_0}{\text{sh } r_0} Q_2^{(1)}(\text{ch } r_0), \\
 \beta_4 &= (1-2\nu_a) \frac{Q_1(\text{ch } r_0)}{\text{ch } r_0}.
 \end{aligned} \tag{3.94}$$

Підставляючи значення коефіцієнтів α_2^0 , α_1^c , α_2^c , B , C з (3.93) та функцій з (3.94) у рівняння (3.81), (3.82) та (3.90), (3.91), отримаємо вирішення задачі орієнтації полімерного середовища сферолітної будови при рівномірному двоосьовому розтягу в напрямку, перпендикулярному до вісі витягування.

Невідоме напруження взаємодії між витягнутими сферолітами визначимо за допомогою методу, описаного в [127]. Перше представлення потенціалу деформації у випадку рівномірного двоосьового розтягу орієнтованого полімерного середовища сферолітної будови запишемо в такому вигляді:

$$2\hat{\sigma}_2 \hat{\varepsilon}_2 = \frac{1}{V} \iint_{(S)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_{r\theta}^a) r^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0.5} \text{sh } r \sin \theta d\theta d\varphi. \tag{3.95}$$

де $V = \frac{4}{3} \pi r_c^3 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{3/2} \text{ch } r \text{sh}^2 r$ – об'єм витягнутого еліпсоїда, обмеженого

поверхнею S .

З рівняння (3.95), з урахуванням виразів (3.84), (3.85), (3.87), (3.89), (3.91), (3.93), (3.94) визначимо напруження взаємодії між витягнутими сферолітами при розтягу орієнтованого полімерного матеріалу в напрямках x_2 та x_3 , що є перпендикулярними до осі витягування:

$$\begin{aligned}
 \alpha_2^0 &= \frac{\hat{\sigma}_2}{1 + \frac{2}{3} \chi^2 \left\{ \frac{(1-2\nu_a) \left[E_c \left[(1+\nu_a) \beta_1^* + 2(1-3\nu_a) \beta_3^* \right] - 4E_a (1-2\nu_c) \beta_4^* \right]}{E_c (1+\nu_a) (\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a (1-2\nu_c) (\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} + \right.} \\
 &\quad \left. + \frac{(1+\nu_a)(7-5\nu_a) \left[E_c (1+\nu_a) (\gamma_2^* - \gamma_1^*) + E_a (1+\nu_c) (\gamma_4^* - \gamma_3^*) \right]}{E_c (1+\nu_a) (\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a (1+\nu_c) (\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} \right\}},
 \end{aligned} \tag{3.96}$$

де χ – ступень кристалічності;

$$\begin{aligned}
 \gamma_1^* &= \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 - 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1})}, & \gamma_2^* &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 + 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}, \\
 \gamma_3^* &= \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 + 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1})}, & \gamma_4^* &= \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4 - 2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1})}; \\
 \beta_1^* &= \frac{(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})[(\lambda^3 - 1)(3 - 4\nu_a) + 3\lambda^3]}{(\lambda^3 - 1)(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1})} - 1, & & (3.97) \\
 \beta_2^* &= \frac{(\lambda^3 - 1)(10 - 4\nu_a)(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}) + 9\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 18(1 + \lambda^3)\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda^3 - 1)(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1})}, \\
 \beta_3^* &= \frac{\beta_2^*}{2}, \\
 \beta_4^* &= (1 - 2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}, \\
 \ln a &= \ln \frac{\lambda\sqrt{\lambda} - \sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} + \sqrt{\lambda^3 - 1}}.
 \end{aligned}$$

Друге представлення потенціалу деформації, згідно з [125], можна записати у вигляді:

$$\hat{\sigma}_2^2 \left(\frac{1 - \nu_{23}}{E_2} \right) = \frac{1}{V} \iint_{(S)} (\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a) r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0.5} \text{sh} r \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (3.98)$$

Інтегруючи рівняння (3.98) з урахуванням виразів (3.85), (3.90), (3.93) – (3.97), отримаємо залежності для в'язкопружних постійних E_2 та ν_{23} від параметрів витягування і структурних характеристик полімерного матеріалу:

$$\frac{1 - \nu_{23}}{E_2} = \frac{1 - \nu_a}{E_a} \alpha_2^0 - \frac{1 + \nu_a}{2E_a} \left\{ B(\gamma_1^{**} - \gamma_2^{**}) + \frac{C}{2}(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**})(\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**}) \right\}. \quad (3.99)$$

Вираз (3.99) пов'язує між собою дві ефективні постійні E_2 та ν_{23} . Підставляючи в (3.98) значення переміщень u_r^a та u_θ^a з [125], значення напруження взаємодії між витягнутими сферолітами з (3.96) і розв'язуючи рівняння (3.99) відносно E_2 , знайдемо модуль пружності E_2 попередньо орієнтованої структури полімеру в перпендикулярному до осі витяжки напрямку x_2 :

$$E_2 = E_a \frac{1 + \frac{2}{3}\chi^2 \left\{ \frac{(1-2\nu_a)(E_c[(1+\nu_a)\beta_1^* + 2(1-3\nu_a)\beta_3^*] - 4E_a(1-2\nu_c)\beta_4^*)}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} \right\} + 1 - \frac{1}{3}\chi^2 \left\{ \frac{(1+\nu_a)(E_c[(1+\nu_a)\beta_1^{**} + 2(1-3\nu_a)\beta_3^{**}] - 4E_a(1-2\nu_c)\beta_4^{**})}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^{**} \cdot \gamma_2^{**} - 2\beta_2^{**} \cdot \gamma_1^{**}) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**})} \right\}}{\frac{(1+\nu_a)(7-5\nu_a) \left[E_c(1+\nu_a)(\gamma_2^* - \gamma_1^*) + E_a(1+\nu_c)(\gamma_4^* - \gamma_3^*) \right]}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^* \cdot \gamma_2^* - 2\beta_2^* \cdot \gamma_1^*) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^* \cdot \gamma_2^* - \beta_2^* \cdot \gamma_4^*)} + \frac{(1+\nu_a)(7-5\nu_a) \left[E_c(1+\nu_a)(\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a(1+\nu_c)(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) \right]}{E_c(1+\nu_a)(\beta_1^{**} \cdot \gamma_2^{**} - 2\beta_2^{**} \cdot \gamma_1^{**}) + 2E_a(1-2\nu_c)(\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**})}} \quad (3.100)$$

тут γ_2^{**} та β_1^{**} – функції, що визначають зміну характеристик надмолекулярної структури, відповідно до виразу (3.93), від ступеня витягування [127, 139]:

$$\gamma_1^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4-2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, \quad \gamma_2^{**} = \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (4+2\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\gamma_3^{**} = \frac{\gamma_2^{**}}{2}, \quad \gamma_4^{**} = \frac{\gamma_1^{**}}{2};$$

$$\beta_1^{**} = 3-4\nu_a + \frac{\lambda\sqrt{\lambda}(3\lambda^3-1)\ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}}, \quad (3.101)$$

$$\beta_2^{**} = 3-4\nu_a + \frac{\lambda\sqrt{\lambda}(9\lambda^3-1)\ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}(5+3\lambda^3)}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\beta_3^{**} = (1-2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + (1+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} - \frac{9\lambda^4\sqrt{\lambda} \ln a + 6\lambda^3(2+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})},$$

$$\beta_4^{**} = (1-2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})} - \frac{9\lambda^4\sqrt{\lambda} \ln a + 6\lambda^3(2+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}.$$

Рівняння (3.100), з урахуванням виразів (3.101), дозволяє прогнозувати фізико-механічні властивості орієнтованих полімерних матеріалів у напрямку, перпендикулярному до вісі витягування, залежно від фізико-механічних властивостей аморфної (E_a, ν_a)

та кристалічної (E_c, ν_c) фаз, а також від ступеня кристалічності χ і від величини деформації попереднього розтягу ($\varepsilon_1 = \lambda - 1$).

З рівняння (3.99) та (3.100), з урахуванням (3.101), запишемо вираз для визначення коефіцієнта Пуассона ν_{23} :

$$\nu_{23} = 1 - E_2 \left\{ \frac{4(1 - \nu_a)\alpha_2^0 - (1 + \nu_a) \left[2B(\gamma_1^{**} - \gamma_2^{**}) + C(\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**})(\beta_4^{**} \cdot \gamma_2^{**} - \beta_2^{**} \cdot \gamma_4^{**}) \right]}{4E_a} \right\} \quad (3.102)$$

Розглядаючи фізико-механічні характеристики орієнтованого полімерного матеріалу (див. рис. 3.10) в напрямку осі x_3 , ми встановили, що з точністю до постійних в рівняннях (3.101), в'язкопружний модуль $E_3 = E_2$. Таким чином, у процесі витягування в орієнтованому полімері формується трансверсально-анізотропний тип в'язкопружної симетрії [138] і виникає площина поперечної ізотропії $x_2 O x_3$.

Вирази (3.100) та (3.102) дозволяють прогнозувати фізико-механічні властивості полімерного матеріалу залежно від деформації попереднього розтягу (ступеня витягування).

За допомогою отриманої математичної моделі було досліджено вплив ступеня витягування на фізико-механічні властивості полімерів у напрямку, поперечному до витягування. На рис. 3.11 представлені залежності в'язкопружного модуля поліетилентерефталату (ПЕТФ), поліаміду (ПА) і поліетилену (ПЕ) від ступеня витягування в напрямку, поперечному до витягування.

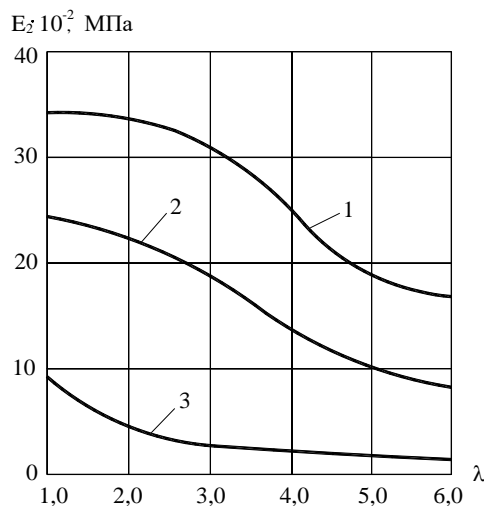


Рис. 3.11. Залежність в'язкопружного модуля в поперечному до деформації напрямку (для попереднього розтягу) від ступеня витягування: 1 – ПЕТФ; 2 – ПА; 3 – ПЕ

Вихідні дані для отримання кривих 1, 2, 3 [1, 9, 10–12]: для ПЕТФ – $E_c = 8239$ МПа, $\nu_c = 0,32$, $E_a = 2000$ МПа, $\nu_a = 0,39$, $\chi = 0,40$; для ПА – $E_c = 5500$ МПа, $\nu_c = 0,35$, $E_a = 3400$ МПа, $\nu_a = 0,39$, $\chi = 0,10$; для ПЕ – $E_c = 1200$ МПа, $\nu_c = 0,37$, $E_a = 77$ МПа, $\nu_a = 0,39$, $\chi = 0,68$.

Як видно з рис. 3.11, в'язкопружні модулі у поперечному до витягування напрямку зменшуються зі збільшенням деформації попереднього розтягу. Однак, після досягнення певного значення ступеня витягування, що є різним для кожного матеріалу (див. рис. 3.11), подальше його збільшення призведе до несуттєвого зменшення в'язкопружного модуля в поперечному напрямку. Тому, розтягнувши поліамід на 100 %, поліетилентерефталат на 300 %, а поліетилен – на 200 %, можна домогтися мінімального значення в'язкопружного модуля в поперечному напрямку. Надмірне витягування полімерного матеріалу не приведе до суттєвого зменшення в'язкопружного модуля, а тільки збільшить витрати енергії перероблювальним пристроєм.

Розроблена математична модель дозволяє простежити за направленими змінами внутрішньої структури полімерного матеріалу, які приводять до його руйнування, при різному напружено-деформованому стані, що генерується технологічним обладнанням для переробки полімерних відходів.

За допомогою отриманих у роботі залежностей можна визначити необхідний ступінь витягування полімерного матеріалу, при якому в'язкопружний модуль у поперечному до деформації напрямку найменший, що дозволить розрахувати мінімальні зусилля, які потрібно прикласти до полімеру, щоб почався процес руйнування його структури.

Розрахувавши в'язкопружний модуль при розтягу полімерного матеріалу в поперечному до попереднього витягування напрямку за рівнянням (3.100) та врахувавши вирази (3.96) і (3.38), можна визначити мінімальну поперечну до попередньо орієнтованої структури полімеру деформацію розтягу залежно від ступеня попереднього витягування, при якому почнеться пластичне послаблення і часткове руйнування його структури.

Таким чином, отримані результати можуть бути використані при розробці технологічного обладнання для переробки полімерних відходів, яке дозволить створювати такий напружено-деформований стан у полімерному матеріалі, за якого він буде руйнуватися по границях орієнтованих конгломератів витягнутих сферолітів. Таке руйнування збереже в переробленому полімерному матеріалі фізико-механічні характеристики первинного матеріалу та забезпечить мінімальні витрати енергії.

Результати проведеного дослідження було використано при проектуванні пристрою для переробки полімерних відходів, що створює напружено-деформований стан, потрібний для руйнування структури полімерного матеріалу.

3.6. Визначення фізико-механічних властивостей полімеру при впливі напружень зсуву

В рамках запропонованої в роботі [127] концепції сферолітної будови полімерних матеріалів розглянемо процес руйнування зв'язків між попередньо орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів при дії на полімер напружень зсуву в поздовжньому та поперечному до попередньої орієнтації напрямках.

У роботах [128] розглянуто процес витягнення та орієнтації сферолітів під дією напружень розтягу в поздовжньому напрямку та часткового руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів під дією напружень стиску.

Напруження розтягу та стиску можна створити в полімерному матеріалі, пропускаючи його між зубчастими валками. Для остаточного руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами сферолітів необхідно після пропускання полімерного матеріалу між зубчастими валками піддати його такому впливу, який приведе до виникнення в ньому напружень зсуву в поздовжньому та поперечному до орієнтації витягнутих сферолітів напрямках.

Здійснення процесу переробки полімерних відходів у два етапи дозволяє суттєво скоротити енергоємність цього процесу і зберігати у переробленому полімері механічні властивості, що близькі до оригінальних.

Переробка полімерних відходів здійснюється шляхом руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів, що забезпечується за рахунок зменшення напружень однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами. Для інтенсифікації процесу руйнування вказаних зв'язків полімерний матеріал після дії на нього напружень розтягу і стиску піддається впливу напружень зсуву.

Вплив напружень зсуву на орієнтовані конгломерати сферолітів приводить не тільки до їх відносного зсуву, але й до їх повороту, що сприяє руйнуванню тих зв'язків між конгломератами сферолітів, що не були зруйновані їх взаємним зсувом.

У результаті впливу на полімерний матеріал напруженнями розтягу, стиску та зсуву сферолітна структура полімеру руйнується. При цьому полімерний матеріал структурується, тобто складається, з майже не зв'язаних між собою конгломератів витягнутих сферолітів. Далі полімерний матеріал зі структурованою будовою потрапляє під вплив пристрою, що остаточно його руйнує, відокремлюючи згадані конгломерати один від одного. У зв'язку з тим, що міцність структурованого полімеру набагато менша від міцності самих сферолітів, процес руйнування полімерних відходів відбувається з набагато меншими енерговитратами.

Таким чином, завданням нашого дослідження є отримання аналітичних залежностей, що дозволять визначати фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу при поздовжньому та поперечному зсуві. За допомогою отриманих залежностей, знаючи властивості певного полімеру, можна визначати мінімальну деформацію зсуву, яку необхідно створити перероблювальним обладнанням для остаточного руйнування зв'язків між конгломератами витягнутих сферолітів, тобто для остаточного подрібнення полімерів.

3.6.1. Фізико-механічні властивості полімеру при поперечному зсуві

Розгляд фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів з орієнтованою структурою у випадку поперечного зсуву під дією напруження σ_{12} дозволяє визначити в'язкопружний модуль зсуву G_{12} (рис. 3.12, а).

Для визначення фізико-механічних властивостей (в'язкопружного модуля при зсуві) в поперечній до напрямку витягування площині розглянемо випадок поперечного зсуву під дією напруження σ_{12} попередньо орієнтованого полімерного матеріалу.

Під час поперечного зсуву в сфероліті виникає напружений стан, що, згідно з діадним представленням [140], можна записати в такому вигляді:

$$\mathbf{T} = \bar{e}_1 \bar{e}_1 \sigma_1 + \bar{e}_2 \bar{e}_2 \sigma_2 + \bar{e}_3 \bar{e}_3 \sigma_3 + (\bar{e}_1 \bar{e}_2 + \bar{e}_2 \bar{e}_1) \cdot \sigma_{12} + (\bar{e}_2 \bar{e}_3 + \bar{e}_3 \bar{e}_2) \cdot \sigma_{23} + (\bar{e}_3 \bar{e}_1 + \bar{e}_1 \bar{e}_3) \cdot \sigma_{31}, \quad (3.103)$$

де $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ – одиничні орти декартової системи координат; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – нормальні напруження, що діють на площадках, перпендикулярних до відповідних осей системи координат; $\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$ – тангенціальні (дотичні) напруження, що діють на тих самих площадках.

Зорієнтуємо осі координат таким чином, щоб на площадках елементарного об'єму, обмеженого еліпсоїдальною поверхнею, нормальні напруження були відсутні. Представимо кожне головне напруження як добуток середнього напруження $\hat{\sigma}_{23}$, що діє на сфероліт в площині $x_2 O x_3$, та невідомих постійних α_{23}^0 , що характеризують рівень напружень однорідної взаємодії і рівень напружень на головних площадках.

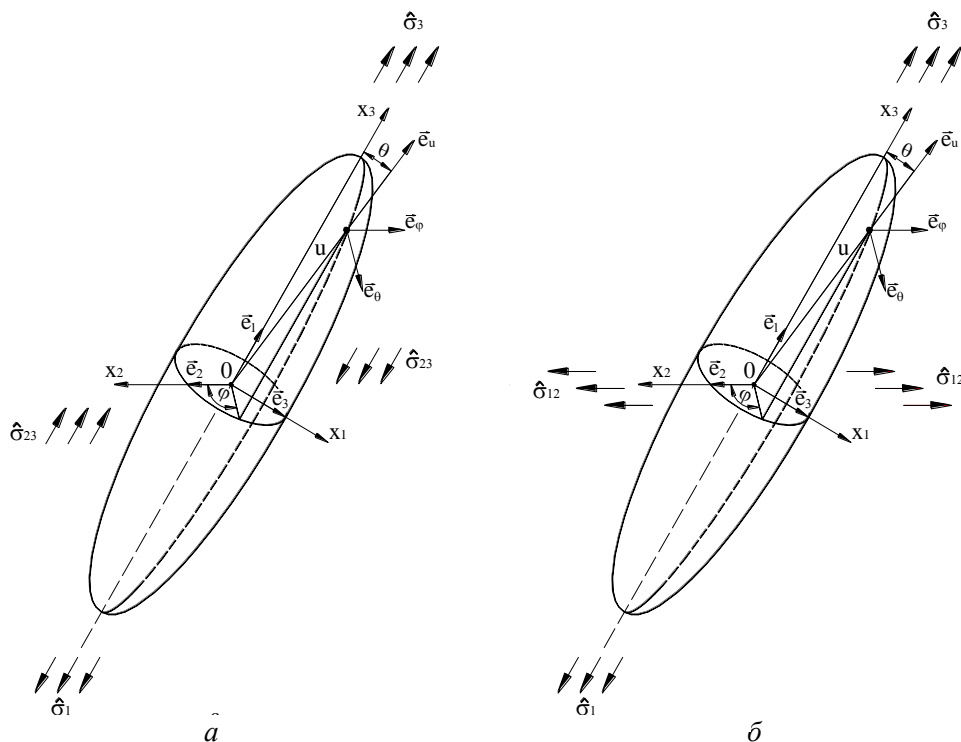


Рис. 3.12. Вплив напружень зсуву на попередньо витягнутий сфероліт:
a – повздовжній зсув в площині первинного розтягу;
б – поперечний зсув в площині, перпендикулярній до первинного розтягу

Тоді рівняння (3.103) перепишеться таким чином:

$$\mathbf{T}_c = (\bar{e}_2 \bar{e}_3 + \bar{e}_3 \bar{e}_2) \cdot \alpha_{23}^0 \cdot \hat{\sigma}_{23}, \quad (3.104)$$

де $\hat{\sigma}_{23}$ – середнє напруження поперечного зсуву, що діє на витягнутий сфероліт в площині $x_2 0 x_3$; α_{23}^0 – напруження однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами, що виникають в результаті зміни напружено-деформованого стану сферолітів.

У сферичних координатах r, θ, φ тензор напружень (3.104) можна виразити таким чином [140]:

$$\mathbf{T}_c = (\bar{e}_r \bar{e}_r \alpha_r^c + \bar{e}_\theta \bar{e}_\theta \alpha_\theta^c + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\varphi \alpha_\varphi^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^c + (\bar{e}_\theta \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\theta + \bar{e}_\theta \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^c) \hat{\sigma}_{23}, \quad (3.105)$$

де α_i^c – невідома постійна, яка визначається з крайових умов, якими є умови ідеальності адгезійної взаємодії витягнутого сфероліту та аморфної фази (між сферолітного простору), що дозволяє говорити про безперервність полів напружень та переміщень. Крайові умови розглянуто у подальшому.

Вектор полів переміщень для витягнутих сферолітів, згідно з [128], можна представити в такий спосіб:

$$\mathbf{u}_c = \left(\frac{1 + \nu_c}{E_c} \alpha_{23}^c + K \right) x_3 \bar{e}_2 \hat{\sigma}_{23} + \left(\frac{1 + \nu_c}{E_c} \alpha_{23}^c - K \right) x_2 \bar{e}_3 \hat{\sigma}_{23}, \quad (3.106)$$

де E_c – модуль пружності сфероліту; ν_c – коефіцієнт Пуассона сфероліту; K – постійна, що характеризує обертання витягнутого сфероліта навколо осі Ox_1 як твердого тіла; α_{23}^c – невідома постійна.

Невідомі постійні K та α_{23}^c визначають з розв'язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам:

$$u_r^c = u_r^a, \quad u_\theta^c = u_\theta^a, \quad \sigma_r^c = \sigma_r^a, \quad \sigma_{r\theta}^c = \sigma_{r\theta}^a. \quad (3.107)$$

Поле напружень у просторі між витягнутими сферолітами можна виразити через суму полів напружень:

- поля напружень взаємодії між витягнутими сферолітами, що утворюють структуру полімерного матеріалу у вигляді гексагонального пакування;
- соленоїдальне і вихрове поля, які розсіюються на сферолітах.

Поле однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами у випадку впливу на полімерний матеріал напружень поперечного зсуву, з урахуванням виразів, отриманих в роботах [158, 184, 191, 200, 201, 215], виразиться таким чином:

$$\mathbf{T}_a^0 = (\vec{e}_r \vec{e}_r \alpha_r^0 + \vec{e}_\theta \vec{e}_\theta \alpha_\theta^0 + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\varphi \alpha_\varphi^0 + (\vec{e}_r \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^0 + (\vec{e}_\theta \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^0 + (\vec{e}_r \vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta \vec{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^0) \hat{\sigma}_{23}. \quad (3.108)$$

Поле відносних переміщень витягнутих сферолітів або конгломератів витягнутих сферолітів у випадку однорідної взаємодії через аморфне середовище виразиться таким чином:

$$\mathbf{u}_a^0 = \alpha_{23}^0 \frac{1 + \nu_a}{E_a} (x_3 \vec{e}_2 + x_2 \vec{e}_3) \hat{\sigma}_{23}, \quad (3.109)$$

де E_a – модуль пружності аморфної фази (міжсферолітного простору); ν_a – коефіцієнт Пуассона аморфної фази.

Компоненти вектора відносних переміщень витягнутих сферолітів \vec{u}^* , у випадку першого розсіяного поля (соленоїдального), можна записати таким чином:

$$\begin{aligned} u_1^* &= \hat{\sigma}_{23} \frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0.5} (1 + \nu_a)}{E_a} \left(\frac{M}{3} + 4N \right) \left(\cos \theta - 2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} \right) \cdot Q_1^{(2)}(\text{ch } r) \cos 2\varphi; \\ u_2^* + i u_3^* &= \hat{\sigma}_{23} \frac{r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0.5} (1 + \nu_a)}{E_a} \left(M \cdot P_1^{(1)}(\cos \theta) \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } r) e^{i\varphi} + \right. \\ &\quad \left. + N \cdot Q_1^{(2)}(\text{ch } r) \frac{1 - 8 \cos \theta + 6 \cos^2 \theta - \cos^4 \theta}{\sin^2 \theta} e^{3i\varphi} \right), \end{aligned} \quad (3.110)$$

де $P_1(\cos \theta)$ – поліноми Лежандра першого роду першого порядку;

$Q_1^{(1)}(\text{ch } r)$, $Q_1^{(2)}(\text{ch } r)$ – присданні функції Лежандра другого роду першого ступеня першого і другого порядку відповідно;

r_c – радіус сфероліта до деформації;

λ – ступінь попередньої витяжки полімерного матеріалу;

M , N – невідомі постійні, що визначаються із розв’язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (3.107).

Компоненти вектора переміщення \bar{u}^{**} , у випадку другого розсіяного поля (вихрового), визначаються через функції Папковича–Нейбера у вигляді:

$$u_a^{**} = \hat{\sigma}_{23} \frac{(1 + \nu_a)}{E_a} \left\{ (3 - 4\nu_a) \bar{e}_1 B_1 - x_1 \cdot \text{grad } B_1 - \text{grad } B_0 \right\} \quad (3.111)$$

де

$$B_1 = r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} \left(2 \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} - \cos \theta \right) P \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } r) \cos 2\varphi, \quad (3.112)$$

$$B_0 = - \frac{r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})}{4} P \cdot \text{ch}^2 r \cdot P_2^{(2)}(\cos \theta) Q_2^{(2)}(\text{ch } r) \cos 2\varphi,$$

де P – невідома постійна, що визначається з розв’язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (3.107).

Невідомі постійні α_{23}^c , K , M , N , P виражаються через невідомі напруження однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами α_{23}^0 . Напруження однорідної взаємодії α_{23}^0 визначаємо з першого представлення пружної енергії при поперечному зсуві:

$$\hat{\sigma}_{23} \cdot \hat{\gamma}_{23} = \frac{1}{\theta} \int_{(S_*)} \left(\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{r\varphi}^a u_\varphi^a \right) \cdot h \cdot h_\varphi \cdot d\theta d\varphi, \quad (3.113)$$

де S_* – приведена поверхня інтегрування, що прирівнюється до поверхні витягнутого сфероліту (до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, співфокусного із сферолітом); u_r^a , u_θ^a , u_φ^a – функції зміщення, які виражаються з таких рівнянь:

$$u_r^a = \hat{\gamma}_{23} \frac{\text{ch } r_* \cdot \text{sh } r_*}{2(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0,5}} \cdot r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} \sin^2 \theta \cdot \sin 2\varphi,$$

$$u_\theta^a = \hat{\gamma}_{23} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5}}{2(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0,5}} \cdot \text{sh}^2 r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \sin 2\varphi, \quad (3.114)$$

$$u_\varphi^a = \hat{\gamma}_{23} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5}}{2} \cdot \text{sh } r_* \cdot \sin \theta \cdot \cos 2\varphi,$$

де σ_r^a , $\sigma_{r\theta}^a$, $\sigma_{r\varphi}^a$ – однорідні поля напружень, які можуть бути представлені такими виразами:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^a &= -\frac{\hat{\sigma}_{23}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot \text{ch}^2 r_* \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos 2\varphi, \\
 \sigma_{r\theta}^a &= -\frac{\hat{\sigma}_{23}}{4(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)} \cdot \text{sh} 2r_* \cdot \sin 2\theta \cdot \cos 2\varphi, \\
 \sigma_{r\varphi}^a &= \frac{\hat{\sigma}_{23}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot \text{ch} r_* \cdot \sin \theta \cdot \sin 2\varphi,
 \end{aligned} \tag{3.115}$$

де r_* – зміщення на приведеній поверхні інтегрування S_* .

Ефективний модуль пружності (зсуву) при поперечному зсуві G_{23} будемо визначати з другого представлення пружної енергії:

$$\begin{aligned}
 \frac{\hat{\sigma}_{23}}{G_{23}} &= \frac{1}{\theta} \int_{(S_*)} \left[\frac{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta}{\text{sh} r_* \cdot \sin \theta} \left(-u_r^a \cdot \text{ch}^2 r_* \cdot \sin \theta - u_\theta^a \text{ch} r_* \cdot \text{sh} r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \right) \cdot \cos 2\varphi + \right. \\
 &\quad \left. + u_\varphi^a \cdot \text{sh} 2r_* \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \right] d\theta \cdot d\varphi.
 \end{aligned} \tag{3.116}$$

Інтегруючи вираз (3.113) і (3.116), з урахуванням рівнянь (3.109) – (3.112), а також (3.114) та (3.115), опускаючи громіздкі викладки перетворення, отримаємо вираз для в'язкопружного модуля при поперечному зсуві:

$$G_{23} = E_a \frac{G_1}{G_2}, \tag{3.117}$$

де

$$\begin{aligned}
 G_1 &= \left\{ E_c (1 + \nu_a) + 2E_a (1 - 2\nu_c) + 2\chi^2 \left[E_c (1 - 2\nu_a) - E_a (1 - 2\nu_c) \right] \right\} \left\{ E_c \left[(1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] - \right. \\
 &\quad \left. - 4E_a (1 - 2\nu_c) \beta_4^{**} + (1 + \nu_a) (7 - 5\nu_a) \left[E_c (1 + \nu_a) (\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a (1 + \nu_c) (\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) \right] \right\}, \\
 G_2 &= 4 \left\{ E_c (1 + \nu_a) + 2E_a (1 - 2\nu_c) + 2\chi^2 \left[E_c (1 - 2\nu_a) - E_a (1 - 2\nu_c) \right] \right\} \left\{ E_c \left[(1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] - \right. \\
 &\quad \left. - 4E_a (1 - 2\nu_c) \beta_4^{**} + (1 + \nu_a) (7 - 5\nu_a) \left[E_c (1 + \nu_a) (\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_a (1 + \nu_c) (\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) \right] \right\} - \\
 &\quad - \left\{ E_c (1 - 2\nu_a) (1 + \nu_a) + 2E_a (1 - 2\nu_c) (1 - 2\nu_a) + \chi^2 \left[E_a (1 - 2\nu_c) (1 + \nu_a) - E_c (1 - 2\nu_a) (1 + \nu_a) \right] \right\} \times \\
 &\quad \times \left\{ E_c \left[(1 + \nu_a) \beta_1^{**} + 2(1 - 3\nu_a) \beta_3^{**} \right] + 2E_a (1 + \nu_c) \beta_4^{**} - (1 + \nu_a) (7 - 5\nu_a) \left[E_c (1 + \nu_a) (\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + E_a (1 + \nu_c) (\gamma_4^{**} - \gamma_3^{**}) \right] \right\},
 \end{aligned}$$

тут χ – ступінь об'ємної кристалічності полімерного матеріалу; γ_i^{**} та β_i^{**} – функції, що визначають зміну параметрів структури полімерного матеріалу від ступеня витяжки λ при поперечному зсуві.

$$\begin{aligned}
\gamma_1^{**} &= \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2(1+\lambda^3)\sqrt{\lambda^3-1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, & \gamma_2^{**} &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3-1} - 2\lambda\sqrt{\lambda} \ln a}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, \\
\gamma_3^{**} &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}, & \gamma_4^{**} &= \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a - 2\sqrt{\lambda^3-1}(2-\lambda^3)}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1})}; \\
\beta_1^{**} &= 3 - 4\nu_a - \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} + \gamma_1^{**}, & & (3.118) \\
\beta_2^{**} &= 3 - 4\nu_a - \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}(2-\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} + \gamma_2^{**}, \\
\beta_3^{**} &= -(1-2\nu_a) \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3-1} + 2\lambda\sqrt{\lambda} \ln a}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}} + \frac{3\lambda^3 \ln a - 2\lambda\sqrt{\lambda^3-1}(2-\lambda^3)}{(\lambda^3-1)[\ln a + 2\lambda\sqrt{\lambda^3-1}]}, \\
\beta_4^{**} &= (1-2\nu_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a - 2\sqrt{\lambda^3-1}(1+\lambda^3)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3-1}}.
\end{aligned}$$

Вираз (3.117), з урахуванням виразів (3.118), дозволяє прогнозувати в'язкопружний модуль при поперечному зсуві G_{12} полімерного матеріалу з попередньо орієнтованою структурою залежно від деформації попереднього розтягу ε_1 .

Вихідні дані для отримання кривих 1, 2, 3 [94, 207–211]: для ПЕТФ – $E_c = 8239$ МПа, $\nu_c = 0,32$; $E_a = 2000$ МПа, $\nu_a = 0,39$, $\chi = 0,40$; для ПА – $E_c = 5500$ МПа, $\nu_c = 0,35$, $E_a = 3400$ МПа, $\nu_a = 0,39$, $\chi = 0,10$; для ПЕ – $E_c = 1200$ МПа, $\nu_c = 0,37$, $E_a = 77$ МПа, $\nu_a = 0,39$, $\chi = 0,68$

Як видно з рис. 3.13, в'язкопружні модулі при поперечному до попереднього витягування напрямку зсуві для поліетилену, поліаміду та поліетилентерефталату зменшуються зі збільшенням ступеня попереднього витягування.

Досягнувши 135 МПа для ПЕТФ, 55 МПа – для ПА і 30 МПа – для ПЕ при деформації попереднього розтягу $\varepsilon_1 = 1,5$, подальше збільшення деформації не приведе до суттєвого зменшення модуля зсуву G_{12} в поперечному до витягування напрямку. Так, розтягнувши поліетилентерефталат на 150 %, поліамід на 120 %, а поліетилен на 100 %, можна досягнути мінімального значення в'язкопружного модуля G_{12} при поперечному зсуві. Ще більша деформація полімерного матеріалу не приведе до суттєвого зменшення в'язкопружного модуля, а тільки збільшить витрати енергії перероблювальним пристроєм.

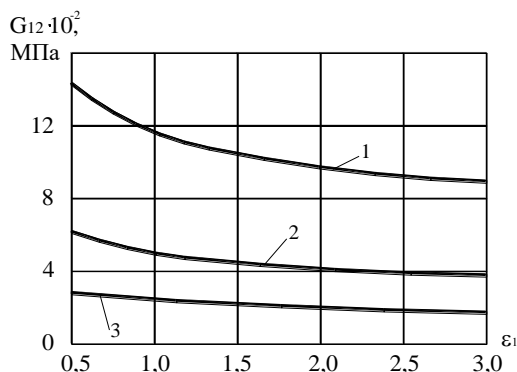


Рис. 3.13. Залежності в'язкопружного модуля при поперечному зсуву від деформації попереднього розтягу: 1 – ПЕТФ; 2 – ПА; 3 – ПЕ

Розроблена математична модель дозволяє простежити за направленими змінами внутрішньої структури полімерного матеріалу при складному напружено-деформованому стані, що створюється пристроєм для переробки полімерних відходів легкої промисловості.

3.6.2. Фізико-механічні властивості полімеру при поздовжньому зсуву

Прийнятий в роботі [141] трансверсально-ізотропний тип симетрії одновісно-орієнтованого полімерного матеріалу передбачає наявність п'яти незалежних в'язкопружних постійних. Для обчислення повного комплексу в'язкопружних постійних попередньо орієнтованого полімерного матеріалу визначимо в'язкопружний модуль G_{12} при поздовжньому зсуві (див. рис. 3.12, б).

Тензор напружень сфероліту, аналогічно до рівнянь (3.104) та (3.105), визначимо за такою формулою:

$$\mathbf{T}_c = (\bar{e}_1 \bar{e}_2 + \bar{e}_2 \bar{e}_1) \cdot \alpha_{12}^0 \cdot \hat{\sigma}_{12} = (\bar{e}_r \bar{e}_r \alpha_r^c + \bar{e}_\theta \bar{e}_\theta \alpha_\theta^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\theta + \bar{e}_\theta \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^c + (\bar{e}_r \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^c + (\bar{e}_\theta \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^c) \cdot \hat{\sigma}_{12}, \quad (3.119)$$

де α_r^c , α_θ^c , $\alpha_{r\theta}^c$, $\alpha_{r\varphi}^c$, $\alpha_{\theta\varphi}^c$ – невідомі постійні, що визначаються в такий спосіб:

$$\begin{aligned} \alpha_r^c &= \frac{\alpha_{12}^c}{2(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)} \text{sh} 2r \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ \alpha_\theta^c &= \frac{\alpha_{12}^c}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} \text{sh} 2r \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi, \\ \alpha_{r\theta}^c &= \frac{\alpha_{12}^c}{\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta} (\text{sh}^2 r \cdot \cos^2 \theta - \text{ch}^2 r \cdot \sin^2 \theta) \cdot \cos \varphi, \\ \alpha_{r\varphi}^c &= \frac{\alpha_{12}^c}{(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0.5}} \text{sh} r \cdot \cos 2\theta \cdot \sin \varphi, \\ \alpha_{\theta\varphi}^c &= \frac{\alpha_{12}^c}{(\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)^{0.5}} \text{ch} r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3.120)$$

Поле переміщень сфероліту вздовж попередньої орієнтації полімерного матеріалу визначимо таким чином:

$$\mathbf{u}_c = \left(\alpha_{23}^c \frac{1+\nu_c}{E_c} - L \right) x_2 \vec{e}_3 \hat{\sigma}_{23} + \left(\alpha_{23}^c \frac{1+\nu_c}{E_c} + L \right) x_3 \vec{e}_2 \hat{\sigma}_{23}, \quad (3.121)$$

де L – постійна, що визначає обертання витягнутого сфероліту як твердого тіла навколо осі Ox_3 (див. рис. 3.12, б);

α_{23}^c – невідома постійна.

Невідомі постійні L та α_{23}^c визначаються з розв'язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (3.107) і виражаються через напруження взаємодії між сферолітами α_{23}^0 .

Поля напружень і переміщень у міжсферолітному просторі розкладемо на однорідні і розсіянні складові. Однорідні поля напружень \mathbf{T}_a^0 і переміщень \mathbf{u}_a^0 можна представити в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_a^0 = & (\vec{e}_1 \vec{e}_2 + \vec{e}_2 \vec{e}_1) \cdot \alpha_{12}^0 \cdot \hat{\sigma}_{12} = (\vec{e}_r \vec{e}_r \alpha_r^0 + \vec{e}_\theta \vec{e}_\theta \alpha_\theta^0 + (\vec{e}_r \vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta \vec{e}_r) \cdot \alpha_{r\theta}^0 + \\ & + (\vec{e}_r \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_r) \cdot \alpha_{r\varphi}^0 + (\vec{e}_\theta \vec{e}_\varphi + \vec{e}_\varphi \vec{e}_\theta) \cdot \alpha_{\theta\varphi}^0) \hat{\sigma}_{12} \end{aligned} \quad (3.122)$$

та

$$\mathbf{u}_a^0 = \alpha_{23}^0 \frac{1+\nu_a}{E_a} (x_2 \vec{e}_3 + x_3 \vec{e}_2) \hat{\sigma}_{23}. \quad (3.123)$$

Перше розсіяне (соленоїдальне) поле переміщень \mathbf{u}^* за [184, 191, 201, 215] визначається такими функціями:

$$\begin{aligned} u_1^a = & -\hat{\sigma}_{12} \frac{1+\nu_a}{E_a} r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} R \cdot Q_1^{(2)}(\text{ch } c) \cdot P_1^{(2)}(\cos \theta) \cdot \cos \varphi, \\ u_2^a = & \hat{\sigma}_{12} \frac{1+\nu_a}{E_a} r_c (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0,5} R \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } c) \cdot P_1^{(1)}(\cos \theta), \\ u_3^a = & 0, \end{aligned} \quad (3.124)$$

де R – довільна постійна, що визначає рівень соленоїдального поля переміщень.

Невідому постійну R будемо визначати з розв'язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (3.107) і виражаються через напруження взаємодії між сферолітами α_{23}^0 . Визначимо вектор напруження \mathbf{W}_c^* на площадці з нормаллю \vec{e}_r через переміщення (3.124), задовольняючі умові $\text{div } \mathbf{u}^* = 0$:

$$\mathbf{W}_r^* = \frac{E_a}{1+\nu_a} \left(\frac{1}{H_r} \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathbf{e}_r \times \text{rot } \mathbf{u}^* \right) \quad (3.125)$$

де $H_r = \sqrt{r^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) (\text{sh}^2 r + \sin^2 \theta)}$ – коефіцієнт Ламе.

Друге розсіяне (вихрове) поле переміщень визначається функціями Папковича–Нейбера у вигляді:

$$u_a^{**} = \hat{\sigma}_{12} \frac{(1 + \nu_a)}{E_a} \{ (3 - 4\nu_a) \bar{e}_1 B_1 - x_1 \cdot \text{grad } B_1 - \text{grad } B_0 \} \quad (3.126)$$

де

$$\begin{aligned} B_0 &= -\frac{r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})}{3} \cdot Z \cdot \text{ch}^2 r \cdot Q_2^{(1)}(\text{ch } r) P_2^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi, \\ B_1 &= r_c^2 (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0.5} \cdot Z \cdot Q_1^{(1)}(\text{ch } r) \cdot P_1^{(1)}(\cos \theta) \cos \varphi, \\ B_2 &= B_3 = 0, \end{aligned} \quad (3.127)$$

де Z – довільна постійна, що визначає рівень вихрового поля переміщень. Невідому постійну Z визначаємо з розв'язання крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (3.107) і виражаються через напруження взаємодії між сферолітами α_{12}^0 .

Поле однорідної взаємодії α_{12}^0 визначаємо з використанням першого представлення пружної енергії при повздовжньому зсуві:

$$\hat{\sigma}_{23} \cdot \hat{\gamma}_{12} = \frac{1}{\theta(S_*)} \int \left(\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{r\varphi}^a u_\varphi^a \right) \cdot h \cdot h_\varphi \cdot d\theta d\varphi, \quad (3.128)$$

де S_* – приведена поверхня інтегрування, що прирівнюється до поверхні витягнутого сфероліта (до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, співфокусного із сферолітом); u_r^a , u_θ^a , u_φ^a – однорідні поля переміщень, які виражаються з таких рівнянь:

$$\begin{aligned} u_r^a &= \hat{\gamma}_{12} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0.5}}{4(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0.5}} (\text{ch}^2 r_* + \text{sh}^2 r_*) \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ u_\theta^a &= \hat{\gamma}_{12} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0.5}}{4(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)^{0.5}} \text{sh } 2r_* \cdot \cos 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ u_\varphi^a &= -\hat{\gamma}_{12} \frac{r_c \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-1})^{0.5}}{2} \cdot \text{ch } r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (3.129)$$

де σ_r^a , $\sigma_{r\theta}^a$, $\sigma_{r\varphi}^a$ – однорідні поля напружень, які визначаються з таких виразів:

$$\begin{aligned} \sigma_r^a &= \frac{\hat{\sigma}_{12}}{2(\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta)} \cdot \text{sh } 2r_* \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \varphi, \\ \sigma_{r\theta}^a &= \frac{\hat{\sigma}_{12}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot (\text{sh}^2 r_* \cdot \cos^2 \theta - \text{ch}^2 r_* \cdot \sin^2 \theta) \cdot \cos \varphi, \\ \sigma_{r\varphi}^a &= -\frac{\hat{\sigma}_{12}}{\text{sh}^2 r_* + \sin^2 \theta} \cdot \text{sh } r_* \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (3.130)$$

де u_* – зміщення на приведеній поверхні інтегрування S_* .

В'язкопружний модуль при поздовжньому зсуві G_{12} визначимо з другого представлення енергії деформації:

$$\frac{\hat{\sigma}_{12}}{G_{12}} = \frac{1}{\theta} \int_{(S^*)} \left(\sigma_r^a u_r^a + \sigma_{r\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{r\varphi}^a u_\varphi^a \right) \cdot h \cdot h_\varphi \cdot d\theta d\varphi, \quad (3.131)$$

Інтегруючи вирази (3.128) і (3.131), з урахуванням рівнянь (3.123), (3.124), (3.126), (3.127), а також (3.129) і (3.130), та опускаючи громіздкі викладки перетворення, отримаємо вираз для в'язкопружного модуля при поздовжньому зсуві:

$$G_{23} = E_a \frac{G_1}{G_2}, \quad (3.132)$$

де

$$G_1 = \left\{ E_c(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c) + 2\chi^2 [E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)] \right\} \left\{ [E_c(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c)] \times \right. \\ \times \left\{ 3[E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] + 2\chi^2(1+v_a)[E_c(1+v_a) - E_a(1+v_c)](\beta_2^{**} - \beta_4^{**}) + \right. \\ \left. \left. + 2\chi^2(1-2v_a)[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)][E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] \right\} \right\},$$

$$G_2 = 3 \left\{ E_c(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c) + 2\chi^2 [E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)] \right\} \left\{ E_c[(1+v_a) + 2E_a(1-2v_c)] \times \right. \\ \times \left\{ 3[E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] + 4\chi^2(1+v_a)\beta_4^{**} [E_c(1+v_a) - E_a(1+v_c)] \right\} - \\ - \chi^2(1+v_a)[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)][E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] - \{ E_c(1-2v_a)(1+v_a) + \\ + 2E_a(1-2v_c)(1-2v_a) + \chi^2 [E_a(1-2v_c)(1+v_a) - E_c(1-2v_a)(1+v_c)] \} [E_c(1+v_a) + \\ + 2E_a(1-2v_c)] \left\{ 3[E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] + 2\chi^2(1+v_a)(\beta_1^{**}\gamma_2^{**} - \beta_2^{**}\gamma_1^{**}) [E_c(1+v_a) - \right. \\ \left. - E_a(1+v_c)] \right\} + 2\chi^2(1-2v_a)[E_c(1-2v_a) - E_a(1-2v_c)][E_a(1+v_c)\beta_1^{**} + E_c(1+v_a)\beta_3^{**}] \left. \right\},$$

де χ – ступінь об'ємної кристалічності полімерного матеріалу;

γ_i^{**} та β_i^{**} – функції, що визначають зміну параметрів структури полімерного матеріалу від ступеня витяжки λ при повздовжньому зсуві:

$$\gamma_1^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3 \sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})},$$

$$\gamma_2^{**} = \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} - 2(\lambda + 1)\sqrt{\lambda} \ln a}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})},$$

$$\begin{aligned}
\beta_1^{**} &= 3 - 4v_a - \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2(\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1})}, \\
\beta_2^{**} &= 3 - 4v_a - \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} - 2(\lambda + 1)\sqrt{\lambda} \ln a}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}, \\
\beta_3^{**} &= -(1 - 2v_a) \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} + 2(\lambda + 1)\sqrt{\lambda} \ln a}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}} + \frac{3\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\lambda(1 + \lambda^3)}{(\lambda^3 - 1)[\ln a + 2\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1}]}, \\
\beta_4^{**} &= (1 - 2v_a) \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a - 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}.
\end{aligned} \tag{3.133}$$

Рівняння (3.132) та (3.133) визначають поведінку поздовжнього модуля зсуву G_{12} попередньо орієнтованої надмолекулярної структури полімерного матеріалу сферолітної будови залежно від ступеня витягування матеріалу λ та його фізико-механічних властивостей. Розрахувавши в'язкопружний модуль при поперечному (3.117) та поздовжньому (3.132) зсуві та врахувавши вирази (3.96) та (3.38), можна визначити мінімальні значення деформації при поперечному і поздовжньому зсуві, які необхідно створити перероблювальному обладнанню для руйнування орієнтованої структури полімерного матеріалу.

Отримані аналітичні залежності дозволяють перейти до проектування технологічного устаткування і визначення конструктивно-технологічних параметрів пристроїв і процесів переробки полімерних матеріалів з урахуванням їх структури.

Напруження зсуву в полімерному матеріалі можна створити, пропускаючи його між валками, виготовленими за профілем Рело, що забезпечить поперечну та поздовжню до попередньої орієнтації сферолітів деформацію зсуву. Тому в майбутньому буде розглянуто схему навантаження полімерного матеріалу, на основі якої буде отримано аналітичні залежності, що пов'язують основні технологічні та конструктивні параметри перероблювального пристрою з валками, виготовленими за профілем Рело, з напружено-деформованим станом у полімерному матеріалі.

3.7. Модель зміни фізико-механічних властивостей полімеру під впливом підвищених температур

Механічні властивості полімерних матеріалів залежать від орієнтації надмолекулярних структур, їх форми і розмірів, а також ступеня наповнення ними аморфного середовища.

Вище було розглянуто руйнування полімерних матеріалів під впливом механічного поля – на першому етапі переробки полімерний матеріал піддавався впливу напружень розтягу і стиску, на другому етапі його піддавали впливу напружень стиску та зсуву. В результаті дії на полімерний матеріал напружень розтягу і стиску його надмолекулярні структурні елементи – сфероліти – витягувалися і орієнтувалися вздовж дії розтягуючих напружень, тобто утворювалися так звані орієнтовані конгломерати витягнутих сферо-

літів. Наступний за цим одночасний вплив напружень стиску та зсуву приводив до руйнування зв'язків між конгломератами витягнутих сферолітів.

Впливаючи на полімерний матеріал напруженнями розтягу, ми отримували в ньому структуру орієнтованих та витягнутих сферолітів. При дії на орієнтовану структуру полімерного матеріалу напруженнями стиску деякі зв'язки між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів були зруйновані, а деякі стали напруженими. Теплові флуктуації, тобто локальні різкі зростання внутрішньої енергії, що виникають при одночасній дії на полімерний матеріал напружень стиску та зсуву, викликають розрив напружених зв'язків. Ймовірність розриву визначається коефіцієнтом:

$$K = -\frac{U_a - \gamma\sigma}{kT}, \quad (3.134)$$

де U_a – енергія активації; $\gamma\sigma$ – частина роботи, яку виконують зовнішні сили при розриві середовища об'ємом γ ; σ – напруження, що створюється зовнішніми силами; T – температура середовища об'ємом γ .

Значення коефіцієнта K залежить від температури і прикладеного напруження зсуву. Чим вище температура, тим більше ймовірність розриву напружених зв'язків. При порівняно невисоких температурах розриву напружених зв'язків сприяє прикладене навантаження, яке створює напруження σ , що зменшує енергію активації U_a на $\gamma\sigma$.

Чим сильнішими на першому етапі переробки полімерного матеріалу були напружені зв'язки між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів, тим ймовірніше руйнування цих зв'язків на другому етапі. Отже, ступінь напруження зв'язків між конгломератами, яке створюється на першому етапі переробки, відіграє вирішальну роль у процесі руйнування полімерного матеріалу.

В результаті переробки полімеру на першому етапі його структура перетворюється на середовище орієнтованих конгломератів витягнутих сферолітів, що зв'язані між собою аморфними ділянками, так званими прохідними макромолекулами. Це було доведено за допомогою рентгенівської дифракції під малими кутами. Саме на цих ділянках відбувається руйнування полімерного матеріалу на орієнтовані конгломерати витягнутих сферолітів. Руйнування відбувається тільки під навантаженням і не відновлюється після його зняття.

При підвищених температурах руйнування напружених зв'язків між конгломератами сферолітів відбувається при менших навантаженнях, а з одночасним підвищенням температури і збільшенням навантаження швидкість руйнування цих зв'язків суттєво зростає. Це пояснюється тим, що при нагріванні полімерного матеріалу в результаті різних значень теплового розширення сферолітів і аморфної фази в аморфному середовищі виникають напруження, які сприяють розриву прохідних макромолекул.

Руйнування полімерів в основному визначається тепловими флуктуаціями, зовнішні сили зумовлюють лише спрямованість процесу. Збільшення температури викликає в аморфному середовищі між сферолітами та їх конгломератами різке зростання внутрішньої енергії, що сприяє появі певного напруження, а вплив від зовнішнього навантаження спрямовує ці напруження в потрібному напрямку, тим самим збільшуючи ефект механічного впливу.

Розглянемо поведінку полімерного матеріалу сферолітної будови в полі впливу підвищених температур T (див. рис. 3.14). Визначимо коефіцієнт об'ємного розширення полімерного матеріалу. Систему координат і модель будови сфероліту приймаємо відповідно до рис. 3.7.

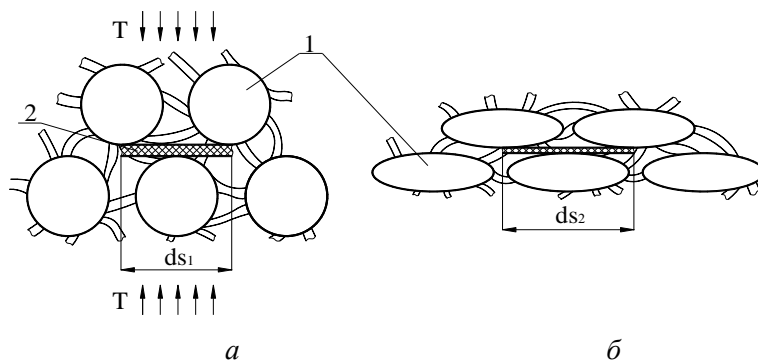


Рис. 3.14. Модель зміни структури полімеру під впливом температури:
a – до впливу температури; ***б*** – після впливу температури;
1 – сфероліт; ***2*** – елемент аморфного середовища

За вихідні величини приймаємо пружні постійні сфероліту E_c , ν_c , пружні постійні аморфної матриці E_a , ν_a , ступінь кристалічності χ , тип решітки (упакування) μ , показник зв'язаності структури полімерного матеріалу ξ , температурні коефіцієнти об'ємного розширення сферолітів α_c і аморфної матриці α_a .

Під дією температури сфероліт і аморфне середовище полімеру деформуються (див. рис. 3.14). Відносні деформації сфероліту ε_c і аморфної фази ε_a в результаті впливу температури визначимо з таких виразів:

$$\varepsilon_c = \alpha_c \cdot \Delta T, \quad \varepsilon_a = \alpha_a \cdot \Delta T, \quad (3.135)$$

де ΔT – величина зміни температури, °C.

При нагріванні полімерного матеріалу за рахунок різних значень коефіцієнтів теплового розширення сферолітів α_c і аморфної матриці α_a в аморфному середовищі виникають напруження однорідної взаємодії Q , які будемо визначати з рівняння (3.34) з урахуванням виразів (3.135).

$$Q = \frac{E_a \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{1 + \frac{2}{3} \chi^2 \left(\frac{(1-2\nu_a)(E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c))}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)} + \frac{(7-5\nu_a)(1+\nu_a)(E_c(1+\nu_a) - E_a(1+\nu_c))}{E_c(1+\nu_a)(8-10\nu_a) + E_a(7-5\nu_a)(1+\nu_c)} \right)} \quad (3.136)$$

Підставляючи в (3.38) значення напружень однорідної взаємодії Q з (3.136) і розв'язуючи вираз (3.38), опускаючи громіздкі перетворення, аналогічні до описаних у підрозділі 3.4, отримаємо вирази для компонентів вектора переміщень \vec{u} і тензора напружень \vec{T}_σ для сфероліту та аморфного середовища.

Для сфероліту:

– компоненти вектора переміщень:

$$u_r^c = \alpha_a \Delta T + \frac{2(1-\chi^2) \cdot E_a(1-2\nu_c)(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) + 2\chi^2 [E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)]}, \quad (3.137)$$

$$u_\phi^c = u_\theta^c = 0;$$

– компоненти тензора напружень:

$$\sigma_r^c = \sigma_\varphi^c = \sigma_\theta^c = \frac{2(1-\chi^2) \cdot E_a E_c (1-2\nu_c)(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]}, \quad (3.138)$$

$$\sigma_{r\theta}^c = 0.$$

Для аморфного середовища:

– компоненти вектора переміщень:

$$\begin{aligned} u_r^a = & \frac{(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \left\{ E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)] \right\}} \times \\ & \times \left\{ 2(1+2\nu_a) [E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)] + [E_a(1-2\nu_c) - E_c(1-2\nu_a)] \right\} + \\ & + \Delta T \cdot \left[\left(\alpha_a - \frac{2(1-2\nu_a)}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right) - \frac{1+\nu_a}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right], \end{aligned} \quad (3.139)$$

$$u_\varphi^a = u_\theta^a = 0;$$

– компоненти тензора напружень:

$$\begin{aligned} \sigma_r^a = & \frac{E_a(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \left\{ E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)] \right\}} \times \\ & \times \left\{ E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) + 4[E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)] \right\}, \\ \sigma_\theta^a = \sigma_\varphi^a = & \frac{2E_a(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \left\{ E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)] \right\}} \times \\ & \times \left\{ E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) - [E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)] \right\} - \\ & - \frac{4E_a(\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{3(1-\nu_a)}, \end{aligned} \quad (3.140)$$

$$\sigma_{r\theta}^a = 0.$$

Отримані розв'язки задовольняють умову ідеальної адгезійної взаємодії [127]:

$$u_\theta^a = u_\theta^c; \quad u_r^a = u_r^c; \quad \sigma_r^a = \sigma_r^c; \quad \sigma_\theta^a = \sigma_\theta^c; \quad \sigma_{r\theta}^a = \sigma_{r\theta}^c \quad (3.141)$$

і визначають структурні напруження, що виникають у надмолекулярних структурних елементах полімерного матеріалу сферолітної будови при нагріванні.

Замінюючи сфероліт сферою рівновеликого об'єму та прирівнюючи до нуля середні напруження на її поверхні, виражаючи потенціал деформації U через поверхневий інтеграл:

$$U = \frac{1}{2V} \sum_{k=1} \int_{V_k} \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} dV = \frac{Q}{2V} \sum_{S_0} \int \sigma_{in} u_i df_n, \quad (3.142)$$

де Q – напруження однорідної взаємодії між сферолітами, що виникає в аморфному середовищі; df_n – елемент з нормаллю n до поверхні, що обмежує об'єм V ; σ_{in} , u_i – компоненти тензора напруження \mathbf{T}_σ і вектора переміщень \mathbf{u} , що діють на поверхні S_0 .

Обчислюючи цей інтеграл, отримаємо вираз для ефективного коефіцієнта теплового розширення полімерного матеріалу сферолітної будови:

$$\alpha = \alpha_a - (\alpha_a - \alpha_c) \frac{3E_c(1-\nu_c) \cdot \chi^2}{E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)]}. \quad (3.143)$$

Рівняння (3.143) дозволяє прогнозувати теплофізичні властивості полімерних матеріалів сферолітної будови залежно від особливостей їх внутрішньої будови.

Підставляючи в рівняння (3.142) значення переміщень і значення напруження взаємодії між сферолітами з виразу (3.136), інтегруючи і вирішуючи його відносно в'язкопружного модуля аморфної фази E_a , отримаємо залежність в'язкопружного модуля полімерного матеріалу від його температури та деформації розтягу (витягування):

$$E = E_a \frac{\frac{(1+\nu_c)(1-\chi^2) \cdot (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{9(1-\nu_a) \left\{ E_c(1+\nu_a) + 2 \cdot [\chi^2 E_c(1-2\nu_a) + (1-\chi^2) E_a(1-2\nu_c)] \right\}^\times + \left\{ 2(1+2\nu_a) [E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c)] + [E_a(1-2\nu_c) - E_c(1-2\nu_a)] \right\} + \Delta T \cdot \left[\left(\alpha_a - \frac{2(1-2\nu_a)}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right) - \frac{1+\nu_a}{3(1-\nu_a)} (\alpha_a - \alpha_c) \right]}{\alpha_a \Delta T + \frac{2(1-\chi^2) \cdot E_c(1-2\nu_c) (\alpha_a - \alpha_c) \Delta T}{E_c(1+\nu_a) + 2E_a(1-2\nu_c) + 2\chi^2 [E_c(1-2\nu_a) - E_a(1-2\nu_c)]}} \quad (3.144)$$

Рівняння (3.144) дозволяє прогнозувати фізико-механічні характеристики полімерного матеріалу від його температури (див. рис. 3.15).

З рис. 3.15 видно, що залежність в'язкопружного модуля від температури для поліетилентерефталату є нелінійною, а для поліаміду – майже лінійною. Це вказує на те, що в поліетилентерефталаті перед впливом на нього температури або навантажень розтягу ступінь напруження зв'язків між сферолітами або їх конгломератами є значно більшим, ніж в поліаміді.

На основі структурної моделі полімеру розроблено методи визначення фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів, за допомогою яких можна розрахувати значення в'язкопружного модуля при розтягу та зсуві залежно від деформації попереднього розтягу матеріалу, а це, в свою чергу, дає можливість розраховувати мінімальні зусилля, які потрібно прикласти перероблювальному обладнанню до полімерних відходів для створення в них граничних деформацій розтягу та зсуву, що передують максимальній орієнтації структури матеріалу та його подальшому руйнуванню.

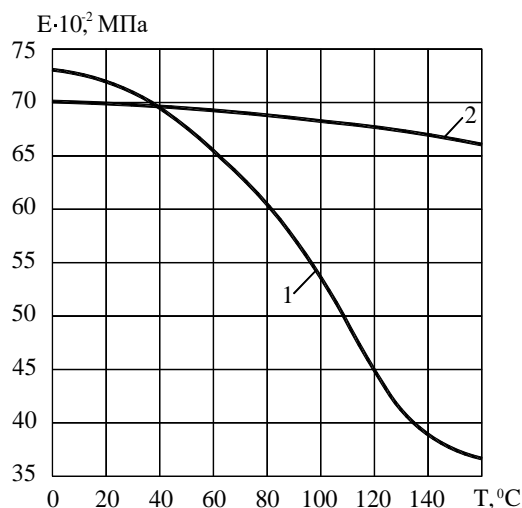


Рис. 3.15. Залежності в'язкопружного модуля E полімеру від температури: 1 – поліетилентерефталат (ПЕТФ); 2 – поліамід (ПІ)

3.8. Розробка хімічної моделі процесу переробки полімермістких відходів

Розробка технології та підбір обладнання для хімічного рециклінгу полімерних відходів вимагає створення хімічної моделі процесу, яка дозволяє охарактеризувати зміну фізико-хімічних та хімічних властивостей полімеру під впливом технологічних параметрів, а саме, співвідношення вихідних компонентів, наявності допоміжних речовин у реакційній суміші, технологічних режимів тощо.

Відомо, що найбільша частка серед полімерних відходів належить термопластичному полімеру – поліетилентерефталату (ПЕТФ). Завдяки своїм фізико-хімічним, хімічним та експлуатаційним характеристикам саме цей полімер найчастіше використовують для виготовлення виробів легкої промисловості.

Теоретичне обґрунтування моделі хімічного процесу переробки відходів ПЕТФ полягає у наступному. ПЕТФ являє собою термопластичний полімер з молекулярною масою ~ 30000 , який у більшості випадків переробляють механічними методами з отриманням грануляту вторинного ПЕТФ. З метою отримання продуктів, які можна використовувати у якості складових для виготовлення виробів легкої промисловості, необхідне переведення високомолекулярного полімеру у сполуки з більш низькою молекулярною масою, що досягається шляхом хімічного рециклінгу під дією лугів, кислот, спиртів, естерів, амінів у певних умовах, викликаючи розрив складного зв'язку.

Враховуючи фізико-хімічні властивості ПЕТФ (див. табл. 3.1) запропоновано проводити хімічний рециклінг відходів багатоатомним спиртом (БС).

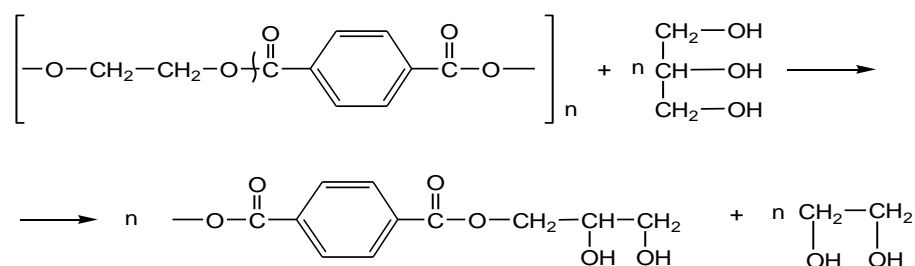
Узагальнюючи відомі припущення, висунуті Коршаком В. В., Віноградовою С. В., Кудюковим Ю. П., пропонується наступна хімічна модель отримання напівпродуктів для виробів легкої промисловості з відходів ПЕТФ, яка складається з таких етапів:

- деструкція поліестерного ланцюга макромолекули ПЕТФ;
- синтез олігомерів, внаслідок реакцій переестерифікації та обміну;
- утворення розгалужених сполук.

Таблиця 3.1

Фізико-хімічні властивості ПЕТФ	
Полімер	ПЕТФ
Внутрішня в'язкість, дл/г	0,815
Температура плавлення $T_{пл}$, °С	245
Густина ρ , г/см ³	1,4
Вологість, %	0,1
Вміст ацетальдегіду, %	0,1
Кислотне число (к.ч.), мг КОН/г	2,8
Гідроксильне число (г.ч.), г-екв/г	$6,2 \cdot 10^{-6}$
Число ефірних груп (ч.еф.гр.), мг КОН/г	540
Молекулярна маса (віскозиметричний метод)	31260

На першому етапі, під час деструкції відходів ПЕТФ під дією багатоатомного спирту передбачається, що реакція буде відбуватися за таким механізмом:



Механізм та кінетика наведених реакцій буде визначатися рядом факторів, а саме: співвідношенням вихідних компонентів (ПЕТФ, БС), температурою синтезу, типом катализатора та умовами відведення побічних продуктів (перемішування, інертне середовище, вакуум). Основною умовою для ефективного протікання процесу хімічного рециклінгу є якість грануляту ПЕТФ, яка досягається механічною переробкою таких відходів.

Середньовагова молекулярна маса ПЕТФ, який використовувався для досліджень становить 31260, середньочислова молекулярна маса – 30566. Коефіцієнт полідисперсності вихідного ПЕТФ становить 1.

Дослідження проводили при таких співвідношеннях ПЕТФ:БС (моль елементарної ланки молекули ПЕТФ до молей багатоатомного спирту) – 1:0,5 (надлишок ПЕТФ); 1:1 (еквівалентна кількість); 1:1,4 (надлишок багатоатомного спирту), що відповідає масовому співвідношенню ПЕТФ:БС – 80:20; 65:35; 60:40.

При виборі умов проведення технологічного процесу слід прийняти до уваги рівноважний характер реакцій алкоголізу і переетерифікації. Досить низька активність вихідних реагентів і їх погана розчинність у звичайних органічних розчинниках, які використовують, обумовлює необхідність проведення процесу в розплаві. Через високі температури плавлення полімерів і олігомерів, які утворюються, температури процесу, досягають 200–300 °С, причому верхня температурна межа лімітується проходженням побічних процесів. Такі високі температури роблять принципово можливим видалення побічних продуктів (етиленгліколю) із зони реакції. Процес видалення побічних продуктів інтенсифікується застосуванням вакууму або продувкою реакційної маси інертним газом.

Особливе значення при видаленні етиленгліколю має перемішування. Проведення процесу в тонкому шарі або під вакуумом сприяє більш глибокому протіканню процесу.

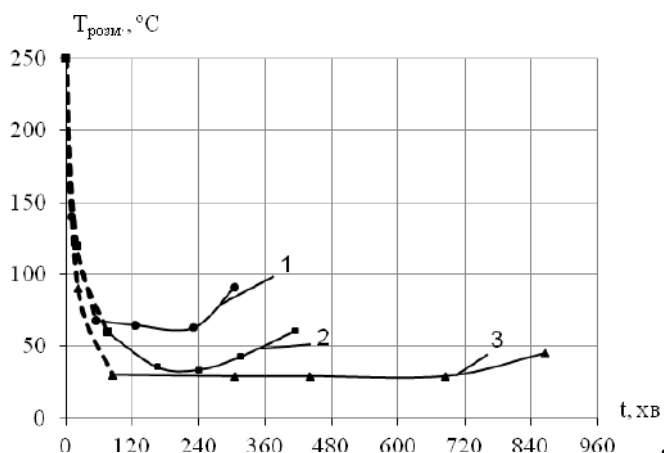
Прибор для проведення реакції алкоголізу складається з реактора, в який завантажують вихідні продукти для проведення процесу при $T = 180\text{--}250$ °С. Залежно від різних

технологічних факторів установка доповнюється вловлювачем побічних продуктів та зворотним холодильником, вентилям для підведення інертного газу та перемішуванням.

Для проведення процесу використовували два типи каталізатора (нафталінсульфоокислота, сечовина). Нагрівання вели в середовищі інертного газу та при перемішуванні реакційної суміші. При $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігалось спочатку утворення двофазної системи: верхній шар – багатоатомний спирт, нижній – розплав ПЕТФ, яка поступово гомогенізувалась. Алкоголіз проводили при постійній температурі – $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, з відбором проб через певні проміжки часу, за точку відліку приймали момент досягнення $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кінетику хімічного рециклінгу досліджували за зміною граничного числа в'язкості та температури розм'якшення напівпродуктів у часі. Це дозволяє спрогнозувати шлях подальшого практичного застосування продуктів переробки.

Для графіків залежності температури розм'якшення (рис. 3.16) та граничного числа в'язкості (рис. 3.17) від часу перебігу процесу характерно однаковий хід кривих, що підтверджує відоме положення.



**Рис. 3.16. Вплив співвідношення ПЕТФ:БС на зміну температури розм'якшення рециклатів у часі (каталізатор – сечовина, $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, перемішування, інертне середовище):
1 – 1:0,5; 2 – 1:1; 3 – 1:1,4**

Слід відмітити, що характер кривих при різних співвідношеннях вихідних компонентів практично однаковий, лише звужується часовий інтервал проведення процесу зі зменшенням кількості агенту деструкції, незалежно від типу каталізатора, який використовується. Збільшення кількості багатоатомного спирту приводить до зменшення граничного числа в'язкості та температури розм'якшення протягом перших 30–80 хв, тобто забезпечує більш глибокий ступінь деструкції.

Аналіз характеру зміни отриманих залежностей у часі дозволяє припустити про ряд реакцій, які супроводжують процес алкоголізу ПЕТФ та виділити три стадії, які характеризуються трьома гілками для кожної з кривих. Як вже було згадано, протягом 30–60 хв переважає процес деструкції ПЕТФ під дією спирту з розривом ефірного зв'язку і з видаленням побічної речовини, яка була ідентифікована як етиленгліколь (за показником заломлення).

Також було встановлено, що в процесі реакції на першій стадії відбувається стрімке падіння кількості вільного багатоатомного спирту в реакційній суміші (рис. 3.18), і збільшується концентрація олігомерів, які містять кінцеві гідроксильні групи, що сприяє проходженню обмінних реакцій (поліетерифікації) та свідчить про встановлення поліконденсаційної рівноваги.

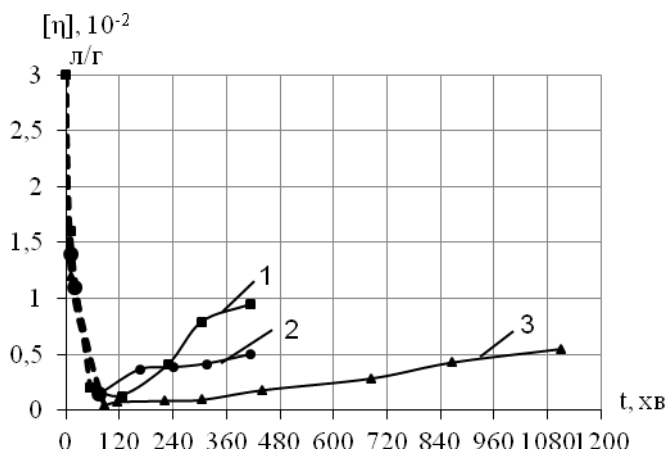


Рис. 3.17. Вплив співвідношення ПЕТФ:БС на зміну граничного числа в'язкості продуктів алкоголізу у часі (катализатор – сечовина, $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, перемішування, інертне середовище): 1 – 1:0,5; 2 – 1:1; 3 – 1:1,4

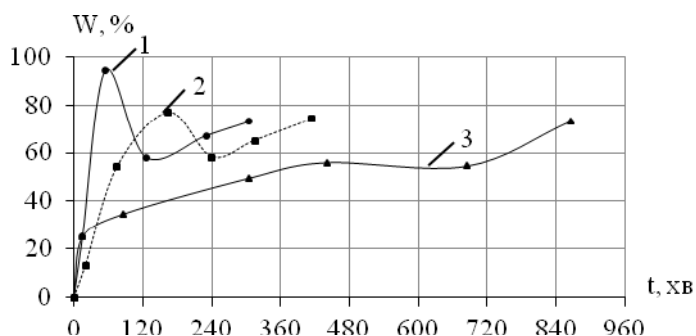


Рис. 3.18. Залежність кількості багатоатомного спирту, що прореагував, у часі від співвідношення ПЕТФ:БС (катализатор – сечовина, $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, перемішування, інертне середовище): 1 – 1:0,5; 2 – 1:1; 3 – 1:1,4

Встановлено, що процес відбувається як реакція першого порядку за багатоатомним спиртом, незалежно від співвідношення вихідних продуктів, але її швидкість значно зростає із зменшенням агента деструкції, про що свідчить зростання констант швидкості, які наведені в таблиці 3.2.

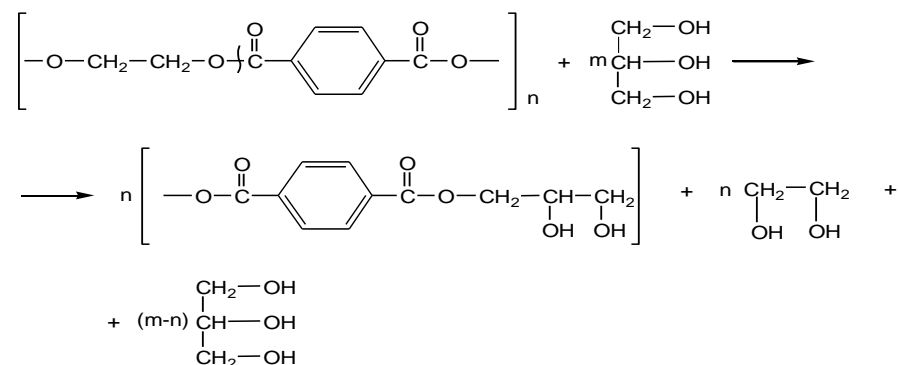
Таблиця 3.2

Константи швидкості процесу хімічного рециклінгу при різних співвідношеннях вихідних продуктів

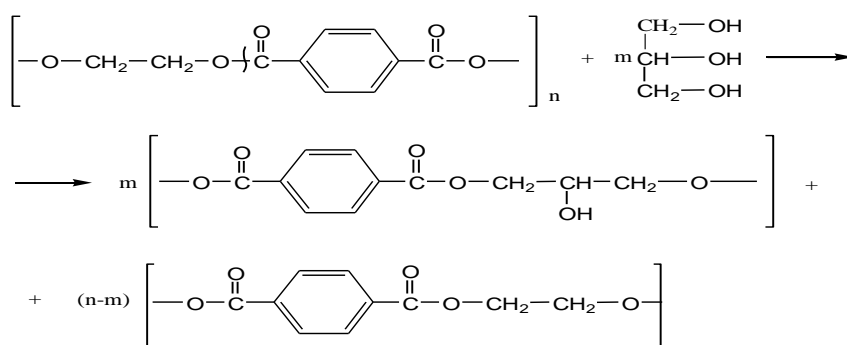
Співвідношення ПЕТФ:БС	Стадія I – алкоголіз, хв ⁻¹	Стадія II – обмінні реакції, хв ⁻¹		
		κ_1	κ_2	K_p
1:0,5	0,0668	0,0038	0,0006	6,33
1:1	0,0586	0,00841	0,0055	1,529
1:1,4	0,0183	0,0294	0,0006	4,9

На наш погляд, реакції деструкції, які відбуваються на *першій стадії* процесу алкоголізу ПЕТФ, залежно від кількості агента алкоголізу можна охарактеризувати за такими схемами:

1) надлишку багатоатомного спирту:



2) нестачі спирту та при еквівалентному співвідношенні:

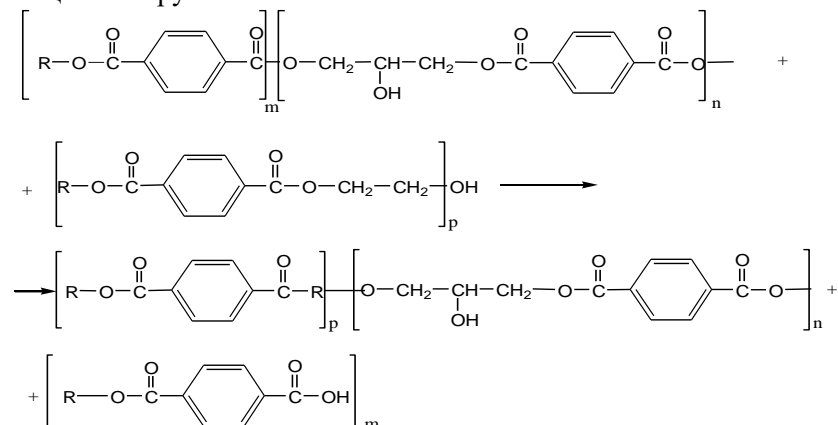


Другий етап. Обмінні реакції, які відбуваються у суміші можливі за рахунок наявності:

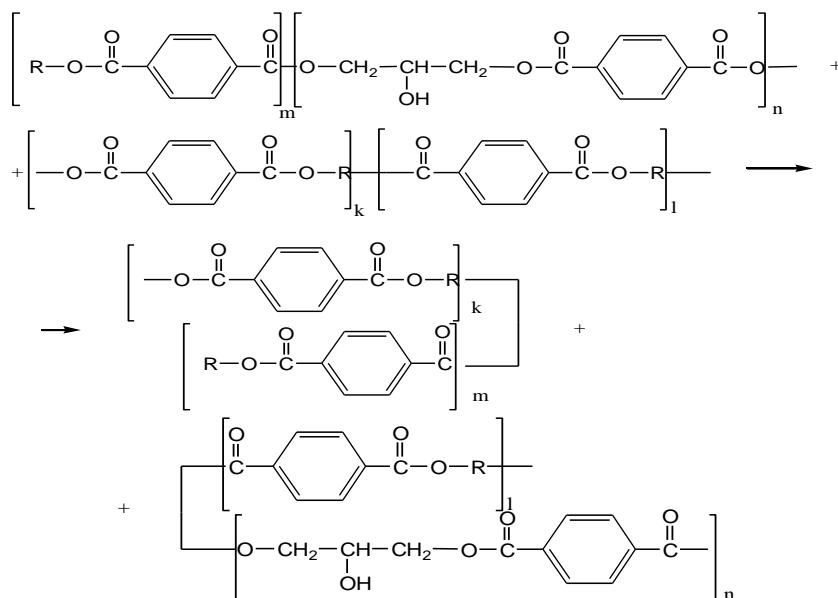
- низькомолекулярних продуктів реакції;
- вихідних речовин, оскільки продукти, які утворилися під час першої стадії, містять в своїй молекулі зв'язки, здатні розриватися в умовах реакції (при високій температурі та в присутності каталізатора) під дією вихідних речовин або речовин аналогічної їм хімічної природи;
- інших полімерних ланцюгів за рахунок кінцевих груп, або за рахунок зворотних реакцій за проміжними ланками ланцюгів.

Схематично цей процес можна зобразити так:

1) за кінцевими групами



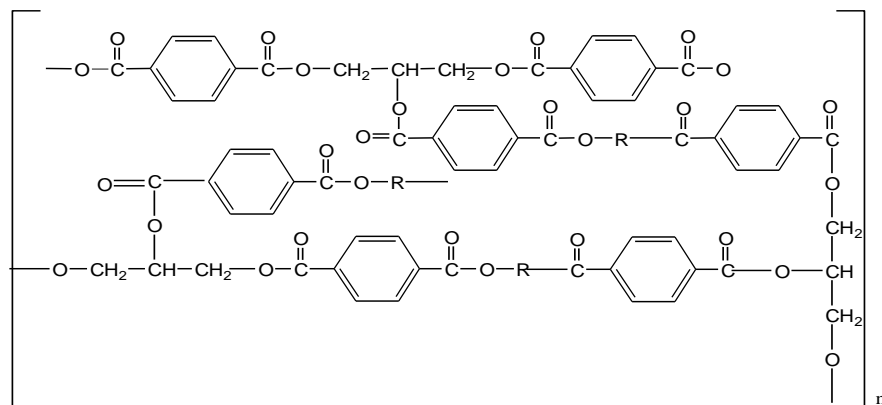
2) за середніми ланками ланцюгів, за типом реакції переестерифікації:



де R – радикал $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$.

Отже, в першу чергу мають піддаватися алкоголізу найбільш довгі молекули і ступінь деструкції прямо пропорційна кількості агенту деструкції, а оскільки реакція має зворотний і рівноважний характер в деякий момент часу починають переважати обмінні реакції, то можливе неповне використання багатоатомного спирту.

Утворення на *третьому етапі* синтезу розгалужених сполук можливо згідно із положеннями, висунутими Флорі [142]. Тривимірні полімери можуть утворюватися двома шляхами, а саме, випадковим сполученням ди- і трифункціональних груп між собою і випадковим перехрещуванням ланцюгів однакової довжини. Цей процес можна зобразити наступною схемою:



Залежно від кількості доданого багатоатомного спирту отримували олігомери з різною молекулярною масою. Зміна молекулярної маси продуктів на різних стадіях алкоголізу ПЕТФ при різному співвідношенні вихідних компонентів наведена в таблиці 3.3. Також доцільно відмітити, що за даними, наведеними в таблиці 3.4, в процесі алкоголізу практично не змінюється кількість карбоксильних груп, а кількість гідроксильних груп прямо пропорційно залежить від вмісту багатоатомного спирту, який вводиться в реакцію.

Таблиця 3.3

Середні молекулярні маси рециклатів ПЕТФ (каталізатор – нафталісульфокислота)

Співвідношення ПЕТФ:БС	Стадії процесу	
	деструкція	обмінні реакції
1:0,5	637	831
1:1	273	336
1:1,4	718	817

Таблиця 3.4

Вплив співвідношення ПЕТФ:БС на властивості отриманих олігомерів (на стадії деструкції)

Співвідношення ПЕТФ:БС	$\tau_{реакц.}$, хв	К.ч., мгКОН/г	Г.ч., мг КОН/г	Число багатоатомного спирту $W_{БС}$, %
1:0,5	15	4,0	432	55,4
1:1	50	4,2	865	34,8
1:1,4	290	4,3	1108	40,9

Досліджено зміну фракційного складу полімеру в процесі алкоголізу при різному співвідношенні вихідних компонентів. ПЕТФ, який використовували як вихідну сировину є монодисперсним полімером з коефіцієнтом полідисперсності ~ 1 . Якщо алкоголіз відбувається за механізмом, наведеним на схемах вище, тоді під час реакції утворюється суміш олігомерів з різною молекулярною масою. Тому для підтвердження механізму цього процесу було доцільно дослідити зміну фракційного складу отриманих продуктів у часі. Для цього проводили фракціонування проб, відібраних протягом різних проміжків часу, методом дрібного та встановлення граничних чисел в'язкості для кожної фракції, за якими були побудовані інтегральні та диференціальні криві розподілу. Зміна фракційного складу полімерів у часі при різному співвідношенні вихідних продуктів ПЕТФ та багатоатомного спирту зображена на рис. 3.19–3.21.

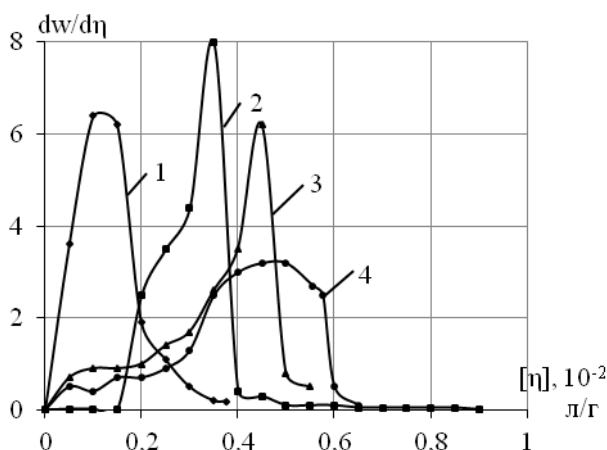


Рис. 3.19. Диференціальні криві розподілу граничного числа в'язкості рециклатів у часі (співвідношення ПЕТФ:БС – 1:1, каталізатор – сечовина (0,05 %), $T = 250$ °С, інертне середовище, перемішування): 1 – $\tau = 75$ хв; 2 – $\tau = 165$ хв; 3 – $\tau = 240$ хв; 4 – $\tau = 415$ хв

Слід відмітити, що на етапі деструкції, незалежно від співвідношення вихідних продуктів, утворюється суміш низькомолекулярних продуктів з граничним числом в'язкості в межах від $0,025 \cdot 10^{-2}$ до $0,1 \cdot 10^{-2}$ л/г. В подальшому, внаслідок протікання обмінних

реакцій відбувається безперервний перерозподіл довжини ланцюгів у часі. Обмінні реакції відбуваються досить глибоко з постійним коливанням граничного числа в'язкості, спочатку в більшу сторону, а потім відбувається розширення розподілу макромолекул, що призводить до зростання коефіцієнта полідисперсності. Зменшення граничного числа після 440 хв перебігу реакції (рис. 3.21) свідчить про деструктивні побічні процеси.

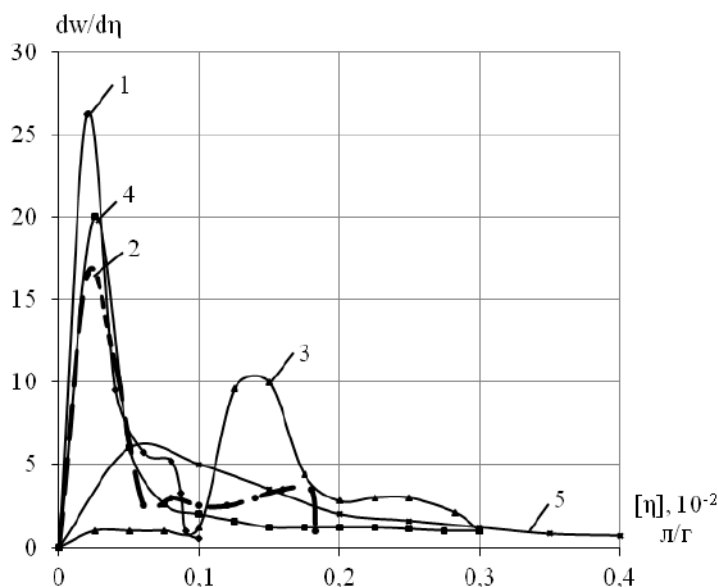


Рис. 3.20. Диференціальні криві розподілу граничного числа в'язкості рециклатів у часі (співвідношення ПЕТФ:БС – 1:1,4, каталізатор – сечовина (0,05 %), $T = 250$ °С, інертне середовище, перемішування): 1 – $\tau = 85$ хв; 2 – $\tau = 305$ хв; 3 – $\tau = 440$ хв; 4 – $\tau = 685$ хв; 5 – $\tau = 865$ хв

Для співвідношення ПЕТФ:БС – 1:1 відбувається поступове нарощування високомолекулярних фракцій. В кінці обмінних реакцій відбувається вирівнювання масових часток олігомерів у суміші, яка характеризується сильно розмитою кривою розподілу, що свідчить про неоднорідність рециклатів.

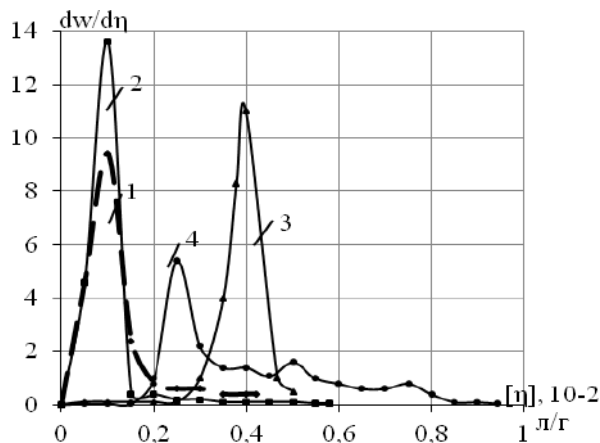


Рис. 3.21. Диференціальні криві розподілу граничного числа в'язкості рециклатів у часі (співвідношення ПЕТФ:БС – 1:0,4, каталізатор – сечовина (0,05 %), $T = 250$ °С, інертне середовище, перемішування): 1 – $\tau = 55$ хв; 2 – $\tau = 125$ хв; 3 – $\tau = 230$ хв; 4 – $\tau = 305$ хв

Як видно, хід цих кривих залежить від співвідношення ПЕТФ:БС: зменшення кількості агенту деструкції сприяє зміщенню граничного числа в'язкості в сторону більших значень та утворення більш однорідних за складом сумішей олігомерів.

Для встановлення складу отриманих продуктів використовували метод ІЧ-спектроскопії. Як це показано на рис. 3.22, для проміжних олігомерів алкоголізу спостерігається поява піку при 1325 см^{-1} , що характеризує валентні коливання ОН-груп вільних спиртів [143]. На спектрах вихідного ПЕТФ і кінцевого продукту алкоголізу цей пік відсутній, що свідчить про те, що з часом перебігу реакції відбувається повне вилучення спиртів (багатоатомного спирту та етиленгліколю) з реакційної суміші.

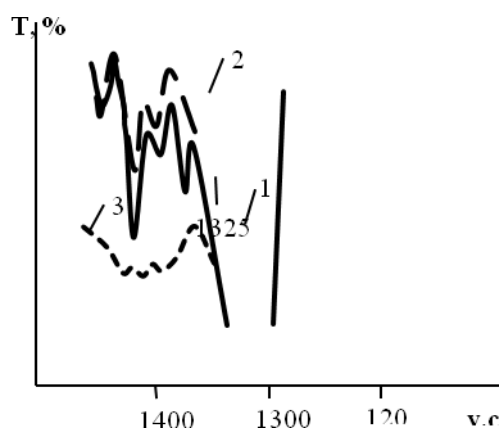


Рис. 3.22. ІЧ-спектр продуктів алкоголізу ПЕТФ:
1 – проміжні рециклати; 2 – кінцеві рециклати; 3 – вихідний ПЕТФ

Як видно з рис. 3.23, в продуктах алкоголізу спостерігається поява піків при 870 см^{-1} та 795 см^{-1} та зникнення піку при частоті 980 см^{-1} . Враховуючи положення, наведені в праці [143], такі зміни характерних частот в ІЧ-спектрах можна пояснити, що при алкоголізі відходів ПЕТФ відбувається частковий перехід полімеру з кристалічного стану в аморфний, який пояснюється явищами поворотної ізомерії.

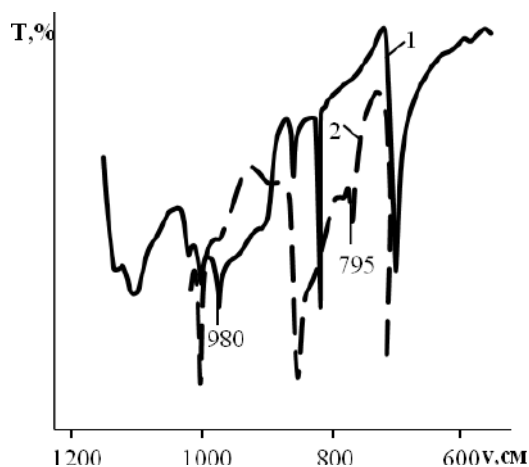


Рис. 3.23. ІЧ-спектр продуктів алкоголізу: 1 – вихідний ПЕТФ; 2 – кінцевий рециклат

Також для встановлення ступеня впорядкованості ПЕТФ та його зміни під час процесу алкоголізу використовували рентгеноструктурний аналіз.

ПЕТФ відходи, залежно від структури полімеру, умовно можна розділити на дві частини, що утворюються в процесі виготовлення: аморфну та орієнтовану складові. Аморфні характеризуються ступенем кристалічності 8–16 %, прозорі, під час нагрівання вище 80 °С змінюють свій колір на білий. Плавляться вони нерівномірно в широкому інтервалі температур (248–254 °С). Аморфна складова найбільш придатна для вторинної переробки, оскільки після подрібнення утворюється матеріал з малою питомою поверхнею та низьким вмістом забруднень.

Орієнтована складова характеризується ступенем кристалічності 35–45 %. У змішаних подрібнених відходах ПЕТФ міститься 40–70 % аморфної складової [144].

Для порівняння структури відходів ПЕТФ до і після переробки були зняті рентгенограми вихідного матеріалу та продуктів, отриманих під час алкоголізу, які наведені на рис. 3.24 та 3.25.

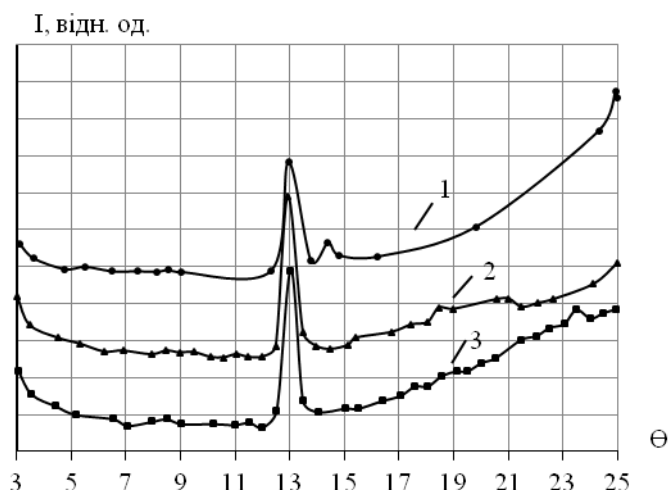


Рис. 3.24. Рентгенограми відходів ПЕТФ: 1 – орієнтована складова ($x_c = 77\%$); 2 – аморфна складова ($x_c = 18\%$); 3 – кінцеві рециклати ($x_c = 20\%$)

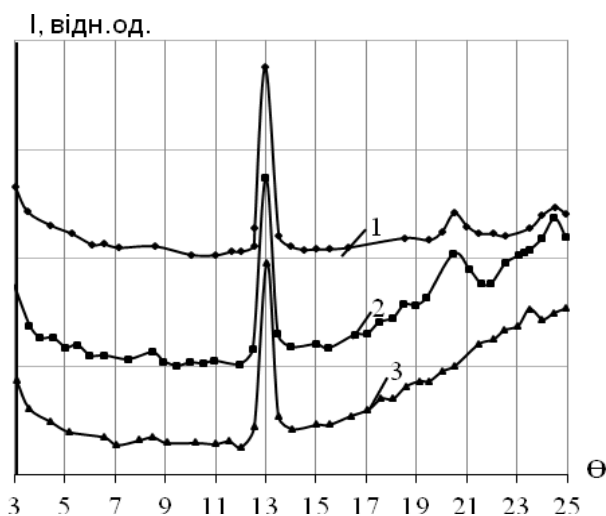


Рис. 3.25. Зміна ступеня впорядкованості олігомерів у часі при алкоголізі відходів ПЕТФ: 1 – $\tau = 30$ хв ($x_c = 16,64$); 2 – $\tau = 435$ хв ($x_c = 18,7$); 3 – $\tau = 675$ хв ($x_c = 20,2$)

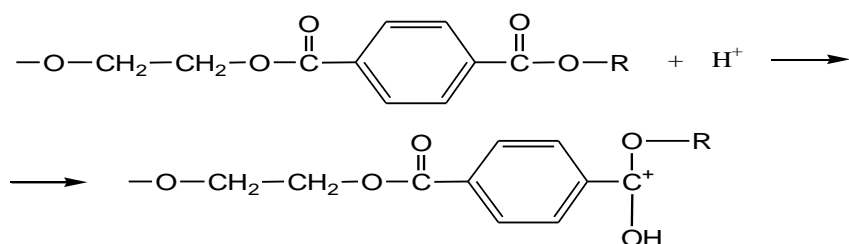
Як показано на рис. 3.24, під час алкоголізу ПЕТФ отримали продукти зі ступенем кристалічності 17–20 %. Така його зміна свідчить про утворення олігомерів аморфної будови, що дозволяє розширити спектр їх подальшого застосування. При цьому, як видно з рис. 3.25, зміна ступеня впорядкованості полімеру відбувається вже на першому етапі реакції і практично не змінюється при подальшому її перебігу.

Таким чином, проведення алкоголізу при різних співвідношеннях вихідних продуктів дозволяє отримувати різні за властивостями продукти, що пояснюється різним ступенем проходження цієї реакції при різній кількості багатоатомного спирту.

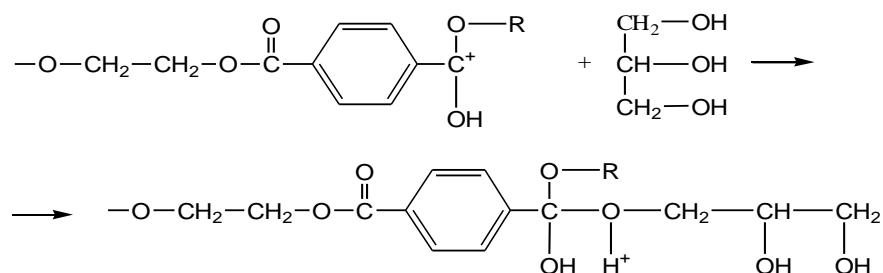
Основні результати наведених досліджень опубліковано в працях [145–147].

Можливо передбачити, що механізм хімічного рециклінгу відходів ПЕТФ буде залежати від типу каталізатора. Механізм дії кислих каталізаторів в процесі алкоголізу пов'язаний з приєднанням протона до естеру і може бути зображений наступною схемою перетворень.

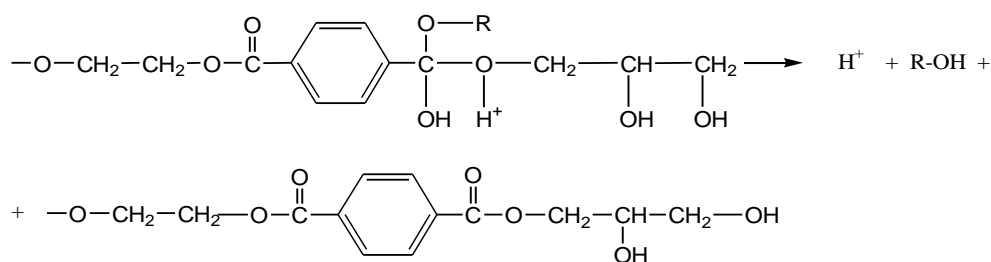
На першому етапі утворюється продукт приєднання протону до поліестеру у місці розриву складноестерного зв'язку:



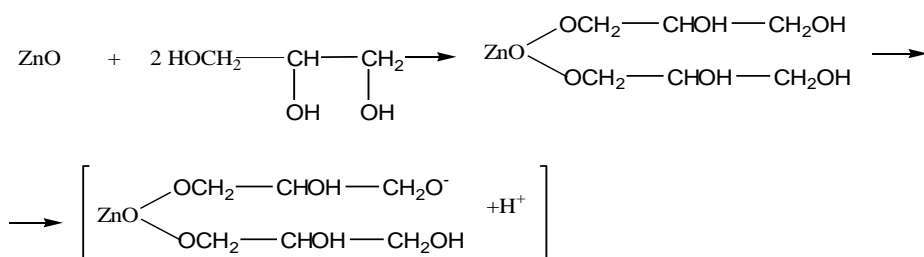
Потім відбувається утворення проміжної сполуки зі спиртовою групою багатоатомного спирту:



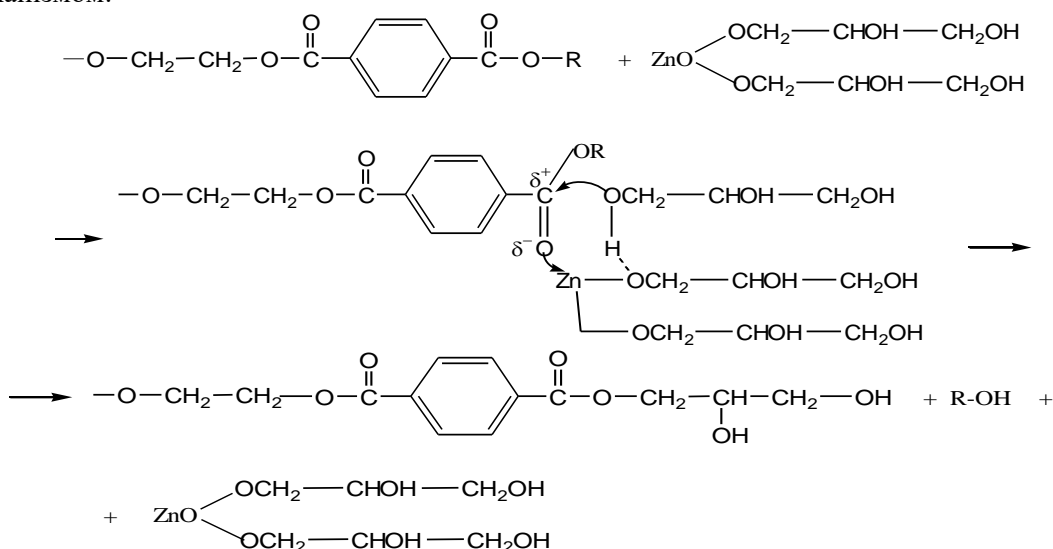
і розпад цього продукту зі звільненням протону і утворенням олігомерів:



У випадку використання в якості каталізатора нейтральних або лужних сполук, каталіз можливо відбуватиметься за лужним механізмом, де на першому етапі можливе утворення іонів за таким механізмом:



Метал, який входить до складу гліколяту, координаційно зв'язується з карбонільним киснем, утворюючи карбонієву структуру. Тому далі процес відбувається за таким механізмом:



де R – радикал $\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—}$.

Запропонована хімічна модель передбачає отримання широкого спектру сполук, від вязкотекучих, до еластичних та склоподібних.

Алкоголіз, де в якості агенту деструкції використовують багатоатомні спирти призводить до отримання зшитих, склоподібних, крихких продуктів при тривалому часі проходження реакції. Ці продукти не здатні до подальшого технологічного застосування. Але, якщо до реакційної суміші на початковому етапі додати одноосновну кислоту, одноатомний спирт, то можливо уникнути желатинізації (утворення тривимірних сполук) за рахунок блокування однієї гідроксильної групи, і тим самим отримати полімер, який розчиняється в органічних розчинниках. Модифіковані поліефіри можуть полімеризуватися при нагріванні на повітрі, утворюючи міцні плівки.

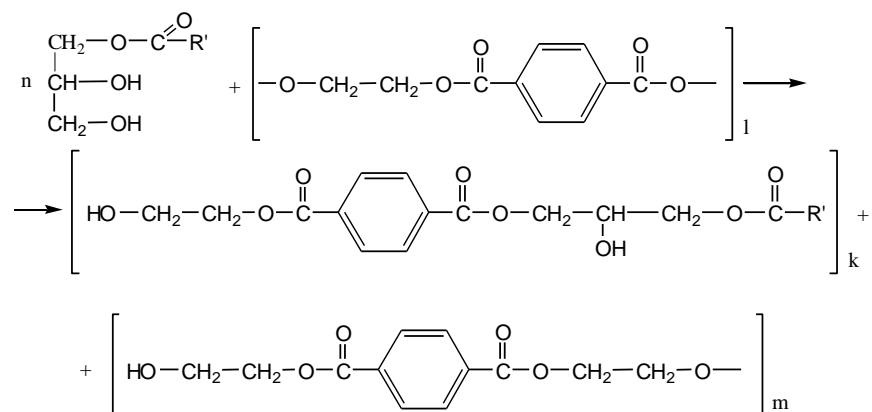
На практиці для отримання алкідних поліестерів використовують висихаючі олії, типу льняної, до яких додають багатоатомний спирт та фталевий ангідрид. Часто проводять попередню реакцію, нагріваючи багатоатомний спирт з оліями, а гліцериди, які при цьому утворились в подальшому, вступають в реакцію з фталевим ангідридом [148].

Алкідні можуть бути отримані також при нагріванні висихаючих олій з багатоатомними спиртами. Властивості таких смол будуть залежати від кількості висихаючого масла, а також від природи багатоосновної кислоти. В процесі етерифікації відбувається деізополімеризація висихаючої олії, яка призводить до отримання більш складних молекул, а іноді і до желатинізації.

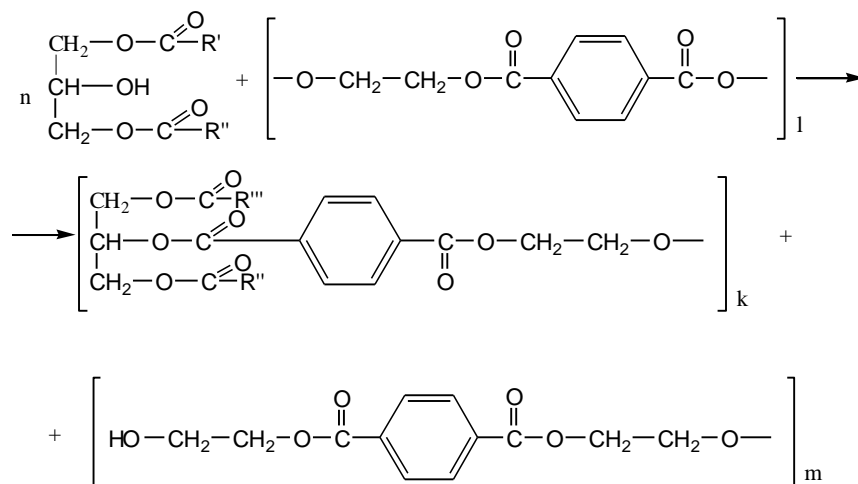
З метою вивчення можливості отримання високоеластичних продуктів проводили дослідження щодо вивчення алкоголізу ПЕТФ багатоатомного спирту у присутності рослинних олій. Враховуючи те, що рослинні олії являють собою гліцериди насичених та ненасичених кислот з великою молекулярною масою, процес проводили у дві стадії за гліцеридним методом.

Перша стадія включала етерифікацію рослинного масла з багатоатомним спиртом. При цьому співвідношення БС:Мод-р складає 1:1 та 1:0,165 (у мольних частках). Процес проводили в реакторі у присутності каталізатора переетерифікації – 0,1 % PbO і нагрівали при 200 °С при перемішуванні протягом 90–120 хв до отримання рівноважної системи, яка складається з моно-, ди- та тригліцеридів та надлишку багатоатомного спирту і розчиняється в етиловому спирті.

На другій стадії до отриманої суміші додавали відходи ПЕТФ у співвідношенні (в мас.ч.): ПЕТФ:БС – 75:25, каталізатор – нафталінсульфокислота (0,05 %). Реакцію проводили при 250 °С, в середовищі інертного газу та при перемішуванні з відбором проб протягом всієї реакції. На цій стадії реакція можливо відбувається за таким механізмом:



або



де R', R'', R''' – радикал жирних насичених та ненасичених кислот, які входять до складу рослинних олій.

Контроль за ходом процесу здійснювали за зміною граничного числа в'язкості і температури розм'якшення у часі (рис. 3.26 та 3.27).

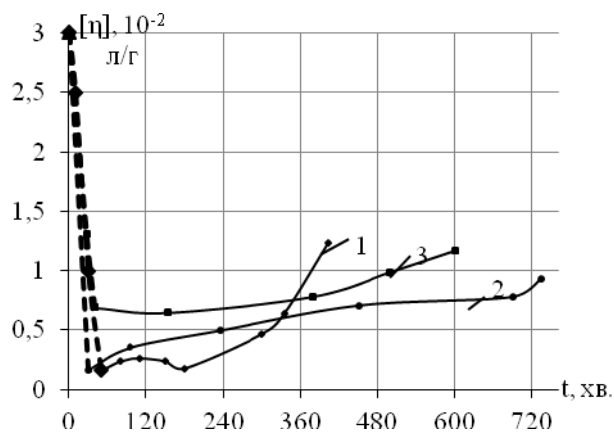


Рис. 3.26. Вплив модифікуючого агента на граничне число в'язкості продуктів гліцеролізу (співвідношення ПЕТФ:БС – 1:1, каталізатор – РbO і нафталісульфокислота, $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, перемішування, інертне середовище):
 1 – без модифікатора; 2 – з модифікатором (співвідношення БС:Модифікатор – 1:3 м.ч.);
 3 – з модифікатором (співвідношення БС:Модифікатор – 1:0,5 м.ч.)

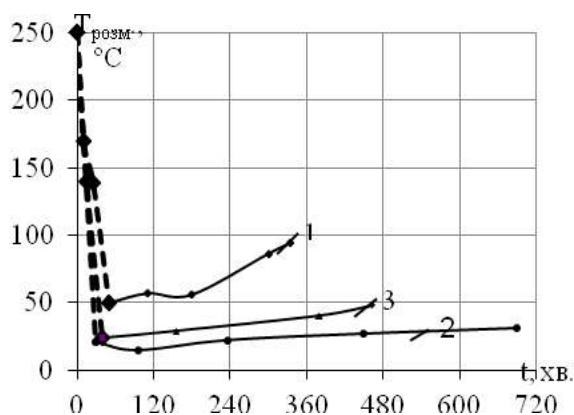


Рис. 3.27. Вплив модифікуючого агента на зміну температури розм'якшення рециклатів (співвідношення ПЕТФ:БС – 1:1, каталізатор – РbO і нафталісульфокислота, $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, перемішування, інертне середовище):
 1 – без модифікатора; 2 – з модифікатором (співвідношення БС:Модифікатор – 1:3 м.ч.);
 3 – з модифікатором (співвідношення БС:Модифікатор – 1:0,5 м.ч.)

Аналізуючи отриманні результати, слід відмітити, що деструкція ПЕТФ під впливом агента алкоголізу відбувається практично за один і той самий проміжок часу (≈ 60 хв), незалежно від наявності у реакційній суміші модифікуючого агента. Лише із зменшенням кількості модифікатора, зменшується глибина процесу деструкції, відповідно, в'язкість в точці мінімуму у такій системі має максимальне значення. Крім того, на етапі переетерифікації в'язкість продуктів, отриманих в присутності рослинних олій, більша від в'язкості продуктів, отриманих при алкоголізі багатоатомним спиртом протягом однакового часу. Це свідчить про те, що в процесі, де агентом деструкції є суміш моно-, ди- та тригліцеридів в ланцюг будуть вбудовуватися радикали жирних насичених кислот з досить великою молекулярною масою [149].

Хід кривих 2 та 3 (див. рис. 3.27) уповільнюється на другій стадії і спостерігається поступове зростання граничного числа в'язкості, а також відсутність різкого стрибка в'язкості, подібного на кривій 1, який вказує на утворення тривимірних сполук. Це дозволяє припустити, що в таких процесах відбуваються обмінні реакції кінцевих груп з утворенням гнучких лінійних поліестерів з досить низькою температурою розм'якшення (рис. 3.27) та високими еластичними і адгезійними властивостями. При чому $T_{розм.}$ зменшується із зростанням кількості модифікатора в системі.

Як видно з рис. 3.28, використання модифікатора в процесі алкоголізу також дозволяє більшою мірою використати багатоатомний спирт для деструкції ПЕТФ і до того ж продукти, які при цьому утворюються, мають молекулярну масу не меншу за тих олігомерів, які отримані в реакції без модифікатора.

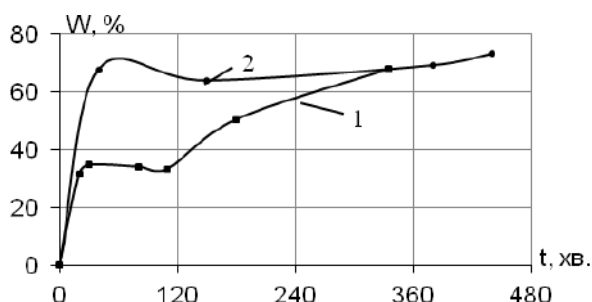


Рис. 3.28. Вплив модифікуючого агента на кількість прореагуваного спирту у часі (співвідношення ПЕТФ:БС – 1:1, каталізатор – PbO і нафталінсульфокислота, $T = 250$ °C, перемішування, інертне середовище):
1 – без модифікатора; 2 – з модифікатором (співвідношення БС:Модифікатор – 1:0,5 м.ч.)

Показано, що реакція алкоголізу відходів ПЕТФ включає три стадії процесу: деструкція ПЕТФ під дією спирту до олігомерів, які містять гліцеридні ланки; обмінні процеси між цими олігомерами та тривимірна поліетерифікація.

Швидкість алкоголізу відходів ПЕТФ залежить від ряду факторів: співвідношення вихідних продуктів (ПЕТФ та БС), каталізатора, температури проведення процесу, технологічних умов (перемішування, інертне середовище, вакуум) та введенням в суміш модифікатора.

Введення каталізатору при алкоголізі сприяє прискоренню процесів: у присутності ZnO та сечовини – стадії деструкції, а при нафталінсульфокислота – обмінні реакції олігомерів. При чому швидкість реакції не залежить від концентрації каталізатора.

Зміна температури процесу від 220 °C до 250 °C призводить до скорочення часу алкоголізу та більш швидкому гелеутворенню сполук.

Проведення процесу при перемішуванні, в інертному середовищі та з вилученням побічних продуктів за допомогою вакууму сприяє скороченню часу обмінних процесів і утворенню високомолекулярних продуктів з високими значеннями температур розм'якшення. Використання в якості агента деструкції суміші моно- та дигліцеридів виключає можливість утворення високомолекулярних зшитих сполук та дозволяє отримувати продукти з високими еластичними властивостями.

Розділ 4.

Розробка технології нанесення полімерів для виробів легкої промисловості

4.1. Аналіз обладнання для нанесення покриття

Покриття являють собою поверхневий шар деталі, спеціально створений з певними фізико-механічними характеристиками, і який характеризується певною товщиною, хімічним складом і структурно-фазовим станом, що якісно відрізняється від аналогічних характеристик матеріалу основи. Великий вибір матеріалів, що використовується для створення покриттів, дозволяє отримати різноманітні задані властивості шару для будь-яких поверхонь. Однак доцільність нанесення не завжди економічна виправдана. Це пов'язано зі складністю нанесення даних покриттів, складних технологічних процесів або іншими чинниками.

Існують різноманітні способи нанесення покриттів, які можна класифікувати з різних позицій. За методами отримання: механічні, фізичні, хімічні, електрофізичні; за виглядом технологічного процесу – гальванічні, вакуумні, наплавлення. Покриття розрізняють за матеріалами – металеві, керамічні, полімерні; за виглядом (станом) матеріалів внесення покриттів в твердому (дисперсному) стані; нанесення покриттів у рідкій фазі (емульсії, суспензії, фарби, шлікер); нанесення покриттів з газів або газових сумішей. Можна розглядати покриття і за їх призначенням – зносостійкі, корозійно-стійкі, жаростійкі, декоративні тощо.

Найбільш послідовну класифікацію способів нанесення покриттів слід наводити з урахуванням механізмів та явищ, що лежать в основі процесів нанесення покриттів і формують їхню структуру: механічні, хімічні, електрохімічні та комбіновані методи, наплавлення, напилювання, високоенергетичні технології[151].

Нанесення шару полімерного матеріалу на тканину надає нові характеристики до базової тканини. Отриманий матеріал з покриттям може мати функціональні властивості, такі як стійкість до забруднення, проникнення рідин тощо, або готові вироби зі шкіри можуть мати зовсім іншу естетичну привабливість.

Наукові основи різних методів нанесення покриттів досить відомі, але не вивчені досить глибоко. Це пов'язано зі складністю кожного фізико-хімічного процесу, зі специфічними особливостями методів і рівнем наукових досліджень для кожного з них [151, 152].

Наведемо різні методи нанесення покриттів:

1. Рідке нанесення покриття: матеріал покриття у вигляді пасти, розчину або латексу:

– ніж для нанесення покриттів, дротяні бари, круглий прокат тощо – це після-підготовчі пристрої;

– пристрої для нанесення покриттів рулонні, зворотні нанесення покриттів роликками, поверхневе та глибоке нанесення покриттів, DIP-нанесення та ін. – це перед-підготовчі прикладні системи;

– просочення: матеріал покривається, коли його занурюють у рідину і надлишок видаляють з рулону стисненням або за допомогою ракелів;

– нанесення покриттів розпиленням: матеріал розпорошується безпосередньо на місці або на тканину, що подається в рулоні.

2. Покриття з сухим з'єднанням (твердий порошок або плівки):

– розтоплення покриття: екструзія покриття, порошкове покриття і т.д.;

– каландрування: для термопластичних полімерів і гумових сумішей, Zimmer-процесу і т.д.;

– розшарування.

Вибір способу нанесення покриття залежить від декількох факторів: типу підкладки, формули полімеру та його в'язкості для нанесення покриття, бажаного кінцевого продукту і точності покриття, економії процесу.

Крім того, існують різні способи нанесення покриття, основані на застосуванні полімеру до текстилю. Вони можуть бути класифіковані за типом устаткування, вико- ристовуваним методом, обліком та формою покриття.

Аналіз відомих методів дозволив нам розробити класифікацію способів нанесення матеріалу на підкладку.

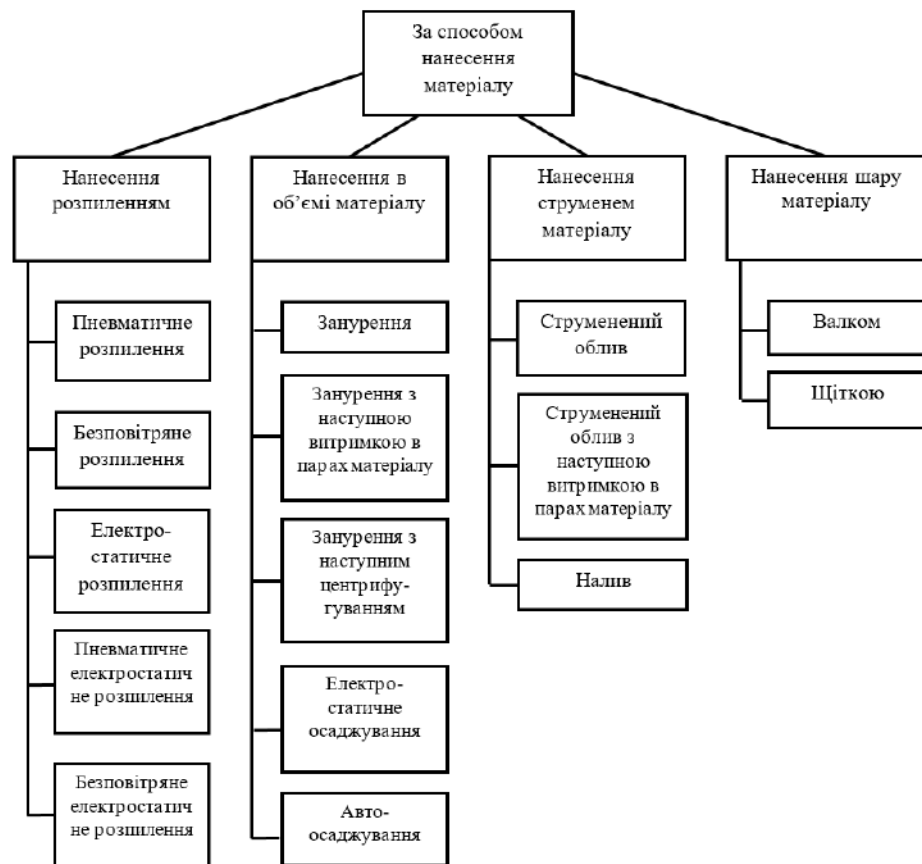


Рис. 4.1. Класифікація методів нанесення покриття

Аналіз цих способів нанесення показує, що в умовах сучасних підприємств для нанесення полімерних покриттів доцільним є використання способу нанесення розпиленням через те, що валковий та щітковий способи не дають можливості оперувати з

різними формами деталей, а об'ємне нанесення не завжди економічно доцільне. Струменеве нанесення матеріалу подібне до розпилення, але для полімерних покриттів важливим є значення температури, яке в цьому випадку важко контролювати. Тому для нанесення полімерних покриттів доцільним є використання способу розпиленням.

Пошукові дослідження, попередній аналіз нанесення полімерів та вивчення їхніх характеристик (результат зображено на рис. 4.2) показав, що для якісного нанесення прийнятний температурний режим полімеру є в межах 150–160 °С

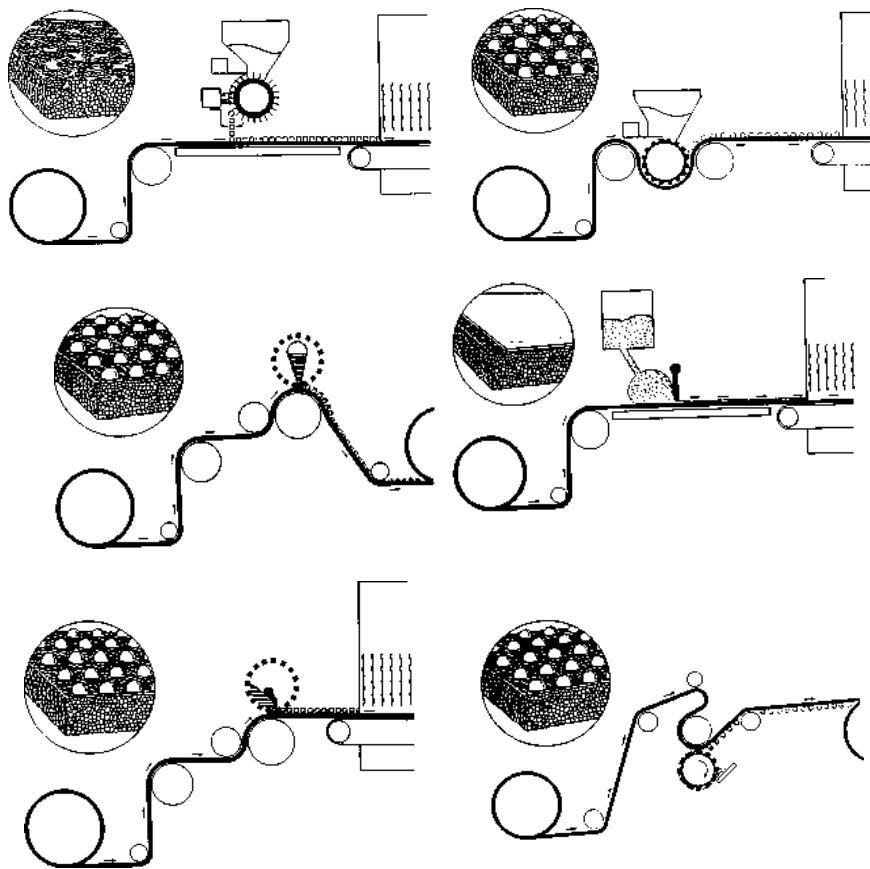


Рис. 4.2. Способи нанесення полімерних плівок та їх фактури

Текстильні матеріали здатні витримувати температуру до 200 °С, що накладає певні обмеження на виконання операції нанесення полімерного матеріалу, якій треба нагріти до температури плавлення. Прямий контакт розігрітого полімеру з матеріалом фактично неможливий. Тому потрібно підібрати такий метод нанесення та визначити його технологічні параметри, який забезпечить якість нанесення зі збереженням структури матеріалу.

З огляду на сучасні способи нанесення (рис. 4.2), очевидно, що всі вони розраховані для роботи з рулонними матеріалами. Для нанесення полімеру на окремі деталі різних форм вони малопродуктивні. Для таких випадків найбільш ефективним є зонне нанесення покриттів методом розпилення, що дозволяє обробляти тільки вибрану ділянку матеріалу [153–155]. Крім того, розігрітий полімер при валковому методі нанесення впресовується в структуру матеріалу, що може призвести до деформації останнього. Порівняльні характеристики зведені до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Порівняльні характеристики методів нанесення

Параметр	Метод нанесення		
	Валковий	Ракельний	Розпилення
Зона нанесення	За розміром валка	За розміром ракеля	За розміром фекала розпилення
Форма нанесення	Лінійна	Лінійна	Довільна
Товщина нанесення шару полімеру	Частково регульована, залежить від полімеру	Регульована	Регульована
Глибина проникнення в структуру матеріалу	Залежить від в'язкості полімеру, сили притискання та стійкості форми матеріалу	Залежить від в'язкості полімеру	Залежить від в'язкості полімеру і швидкості розпилення

З аналізу даних таблиці 4.1 видно, що розпилення – найбільш прийнятний метод нанесення розплавленого полімеру на поверхню текстильного матеріалу, при цьому можливо контролювати як товщину нанесення, так і глибину проникнення полімеру в структуру тканого матеріалу. Вплив температури на вибір методу нанесення показано на рис. 4.3. Полімерний клей для переведення його в текучий стан треба нагріти не менше ніж 180 °С.



Рис. 4.3. Вибір методу нанесення по температурному признаку

Враховуючи температуру плавлення полімеру, що наноситься методом розпилення, та граничне допустиме значення нагріву матеріалу, слід визначити гранично допустимі значення технологічної операції.

4.1.1. Машина для фарбування текстильних виробів

Машина належить до області фарбування текстильних виробів в рідині і може бути використана на підприємствах текстильної промисловості та побутового обслуговування населення [156].

Поставлено завдання створити таку машину для фарбування текстильних виробів, в якій використаний один бак, а також додаткові елементи, що забезпечують виконання операції сушіння текстильних виробів з одночасною підготовкою рідини для фарбування для власне операції фарбування, що дозволяє підвищити продуктивність машини завдяки операції перевантаження виробів. Задача вирішується таким чином, що машина для фарбування текстильних виробів містить установлений у корпусі з можливістю обертання перфорований барабан, систему підготовки рідини для фарбування, бак з підгрівом, систему циркуляції, засіб для сушіння виробів, який подається до перфорованого барабана через трубопровід подачі пари, при цьому система підготовки рідини для фарбування має дозатор подачі полімеру.

Машина для фарбування текстильних виробів (рис. 4.4) містить встановлений в корпусі 16 з можливістю обертання перфорований барабан 17 для виробів, що з'єднується з корпусом, систему підготовки рідини для фарбування, що має бак 18 з підгрівом, систему циркуляції, що включає клапани і насос 19, і трубопровід подачі пари. Машина містить засіб для сушіння виробів, що з'єднується з перфорованим барабаном 17 і з трубопроводом подачі пари, при цьому система підготовки рідини для фарбування має дозатор 20 барвника, з'єднаний з баком 18, який в свою чергу сполучається з корпусом 16 через систему циркуляції, який виконаний у вигляді барабана.

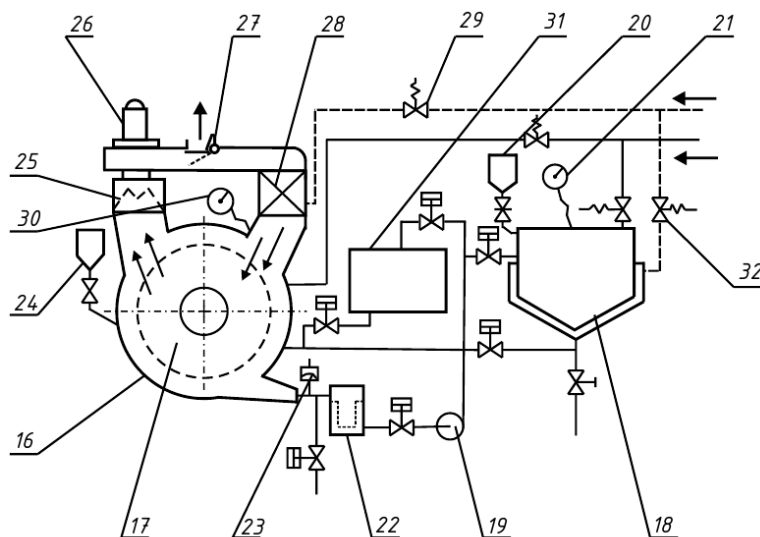


Рис. 4.4. Машина для фарбування текстильних виробів

Система підготовки рідини для фарбування має бак 18 з підгрівом, у верхній частині якого встановлено дозатор 20 і регулятор температури 21 нагріву рідини. Система циркуляції містить насос 19, фільтр 22, регулятор рівня рідини 23 в корпусі 16 і клапани. Корпус має дозатор рідини 24.

Засіб для сушіння складається з послідовно встановлених уловлювача 25, вентилятора 26, шиберу 27 і калорифера 13. Трубопровід подачі пари з клапанами 29 забезпечує нагрів повітря, що подається, і викид в атмосферу парів, що утворюються при сушінні текстильних виробів після їх фарбування.

Процес сушіння контролюється регулятором температури 30. Для додаткової обробки виробів, а також для повторного використання фарбувального розчину машина оснащена баком 31, з'єднаним з корпусом 16. Для забезпечення виконання технологічного процесу фарбування виробів усі ємності машини з'єднані системою трубопроводів, що містить запірну арматуру. Машина працює наступним чином.

Текстильні вироби, які підлягають фарбуванню, завантажуються у внутрішній барабан 17, в якому відбуваються технологічні операції. Барабан 17 має змінну швидкість обертання. Рідина для фарбування виробів готується у нагрівальному баку 18 при подачі пари в парову оболонку, що дозволяє строго дотримуватися розрахункового режиму дозування барвника, який подається з дозатора 20 безпосередньо в бак. При досягненні заданої температури, яка регулюється регулятором температури 30, рідина для фарбування подається в корпус 16.

Для поліпшення якості фарбування і підтримки постійної температури в барабані відбувається періодична циркуляція рідини для фарбування за схемою: корпус 16, фільтр 22, помпа 19, бак 18 з підігрівом, корпус 16.

На початку роботи машини температура барабана та текстильних виробів нижча від температури рідини для обробки виробів, тому для скорочення втрат часу на досягнення необхідної температури проводиться подача гарячого повітря в барабан із сушильної установки вмиканням вентилятора 26 і відкриттям клапана подачі пари 27 в калорифер 28. Ці операції виконуються не тільки в початковий період роботи машини, а й на подальших етапах технологічного циклу обробки текстильних виробів для стабілізації температурного режиму в барабані.

Після виконання технологічного процесу фарбування вмикається режим зливу рідини і віджиму текстильних виробів, при перемиканні приводу барабана (на кресленні не показано) в режим віджиму. Після цього відкривається клапан подачі пари 32 в калорифер 28, вмикається вентилятор 26 і відбувається сушіння виробів по замкнутому контуру з періодичним включенням шиберу виходу парів в атмосферу. Процес сушіння контролюється регулятором температури 30, встановленим на вході гарячого повітря в барабан.

4.1.2. Пристрій для розпилення рідин

Пристрій відноситься до техніки диспергування і може знайти застосування в порошковій металургії та процесах хімічної промисловості [157]. Пристрій, який реалізує цей спосіб, складається з розпилювальної камери, системи дозованої подачі розпилювальної рідини, привода обертового руху і ротора, закріпленого на швидкохідному валу привода. Для турбулізації плівки рідини на периферії ротора встановлені спеціальні лопатки.

При колових швидкостях (~50 м/с) в цьому пристрої отримується яскраво виражене нерівномірне розпилення, коли факел розпилення складається з основної групи великих крапель та більш дрібних, які осідають ближче до розпилювального ротора. При зростанні швидкості обертання неоднорідність розпилення зменшується, тому найчастіше розпилення роторами різних конструкцій ведуть при колових швидкостях в інтервалі 90–140 м/с.

Висока продуктивність розпилення, простота конструкції та низька вартість затрат на її експлуатацію є позитивними властивостями описаного способу та механічного розпилювача для його реалізації. Принциповим недоліком роторних (дискових) розпилювачів є складність отримання монодисперсного розпилення з середнім діаметром крапель менш як 30–40 мкм, бо це досягається тільки при високих колових швидкостях (~300 м/с), тобто при швидкостях, близьких до утворення ударних хвиль у повітрі.

Збільшення частоти обертання для одержання швидкостей ~300 м/с та > 300 м/с потребує якісного статичного і динамічного балансування, наявності спеціальної системи

змащування та пристрою для плавного запуску ротора в обертовий рух. При таких швидкостях проявляються ефекти (флатер), які приводять до руйнування ротора.

Технічна задача, яка вирішується за допомогою запропонованого способу розпилення рідин і пристрою для його реалізації, зводиться до одержання мінімальних розмірів подрібнених частинок рідини шляхом досягнення максимальної різниці швидкостей отриманих аерозолів і довкілля.

У пристрої для розпилення рідин, який має систему дозованої подачі розпилюваної рідини, розпилювальну камеру, привод обертового руху і ротор, технічна задача вирішується тим, що додатково розпилювальна поверхня ротора виконана з консольно закріплених обтічних профілів, виготовлених з гнучких витих багатожильних елементів, наприклад, зі сталевих канатів, а на консолі виконані за кількістю обтічних профілів напрямні, що охоплює відповідний профіль, причому розпилювальна камера містить рециркуляційний канал.

Обертання ротора з частотою, яка забезпечує швидкість обтікання периферії обтічних профілів дозволяє одержувати заданий середньомедіанний розмір розпиленних частинок d внаслідок дії аеродинамічного потоку обтікання.

Генерування по коловій траєкторії локальних об'ємів змінного тиску породжує інтенсивні акустичні хвилі і місцеві потоки газу, що приводять до покращення подрібнення крапель рідини. Генерування локальних об'ємів змінного тиску забезпечується зміною граничних умов обтікання та коливаннями периферії обтічних профілів. Спрямування розпилюваної рідини безпосередньо в зону змінного тиску приводить до швидкого руйнування струменя рідини і покращення розпилення.

Захоплений периферією ротора аеродинамічний потік приводить в рециркуляційний рух для створення умов виникнення ударних хвиль і забезпечення максимальної різниці швидкостей крапель рідини і навколишнього газового середовища. У випадку, коли швидкості захопленого газового потоку і периферії обтічних профілів близькі, стрибки тиску газу не утворюються. Приведення захопленого ротором аеродинамічного потоку в рециркуляційний рух, наприклад, відведення від периферії камери газу в центр розпилювальної камери приводить до зменшення обертового руху газу в камері і, відповідно, виникають умови для одержання стрибків тиску. Стрибки тиску, газу (ударні хвилі) значно покращують ефективність диспергування в'язких рідин і розплавів.

Формування в пристрої розпилювальної поверхні ротора з консольно закріплених обтічних профілів, виготовлених з гнучких витих багатожильних елементів, наприклад, зі сталевих канатів забезпечує можливість генерування локальних об'ємів змінного тиску великої інтенсивності без виникнення аеродинамічної нестійкості на швидкостях, які дозволяють отримати задану дисперсність. При жорсткому роторі на великих швидкостях обтікання в такому режимі роботи виникав би флатер, що привело б до руйнування ротора.

Наявність рециркуляційного каналу в розпилювальній камері дозволяє зменшити швидкість закручування газу в камері та створити умови для виникнення локальних зон змінного тиску. Приведення аеродинамічного потоку, захопленого розпилювальною поверхнею ротора, в рециркуляційний рух дозволяє забезпечити максимальну різницю швидкостей подрібнених аерозольних частинок і довкілля в камері розпилення, а тому приводить до покращення якості диспергування.

На рис. 4.5 наведена конструктивна схема пристрою для реалізації способу розпилення рідин; на рис. 4.6, *a* – просторова розгортка розпилювальної поверхні ротора при числах Маха $M = 0,7...1$; на рис. 4.6, *б* – та сама розгортка при числах Маха $M = 1...1,2$. Спосіб реалізується пристроєм (див. рис. 4.5), який містить привод обертового руху 33, ротор 34, на якому консольно закріплені гнучкі обтічні профілі 35, завантажувальну ємність 36, систему дозованої подачі рідини 37 і сопло 38, яке розміщене над площиною обертання обтічних профілів 35 і живиться від завантажувальної ємності 36.

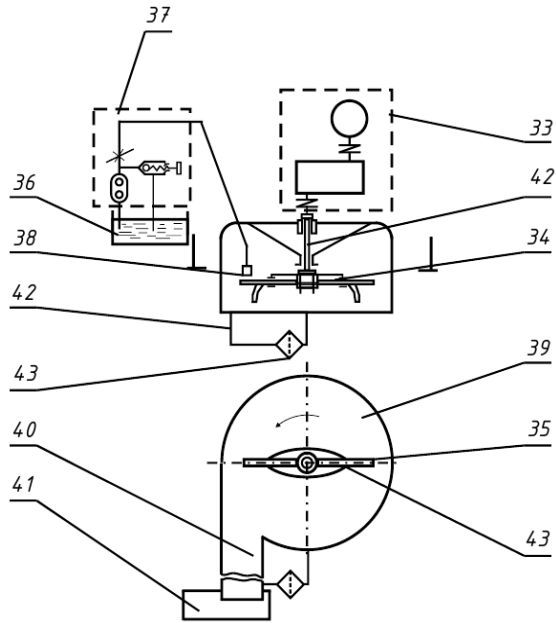


Рис. 4.5. Пристрій для розпилення рідин

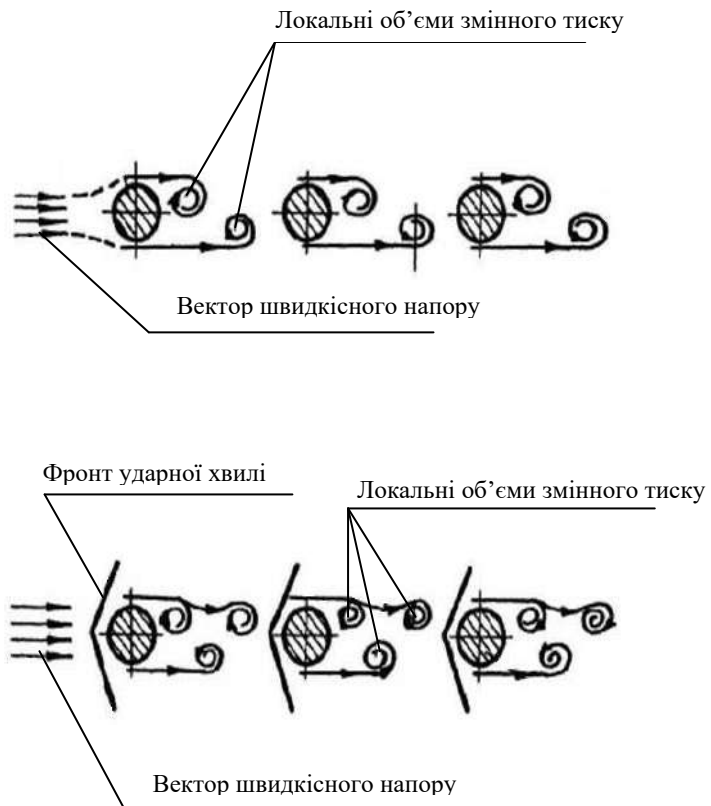


Рис. 4.6. Ударна хвиля при русі периферії обтічних профілів з надзвуковою швидкістю відносно газового середовища

Привод 33 монтується на розпилювальній камері 39. В зоні розпилення вона граничить з тангенціально встановленим газоходом 40, який з'єднується з бункером-накопичувачем 41. Периферійна частина газоходу за допомогою рециркуляційного каналу 42 з'єднана з центральною частиною розпилювальної камери 39. Для зменшення інерційного виносу диспергованої рідини в рециркуляційному каналі 42 встановлений фільтр 43. Ротор 34 кріпиться на швидкохідному валу 44 привода обертового руху 33. На периферії ротора виготовлені напрямні 45, які виконують роль допоміжних опор для консольно закріплених обтічних профілів 35. Кожна напрямна 45 охоплює відповідний обтічний профіль 35 і утворює спряження по посадці із зазором. Ротор 34 виготовлений із встановлених в одній площині парної кількості кронштейнів. В цьому конкретному виконанні є два кронштейни у вигляді одного двоплечого важеля, центрованого по циліндричній поверхні швидкохідного вала 44. Обтічний профіль 35 кріпиться до ротора 34 за допомогою клемового затискача болтовим з'єднанням. Форма поверхні каналу напрямних 45 вибирається такою, щоб при згині обтічний профіль 35 обкочував напрямну без проковзування.

Обтічний профіль 35 виготовляється з гнучких витих багатожильних елементів (сталю каната). Така швидкість газового потоку обтікання дозволяє отримувати задану дисперсність розпилу рідини d . Шляхом змін граничних умов обтікання обтічних профілів і їх коливань генерують по коловій траєкторії рухомі локальні об'єми змінного тиску. Після чого подають розпилювану рідину в зони змінного тиску. Аеродинамічний потік, захоплений периферією ротора, приводять, в рециркуляційний рух з периферії розпилювальної камери до центру. Сукупність таких дій приводить до утворення в розпилювальній камері інтенсивних акустичних хвиль, ударних хвиль і локальних течій газу, які руйнують струмінь рідини на краплі з мінімальним розміром.

Робота пристрою для розпилення рідин зводиться до наступного. Привод 33 забезпечує плавний запуск і наступний обертовий рух швидкохідного вала 44 і ротора 34. В полі відцентрових сил обтічні профілі 35, які до початку руху під дією власної ваги звисали поза напрямними 45 (див. рис. 4.6), розпрямляються в площині обертання.

Крім локальних об'ємів змінного тиску при русі периферії обтічних профілів з надзвуковою швидкістю відносно газового середовища перед кожним обтічним профілем 35 (див. рис. 4.6, б) може виникати ударна хвиля, яка інтенсифікує процес подрібнення рідини. Одночасна дія газового потоку обтікання обтічних профілів, акустичних та ударних хвиль на рідину дозволяє ефективно подрібнювати краплі та отримувати заданий монодисперсний розпил рідини. Розпилені частинки по газоходу 40 поступають в бункер-накопичувач 41, аеродинамічний потік через рециркуляційний канал повертається в центральну частину розпилювальної камери 39, де захоплюється ротором і процес повторюється. Фільтр 43, встановлений в рециркуляційному каналі, не дає можливості подрібненим частинкам повернутись в зону розпилення.

4.1.3. Пневматичний пристрій для розпилення

В основу корисної моделі покладене завдання зменшення витрачання стисненого повітря та розширення діапазону використання пристрою для в'язких рідин і розчинів [158].

Для вирішення завдання запропоновано пристрій, який складається з корпусу, порожнини для тангенційного підведення стисненого повітря та циліндричної трубки, по якій подається рідина на розпилення. Циліндрична трубка оснащена на виході наконечником, внутрішня поверхня якого має сферичну форму, а зовнішня – утворює зі вставкою регульований кільцевий прозір пристрою. При цьому сферична поверхня наконечника має низький коефіцієнт тертя, а зовнішня поверхня наконечника і внутрішня поверхня вставки мають кільцеві виступи і перед наконечником на трубці встановлений шнековий завхрювач. Сферична форма внутрішньої поверхні наконечника дозволяє розподіляти тиск та

дотичну напруженість (коефіцієнт тертя) потоку по боковій поверхні, що приводить до зміни поля швидкостей потоку та створення зони відриву розпилювальної рідини.

Низький коефіцієнт тертя сферичної поверхні наконечника дозволяє суттєво розширити діапазон використання пристрою для в'язких рідин та розчинів, тому що при цьому різко підвищується сила «підсмоктування».

Наявність виступів на зовнішній поверхні наконечника і на внутрішній поверхні вставки, а також встановлення шнекового завихрювача збільшує відносну швидкість повітря, яке виходить з сопла. Крім того, шнековий завихрювач дозволяє підтримувати співвісність корпусу та циліндричної трубки. На рис. 4.7, *а* показаний загальний вигляд, на рис. 4.7, *б* – повздовжній розріз пристрою.

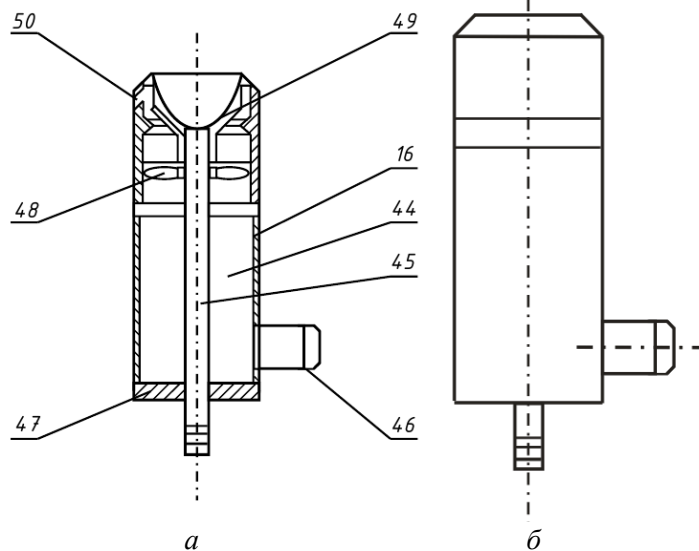


Рис. 4.7. Пристрій для розпилення рідини: *а* – загальний вигляд; *б* – повздовжній розріз

Пневматичний пристрій для розпилення складається з корпусу 16, порожнини для тангенційного підведення стисненого повітря 44, циліндричної трубки 45, по якій подається рідина на розпилення, штуцера подавання стисненого повітря (газу або пара) 46, денця 47, шнекового завихрювача 48, наконечника 49 та вставки 50.

Пристрій працює таким чином. Стиснене повітря (газ або пар) по тангенційному патрубку 46 подається в порожнину 44, створену внутрішньою стінкою корпусу 16, зовнішньою поверхнею циліндричної трубки 45 та денцем 47. Далі, після проходження шнекового завихрювача 48, надходить в простір, утворений зовнішньою поверхнею вставки 50. Вона має можливість осевого переміщення, при цьому змінюється зазор між виступами на поверхнях наконечника та вставки, а також регулюється вихідний отвір форсунки, що дозволяє міняти кореневий кут факела розпилення рідини.

Розпилювальна рідина (суспензія або емульсія) подається по циліндричній трубці 45. На виході з неї рідина надходить на внутрішню поверхню сферичної форми наконечника 49. На такій сферичній поверхні градієнт тиску рідини в напрямку осі потоку надто малий, що обумовлює тонкошаровий (плівковий) рух потоку до зрізу сфери для захвата розпилювальної рідини закрученим потоком повітря з вихідного отвору форсунки. Розпилення тонкошарової рідини завжди значно ефективніше, ніж розпилення суцільної циліндричної струмینی. Випробування дослідного зразка «пневматичного пристрою для розпилення» показали, що витрати стисненого повітря (газу або пари) зменшилися на 54–72 %. Розмір краплин при розпиленні – 3–100 мкм.

4.1.4. Форсунка для розпилення рідини

В основу корисної моделі покладено завдання підвищення продуктивності, зручності в роботі, поліпшення якості розпилення [159].

Для вирішення завдання запропонована форсунка для розпилення рідини, що має корпус, який в свою чергу – вхідну порожнину з вхідним отвором і вихідну порожнину. Її внутрішня поверхня виконана конусною, а на вершині розташований вихідний отвір. Крім того, форсунка має конусну вставку, яка виконана з можливістю від'єднання від вихідної порожнини, у якій, відповідно до корисної моделі, вхідна порожнина розташована під кутом 20–90° до вихідної, а вхідний отвір зміщений відносно осі вхідної порожнини на половину її внутрішнього діаметра (рис. 4.8). Для підвищення надійності з'єднання внутрішня поверхня вхідної порожнини виконана конусною. Для зовнішнього розпилення, тобто, коли форсунка використовується не для опалення чи в двигунах, корпус і вставка форсунки виконані з полімерного матеріалу. На рис. 4.9 показаний розріз форсунки для розпилення.

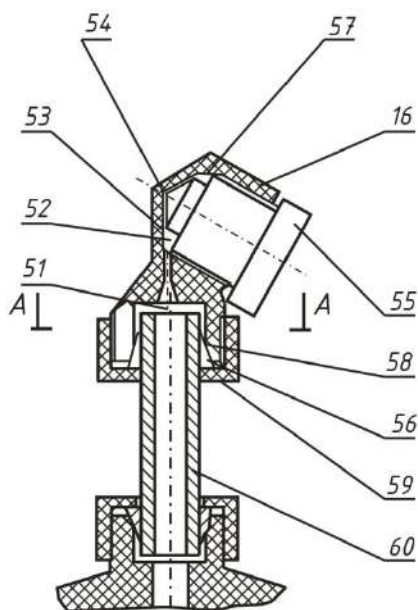


Рис. 4.8. Форсунка для розпилення рідини

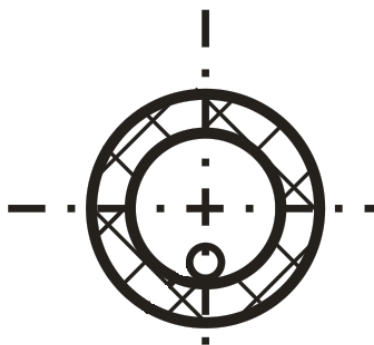


Рис. 4.9. Розріз А–А

Форсунка для розпилення рідини (див. рис. 4.8), містить корпус 16, який має вхідну порожнину 51 з вхідним отвором 52, вихідну порожнину 53, внутрішня поверхня 54 якої виконана конусною, на вершині якої розташований вихідний отвір 55, а також конусну вставку 56, яка виконана з можливістю від'єднання від вихідної порожнини 53, Вхідна порожнина 51 розташована під кутом 20–90° до вихідної 53, а вхідний отвір 52 зміщений відносно осі вхідної порожнини 51 на половину її внутрішнього діаметра. Внутрішня поверхня 57 вхідної порожнини 51 може бути виконана конусною.

Конусна вставка 56, що своїм торцевим виступом упирається в конусну поверхню 58 вихідної порожнини 53, і між конусом вставки 56 і внутрішньою конусною поверхнею 54 у вихідній її частині утворюється зазор t (0,2–0,4 мм). Об'єм камери закручування розчину, сформований у форсунці вставки 56, можна поділити на три частини: 1) вхідну; 2) конусне потоншення потоку без його зменшення шляхом підвищення швидкості витоку біля вершини конуса вставки; 3) випуск. Завдяки малому об'єму камери, і тому, що вхідний потік прямує по осі тороїда вхідної частини (поперечний перетин вхідного отвору

і тороїда приблизно однакові) змішування всередині камери немає і потік у форсунці повертається та розпилюється з мінімальними гідровтратами. Різьбова вставка дозволяє легко очищати форсунку і потім надійно її ущільнювати. У форсунці для зовнішнього обприскування в її внутрішній конус накладною гайкою 59 втягується конусна втулка 60, насаджена щільно на полімерну трубку 12. Це дозволяє в оприскувачах замість розвальцьованих металевих трубок використовувати дешеві полімерні. Форсунку накладною гайкою з'єднують з трубкою 12. Трубка накладною гайкою з'єднується з помпою, яка подає рідину для розпилення.

4.2. Аналіз полімерних композицій з можливістю розпилення

Використання органічних покриттів як і раніше залишається важливим засобом боротьби з корозією. Полімерні покриття не лише захищають метали від впливу агресивних середовищ, але й підвищують їхню зносостійкість, збільшуючи адгезію робочих поверхонь, дозволяють економити кольорові метали та інші дефіцитні матеріали. У приладобудуванні для захисту внутрішніх поверхонь апаратів, приладів і арматури застосовуються вінілхлоридні, фторопластові, пентапластові, поліолефінові, поліуретанові, феноло-формальдегідні, кремнійорганічні, каучукові, епоксидні та інші покриття.

Поліолефінові покриття. До найбільш поширених поліолефінів відносять поліетилен, поліпропілен та їх сополімери. Покриття з поліолефінів відрізняються високою хімічною стійкістю до багатьох агресивних середовищ. Поліетилен використовують як пакувальний матеріал для зберігання продуктів і отримання антикорозійних покриттів. Властивості поліетилену і поліпропілену практично не змінюються від впливу концентрованими соляною і сірчаною кислотами при 20 °С, а також розчинами лугів. Проте органічні розчинники при кімнатній температурі викликають деяке набрякання, а при температурах вище 100–120 °С розчиняють поліолефіни. Поліолефіни мають низьку проникність стосовно рідких і газоподібних агресивних середовищ. Поліолефіни використовуються для нанесення покриттів майже усіма відомими методами, включаючи напилювання порошкоподібних полімерів, плакування плівками і листами, футерування литвом під тиском, а також формування покриттів з дисперсій у водноорганічних середовищах.

Поліаміди. До поліамідів відносять капрон і капролон. Покриття з поліамідів мають високі антифрикційні характеристики. За зносостійкістю при сухому і рідинному терті поліаміди перевершують не лише інші класи полімерів, але й багато металів, що застосовуються в антифрикційних цілях. Низький коефіцієнт тертя при високих навантаженнях дозволяє використати поліаміди у важконавантажених вузлах тертя, про що свідчать коефіцієнти тертя покриттів з поліамідів при терті з мастилом по сталі. Недоліком поліамідних покриттів є схильність до старіння і значне водопоглинання. З підвищенням температури гігроскопічність зростає. Поліамідні покриття наносять на поверхню виробів напилюванням порошоків, литвом під тиском, а також з розчинів. Слід зазначити низьку стійкість поліамідів до окиснення, що перешкоджає тривалій експлуатації поліамідних покриттів на повітрі при температурах вище 60–100 °С. Для підвищення термостабільності поліамідів застосовують різні стабілізуючі добавки органічного і мінерального походження. Для поліпшення адгезійних і когезійних властивостей, підвищення експлуатаційних характеристик у покриття з поліамідів вводять різні наповнювачі. Введення невеликої кількості оксидів титану, міді, заліза, свинцю та алюмінію сприяє збільшенню міцності і твердості, а також зносостійкості покриттів при незначній зміні коефіцієнта тертя. Підвищення теплостійкості і здатності опорних підшипників з поліамідними покриттями досягається введенням порошоків металів (алюмінію, свинцю, бронзи та ін.).

Зниженню коефіцієнта тертя також сприяє добавка фторопласт-4, дисульфіду молібдену, графіту. Модифіковані покриття на основі поліамідних шарів застосовують у виготовленні таких деталей як шестерні, підшипники тощо. Поліамідні смоли використовують для отримання захисних покриттів, а поліамідні порошки – для нанесення тонкого антифрикційного зносостійкого покриття.

Полівінілхлорид (ПВХ). Завдяки низькій вартості сировини, високій хімічній стійкості, хорошим фізико-механічним і задовільними електричним властивостям полівінілхлориди є найпоширенішим матеріалом, що застосовується для створення захисно-декоративних, хімічно стійких і електроізоляційних покриттів. До складу полівінілхлоридних композицій, призначених для покриттів, окрім пластифікаторів, входять стабілізатори, наповнювачі, мастила, пігменти та інші добавки, концентрація і природа яких роблять істотний вплив на властивості покриттів. Матеріалом для покриттів в основному служить пластифікований полівінілхлорид, рідше використовується неластифікований ПВХ, типовим представником якого є вініпласт. Листовий і плівковий вініпласт застосовуються в хімічній промисловості для футерування металевої апаратури і обладнання, що експлуатуються в агресивних середовищах.

Пластифікований полівінілхлорид зазвичай наносять на поверхню оброблюваних деталей у вигляді порошку або плівки. Висока хімічна стійкість полівінілхлориду дозволяє успішно використати покриття на його основі в агресивних середовищах. Полівінілхлорид є основним компонентом для виготовлення лакофарбових матеріалів. Шляхом обробки ПВХ отримують вініпласт, листи якого легко піддаються механічній обробці і добре зварюються. Це дозволяє використати їх для нанесення суцільного покриття на фундаменти, цокольні частини й інші конструкції. Полівінілхлоридний пластикат застосовують як матеріал для обгортання та захисту апаратури від корозії, облаштувань підлог в приміщеннях, де потрібна герметичність. Для облаштування хімічно стійких підлог, а також для гідроізоляції використовують полівінілхлоридну плівку. Пентапласт має високу водостійкість, міцність, низький коефіцієнт тертя по сталі. Він стійкий до впливу грибової плісняви, стійкий до впливу розчинів лугів, кислот і солей. Пентапласт наносять на поверхню виробів, що захищаються, в порошкоподібному вигляді і з дисперсій в органічних середовищах. Крім того, робиться захист виробів футерувальними листами і готовими вкладками з пентапласту.

Фторопласти. Для виготовлення різних деталей і для захисних покриттів застосовуються фторопласт-3 і фторопласт-4. Фторопластові покриття виключно стійкі до агресивних середовищ і в цьому відношенні перевершують навіть благородні метали і сплави. На покриття з фторопласту-4 не впливають окиснювальні середовища, включаючи «царську горілку», киплячі луги, розчини солей. Фторопластові покриття стійкі до жирів, олій, вологи, кислот тощо. Покриття з фторопластів застосовують для захисту різних технологічних місткостей. Кремнійорганічні полімери відрізняються багатьма цінними властивостями, з яких найбільш характерні термостійкість, а також стійкість до впливу цілого ряду хімічних агентів і розчинників.

За термостійкістю вони значно перевершують органічні полімери. Кремнійорганічні полімери порівняно інертні до більшості реагентів, за винятком сильних лугів і концентрованих кислот. При цьому, розбавлені сильні, а також слабкі луги і кислоти не суттєво впливають на такі полімери. До недоліків кремнійорганічних полімерів слід віднести їх невисоку хімічну стійкість до впливу органічних розчинників і окиснювальних середовищ. Епоксидні смоли у своєму складі мають реакційноздатні епоксидні і гідроксильні групи, здатні вступати в хімічні реакції з різними речовинами з утворенням складніших сполук. При введенні в них компонентів для холодного або гарячого затвердіння

такі смоли здатні переходити в неплавкий і нерозчинний стан. Як затверджувачі можуть використовуватися органічні і неорганічні кислоти, ангідриди кислот, аміни і амідни, а також синтетичні смоли. Свої фізико-механічні властивості епоксидні смоли отримують при взаємодії із затверджувачами. Затверджувачі типу аміну виконують функції зшиваючих реагентів. Реакційноздатні групи затверджувачів взаємодіють з епоксидними групами смоли. Швидкість процесу затвердіння залежить від температури. Деякі затверджувачі реагують із смолою при кімнатній температурі, інші – лише при нагріванні. Якнайповніше затвердіння поліамінами досягається при температурі вище 100 °С. Довговічність матеріалів, отриманих затвердінням при кімнатній температурі, обмежена. Матеріали, отримані затвердінням епоксидної смоли при нагріванні, довговічніші. На основі епоксидних смол виготовляють лакофарбові матеріали, які використовують для захисних покриттів. Покриття на основі епоксидних смол з такими наповнювачами, як вугілля, графіт, кремнезем, кварцове борошно, подрібнений мармур, в приладобудівній промисловості не знайшли широкого використання.

Для захисту елементів приладів хімічної промисловості перспективними є комплексні покриття, що складаються з одного шару ґрунту, двох шарів емалі і одного шару лаку на основі епоксидної смоли. Затверділе покриття промивається розчином оцтової кислоти, а далі розчином соди і обполіскується водою. Полімерні покриття на основі вінілових, каучукових і епоксидних смол застосовуються для захисту сепараторів, в яких технологічні процеси протікають під надмірним тиском. Для захисту деяких внутрішніх поверхонь стаціонарних баків використовують епоксидне покриття, що складається з 82 % смоли, 13 % етилового спирту і 5 % поліетиленполіаміну. Покриття твердне при кімнатній температурі, але для прискорення процесу підвищують температуру до 70 °С. Перед нанесенням покриття залізобетонна поверхня обов'язково має бути добре очищена, просушена і прогріта електрообігрівачем будь-якого типу. Покриття чотиришарове, загальною товщиною до 0,6–0,8 мм. Епоксидні смоли також використовують для захисту внутрішньої поверхні.

Гумові покриття. Як матеріали для покриттів застосовуються гуми на основі натурального і синтетичних каучуків. До складу композицій входять стабілізатори, вулканізуючі агенти та інші добавки. В процесі вулканізації утворюється тривимірна структура, що забезпечує покриттям хороші механічні властивості. Для футерування виробів простої форми використовують листові матеріали з сирової гуми з подальшою вулканізацією на підкладинці. Для захисту виробів складної конфігурації застосовують рідкі матеріали у вигляді дисперсій або розчинів. Високу еластичність і хороші адгезійні властивості мають покриття з гум на основі натурального каучуку, які використовуються для захисту від мінеральних кислот і лугів.

М'які гуми в основному застосовуються для покриття різних апаратів, деталей, цистерн, труб. Вони є полімерними композиціями складного складу на основі еластомерів лінійної або розгалуженої будови (каучуків) у вигляді латексів або клеїв. Наприклад, для футерування місткостей внутрішню поверхню піддають дробоструминній обробці та обклеюють листовою сумішшю гуми із фенолформальдегідною смолою. Після цього поверхню облицьовували кислототривкою плиткою на діабазовій мастиці. Розробку теплостійких гум ведуть з урахуванням специфіки властивостей агресивних середовищ. Найбільший інтерес представляють рідкі силосанові каучуки, які мають високу теплостійкість (до 250 °С) і нетоксичні. Завдяки високій опірності стиранню, гуму застосовують для апаратів, які працюють з рідинами, що містять зважені речовини (помпи, трубопроводи). Іноді застосовують тверді гуми – ебоніти. Ебоніти порівняно з гумами мають вищу хімічну стійкість.

4.3. Основи нанесення полімерних покриттів методом розпилення

Розпилення рідини широко здійснюється, наприклад, в хімічній і харчовій промисловості при екстрагуванні твердих речовин з рідин, при сушінні, при різного роду взаємодіях між рідинами і газами, а також у ряді інших технологічних процесів (дроблення пульпи в алюмінієвій промисловості, охолодження газів розпорошеної рідиною в ряді апаратів тощо). Настільки поширене застосування розпилення пояснюється тим, що у всіх цих процесах зменшення розмірів крапель різко збільшує коефіцієнт теплопередачі і, отже, зменшує час протікання процесу, що дозволяє значно зменшити габарити апаратів. Крім того, розпилення забезпечує більшу рівномірність розподілу рідини і кращу взаємодію її з середовищем, що реагує.

Рівномірний розподіл рідини та економія диспергуемого матеріалу забезпечили успіх принципу тонкого розпилювання фарбувальних речовин в будівельній та інших галузях промисловості. Розпилювачі знайшли вагоме застосування при обприскуванні рослин у сільському господарстві. Листя рослин на сотнях тисяч гектарів щорічно покриваються дрібними краплями спеціальних хімічних складів, призначених для боротьби з шкідниками сільськогосподарських культур. У всіх цих випадках застосовуються форсунки, пристосовані для дрібного, і за можливості, рівномірного розподілу рідини по перетину струменя.

Точна інформація про розмір краплин є важливим чинником загальної ефективності формування покриття. Розміри крапель особливо важливі для таких процесів, як охолодження газу, кондиціонування газу, гасіння пожежі, сушарка, ВТО, нанесення покриття на таблетки, сільськогосподарське розпилення тощо. Розмір подрібнення краплин – це побічний продукт атомізації. Процес утворення крапель називається розпиленням. Процес розпилення починається з виходу рідини через сопло. Потенційна енергія рідини (виміряна як тиск рідини для гідравлічних насадок або тиск рідини та повітря для двофазних форсунок) поряд з геометрією сопла приводить до виникнення рідини з невеликим зв'язками. Ці зв'язки потім розщеплюються далі на досить малі «шматки», які зазвичай називають краплями, краплинами або рідкими частинками (рис. 4.10).

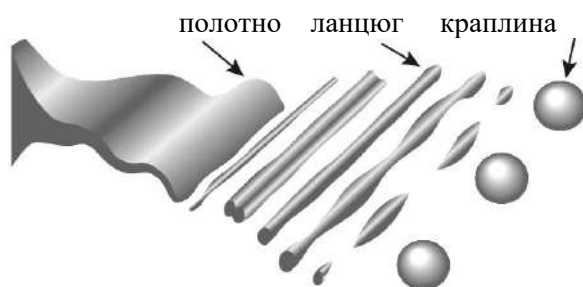


Рис. 4.10. Розбиття струменя рідини на краплини

Кожен розпилювач забезпечує діапазон розмірів краплинок; цей діапазон називається розподілом розміру краплі. Просте пояснення цього процесу – розбиття рідини, яке виходить з отвору. Різні форсунки мають різні формні отвори та виробляють різні форми розпилення, такі як порожній конус, повний конус, плоский спрей та ін. Розподіл розміру краплі буде залежати від типу насадки і істотно відрізнятиметься від одного типу до іншого. Інші фактори, такі як властивості рідини, потужність насадки, тиск та кут розпилення, можуть також впливати на розмір краплин [160].

Для того, щоб точно оцінити та зрозуміти дані про розмір краплин, слід врахувати всі основні змінні, такі як тиск форсунки, тиск, потужність, властивості рідини та кут розпилення. Метод тестування краплі також має бути повністю зрозумілим. Методи вимірювання, тип аналізатора розмірів крапель, аналіз даних та методи звітування все сильно впливають на результати [161].

Замість того, щоб вважати незмінною рідину в соплі, застосуємо «хвильову» теорію стійкого розпилення потоку до моделювання потоку полімеру у вигляді спрею шляхом поділу частинок рідини у вигляді «протокраплі». Вони мають характерний розмір, який дорівнює діаметру отвору сопла. В основі цієї моделі лежить концепція того, що атомізація полімерної рідини та подальшого розриву крапель є нерозрізненими процесами в межах густого спрею. Як показано на рис. 4.11, прогнозовано існування зони серцевини поблизу сопла з моделлю «протокраплі». Оскільки потік рідини розривається через її взаємодію з навколишнім газом, то коли вона проникає в газ, існує область великих дискретних частинок рідини поблизу сопла, що є концептуально еквівалентним осердям зв'язувальних тісних зв'язків в контексті масштабної моделі полімерних потоків (рис. 4.11).

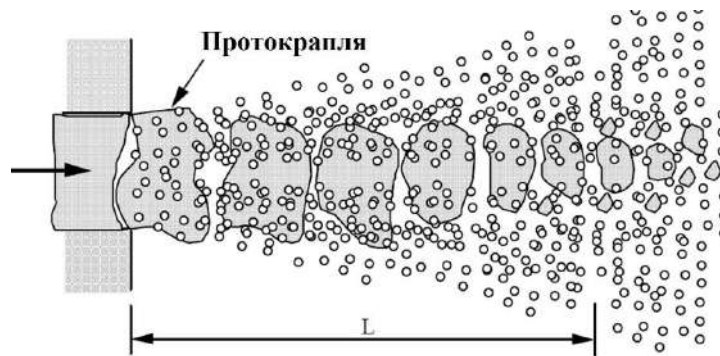


Рис. 4.11. Розривна модель потоку

У моделі рідина являє собою дискретні краплі, які розриваються, і розрив крапель використовує результати теорії стійкості струменя. У цьому випадку, розрив рідини моделюється шляхом постулювання, що утворюються нові краплі (з радіусом краплі r) від основної частини (протокраплі) або краплі (з радіусом a) зі значеннями [162]:

$$r = B_0 \Lambda \text{ при } B_0 \Lambda \leq a, \quad (4.1)$$

$$r = \min \begin{cases} 3\pi a^2 U / 2\Omega \\ (3a^2 \Lambda / 4) 0,33 \end{cases} \text{ при } B_0 \Lambda \geq a,$$

де $B_0 = 0,61$, визначено експериментально. У рівнянні (4.1) передбачається, що невеликі краплі утворюються з розмірами, що пропорційні довжині хвилі найбільш швидко зростаючої або найбільш імовірної нестійкої поверхневої хвилі. В іншому випадку значення мінімуму застосовується до крапель, більших струменів (тобто для розриву з низькою швидкістю), і припускає, що струмінь має частоту $U / 2\pi$ (формується крапля в кожному хвильовому періоді) або що розмір краплі визначається з об'єму рідини, який міститься під однією поверхнею хвилі.

Маса нових крапель, сформованих внаслідок розпаду, вираховується з основних крапель у міру виходу з сопла.

Зміна радіуса основної краплі або «протокраплі» дорівнює рівнянню швидкості:

$$\frac{da}{dt} = \frac{a-r}{\tau} \text{ при } r \leq a \quad (4.2)$$

де τ – час розпаду, що визначається за формулою:

$$\tau = \frac{3,728B_1a}{\Lambda\Omega}, \quad (4.3)$$

тут B_1 – константа часу розриву із запропонованим значенням $B_1 = 20$ [160]. Проте, це значення, на нашу думку, є залежним від характеристик форсунки, так як інші значення можна знайти в літературі, наприклад, $B_1 = 1,73$ О'Рурк та Амден [1987], $B_1 = 30$ – у роботі [162].

На рис. 4.2, a та b показані результати моделювання, отримані шляхом застосування зазначеного методу для розпилення з одного отвору. Обчислення проводились за допомогою пакета Comsol, і результати показані для струменів при 2,4 мс після початку розпилення. Сопло орієнтовано вертикально вниз. Швидкість розпилення становила від 40 м/с, діаметр сопла – 0,2 мм, а температура рідини та газу в кожному випадку – 298 К.

Є аспекти моделі «протокраплі», що потребує вирішення в майбутніх дослідженнях. Найбільш помітним припущенням моделі є те, що у вигляді складних рідких плям або зв'язків поблизу сопла можна описати, використовуючи лише один характерний розмір. Розмірність моделі може бути доопрацьована, щоб включати більш детальну інформацію про форму цих зв'язків, але за відсутності експериментальних даних у зоні активності аерозолів високого тиску незрозуміло, чи є ця додаткова складність виправданою.

Другою точкою слід відзначити, що теорія стійкості струменя не передбачає розміру або розподілу розмірів нестабільних поверхневих хвиль на момент розпаду, а також час між послідовними розривами. Для опису цих величин введемо константи моделей. Значення цих констант може впливати на події, що відбувалися всередині сопла, або попередні розбиття і зіткнення всередині спрею, які б порушували поверхню крапель. Важливість цих ефектів повинна бути встановлена додатковими порівняннями з експериментом та визначення цих констант.

Величезне значення розпилювання рідини для вирішення ряду технічних завдань привело до створення великої кількості всіляких конструкцій сопла. З'явилися і численні дослідження сопла. Більшість з них мало приватний характер, стосовно тільки до певного конкретного типу сопла. Разом з цим, були поставлені і дослідницькі роботи з відшукування загальних закономірностей, які можна було б поширити не тільки на випробуваний тип форсунки при зміні її продуктивності та умов роботи, але і на інші, що діють за тим самим принципом.

Відомі два основних способи розпилювання рідини: механічний і пневматичний (або паровий). Відповідно до цього форсунки ділять на дві великі групи: механічні та пневматичні (або парові). В останні роки стали застосовувати форсунки комбінованого типу, так звані паро-механічні, а також форсунки з попередньою газифікацією.

Останнім часом з'явилася тенденція до створення повітряно-механічних форсунок, що пояснюється прагненням використовувати переваги обох способів розпилювання рідини. Такі комбіновані форсунки відрізняються деякою заплутаністю конструкції, але зате витрати повітря у них дуже малі, а тиск його повітряному тракту не перевищує 2 атм.

Основними параметрами, що визначають режим роботи сопла, є [164, 165]:

– тиск рідини перед соплом; знаючи продуктивність форсунки та натиск, можна розрахувати помпове обладнання;

– швидкість розпилювального газу – для пневматичних сопла; розрахунок втрат напору у соплах з газовим (паровим) трактом дає можливість підібрати нагнітач для подачі повітря або визначити тиск пари, що подається в форсунку;

- співвідношення між ваговими витратами рідини і газу в пневматичних соплах;
- протитиск в камері.

Знаючи продуктивність і задавшись швидкістю, можна визначити діаметр рідинного сопла форсунки, а в пневматичних соплах також і розміри щілини для газу.

Щоб розрахувати (або підібрати) форсунку, необхідно керуватись такими вихідними даними та основними технічними вимогами:

- продуктивність форсунки (витрата рідини) G , кг/год;
- необхідна зона розпилювання, обумовлена середовищем та діаметром крапель в струмені і розподілом крапель за розмірами;
- кут конусності струменя;
- щільність зрошення, т. е. кількість рідини, проходить в одиницю часу через одиницю площі живого перерізу струменя;
- далекобійність струменя.

Важливу роль у розрахунку сопла відіграє визначення середнього діаметра крапель, для чого існує ряд формул.

Середньоарифметичний діаметр:

$$d_{ap} = \frac{\sum n_i d_i}{N}, \quad (4.4)$$

де n_i – число крапель діаметра d_i , $N_i = \sum n_i d_i$ – сума всіх крапель; при такому методі усереднення питомий вміст крапель визначається їх відносною кількістю, між тим велика кількість малих крапель становить лише незначну частину загальної маси розпиленої рідини, а це означає, що таке середнє не враховує розподілення маси рідини по краплях.

Середньомасовий діаметр:

$$d_{cpm} = \frac{\sum g_i d_i}{G} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3}, \quad (4.5)$$

де g_i – вага крапель розміру d_i . В деяких випадках за середній приймається розмір краплі, співвідношення об'єму якої до її поверхні дорівнює відношенню сумарного об'єму всіх крапель до їх поверхні (середній діаметр за Заутером):

$$d_s = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3}. \quad (4.6)$$

Середній діаметр виводять також з умови, що відношення діаметра краплі середнього розміру до її об'єму дорівнює відношенню суми всіх діаметрів крапель до об'єму, всіх крапель:

$$d_p = \sqrt{\frac{1}{\sum \frac{V_i}{d_i^2}}}. \quad (4.7)$$

За середній можна приймати також діаметр краплі, об'єм якої дорівнює середньо-арифметичному об'єму всіх крапель:

$$d_V = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i}}. \quad (4.8)$$

Середнім можна вважати також діаметр краплі, поверхня якої дорівнює середньо-арифметичній поверхні всіх крапель:

$$d_F = \sqrt{\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i}}. \quad (4.9)$$

Середньологарифмічний діаметр:

$$\lg d_i = \frac{\sum g_i \lg d_i}{G}. \quad (4.10)$$

Медіанний діаметр d_m визначається як діаметр краплі, що ділить весь об'єм розпиленого струменя на дві рівні частини, т. е. на сумарні об'єми крапель:

$$\sum_{i=1}^m n_i d_i^3 = \sum_{i=m+1}^n n_i d_i^3, \quad (4.11)$$

розміри яких більше або менше d_m .

Вибір того чи іншого способу визначення середнього діаметра крапель залежить від тих цілей, для яких виконується розпилювання рідини.

Середній діаметр крапель характеризує дисперсність далеко не повністю, оскільки при одному і тому ж середньому діаметрі можливий різний розподіл крапель за розмірами. Тому необхідно знати також і цей розподіл, який визначається за допомогою різних емпіричних формул. Досить поширеною є формула:

$$\lg R_i = -\left(\frac{d_i}{d_0}\right)^m = -bd_i^m, \quad (4.12)$$

де m – емпіричні константи; d_0 – розмір крапель ($d_0 = 0,376$); R_i – вагова частка рідини, що складається з крапель, розміри яких більше dL .

Рух рідкого струменя в середовищі газу описується рівнянням руху і не розривності кожної фази та умовами на межі розділу фаз.

У векторній формі ці рівняння записуються в наступному вигляді:

$$qF - \text{grad}p + \mu \left(\nabla^2 + \frac{1}{3} \text{grad} \text{div} \vartheta \right) = q \left[\frac{d\vartheta}{dt} + (\vartheta, \text{grad})\vartheta \right], \quad (4.13)$$

рівняння нерозривності;

$$\frac{d\vartheta}{dt} + \text{div}(g\vartheta) = 0, \quad (4.14)$$

тут F – об'ємні сили, що діють на одиницю маси (коли об'ємної силою є вага, то $F = gl$);

де g – прискорення сили тяжіння; q – щільність середовища; i – в'язкість середовища; p – тиск; v – швидкість; t – час.

У випадку нестисливого середовища щільність постійна ($q = \text{const}$), рівняння (4.13) та (4.14) спрощуються і набувають вигляду:

$$qF - \text{grad}p + \mu(\nabla^2 \vartheta) = q \left[\frac{d\vartheta}{dt} + (\vartheta, \text{grad})\vartheta \right],$$

$$\text{div}(\vartheta) = 0. \quad (4.15)$$

Поверхневий шар за своїми властивостями значною мірою відрізняється від решти об'єму рідини внаслідок того, що молекули цього шару знаходяться під дією силових полів молекул різних середовищ. У результаті на молекули поверхневого шару діє сила, спрямована перпендикулярно до поверхні всередину рідини, – молекулярний тиск. Товщина поверхневого шару вельми мала і становить величину порядку молекулярних розмірів. Внаслідок дії молекулярного тиску поверхневий шар рідини аналогічний розтягнутій плівці, яка прагне стиснутися. Цьому стисненню перешкоджають сили, дотичні до поверхні рідини, звані силами поверхневого натягу.

Тоді граничні умови перетворюються до вигляду [168]:

$$(\vartheta_{xz})_p = (\vartheta_{xz})_q, \quad \vartheta_{yp} = \vartheta_{yg} = 0,$$

$$\tau_{zy} = \mu_p \left(\frac{d\vartheta_{xp}}{dy} + \frac{d\vartheta_{yp}}{dx} \right) = \mu_r \left(\frac{d\vartheta_{xg}}{dy} + \frac{d\vartheta_{yg}}{dx} \right),$$

$$\tau_{yz} = \mu_p \left(\frac{d\vartheta_{yp}}{dy} + \frac{d\vartheta_{zp}}{dx} \right) = \mu_r \left(\frac{d\vartheta_{yg}}{dy} + \frac{d\vartheta_{zg}}{dx} \right),$$

$$p_p + 2\mu_p \frac{d\vartheta_{yp}}{dy} = p_g + 2\mu_p \frac{d\vartheta_{yg}}{dy} + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$
(4.16)

де індекси p і g відносяться до полімеру та повітря, відповідно.

Для подальшого дослідження потоку частин полімеру, що розпилюється повітрям, проведемо моделювання такого двофазного середовища.

4.4. Моделювання нанесення полімеру при розпиленні з сопла на деталі легкої промисловості

Для визначення напрямку подальших досліджень слід звернути увагу на те, що нанесення покриття відбувається на поверхню деталей легкої промисловості, що мають в основі ткану структуру, і тому мають складну поверхню. Отже, для якісного процесу нанесення слід розглянути будову та типи матеріалів більш докладно.

Покриття тканин для плавких прокладок є новими тенденціями в галузі використання текстилю, що описано в [161]. Розробка поліефірного волокна з нижчим подовженням або вищим модулем, високою адгезією і мікротонкою ниткою для області зовнішня сторона тканини/поверхня описана в [162]. Більш широке використання поліпропілену показано в роботі [163]. Використання більшої довжини рулону і широкої тка-

нини дозволяють знизити її вартість описані в [164]. Використання текстурованих і основних ниток з поліпшеною адгезією описано в роботі [165].

Розповсюджене використання нетканого матеріалу, вибір правильної тканини для покриття так само важливо, як вибір полімеру, оскільки він зв'язує первинні фізичні властивості і кінцевий продукт. Для правильного підбору тканини необхідно розглянути наступні аспекти: міцність і модуль повзучості, стійкість до кислот і хімікатів, здатність до адгезії, стійкість до мікробіологічної атаки, середовище використання, довговічність, стабільність розмірів. Наступні характеристики повинні враховуватись при проектуванні текстильної підкладки для задоволення специфічних вимог кінцевого використання: тип волокна і нитки і т.д.; тип пряжі та її структура; форми тканини, тобто, ткані, неткані і трикотажні, а також їх конструкція: текстильна тканина/субстрат, що використовується для покриття текстильних волокон.

Є два основних типи волокон: натуральні, штучні та синтетичні волокна. Природні волокна можуть бути рослинного походження, такі як бавовна, капок, льон, сизаль, кокосове і т.п.; тваринного походження, таких як шерсть, шовк і т.д.; мінерального походження, такі як азбест. Рослинні волокна в природі є целюлозні, тварина волокна – білками, азбест – силікатом. Органічні (штучні) волокна, по суті, є двох типів: отримані з целюлози, такі як віскоза і ацетат, а також синтетичні полімери, такі як нейлон, поліестер, акрил, поліпропілен і т.д. Металеві волокна та скловолокна – це неорганічні штучні волокна. Властивості деяких важливих волокон, що використовуються в індустрії покриття ми розглянемо нижче.

Бавовна в основі є целюлозна (~ 94 % целюлози) з рослинного волокна. Довжина волокна варіюється від 10–65 мм, а діаметр волокна в межах від 11–22 мкм, відповідно. Волокно має хорошу міцність у зв'язку з великою кількістю міжланцюгових водневих зв'язків, присутніх в полімері ланцюга. Бавовна є натуральне волокно з широким спектром властивостей. Ці властивості викликані відмінностями в кліматичних умовах в регіонах, де вирощується бавовна. Хороша якість бавовняного волокна характеризується його діаметром, тонкістю волокна і більшою довжиною. Важливими комерційними сортами є Сі-Айленді, єгипетський, Американська височина та індійська бавовна. Сі-Айленді і єгипетська бавовна мають високу тривалість. Індійська бавовна має більш коротку довжину волокна, з якої роблять грубі нитки. Американська бавовна знаходиться між цими двома категоріями за якістю і довжиною волокна. Бавовна має помірну механічну міцність в сухому стані, але добру вологостійкість. Пружність волокна низька, тому, бавовняні тканини легко зморщуються. Поглинання з високим вмістом вологи волокна робить бавовняні тканини зручні для літнього одягу. Бавовна широко використовується для текстилю, а також промислового текстилю, таких як полотно і т.д. Тканина має відмінну адгезію до покриття та ламінуванню полімерною плівкою.

RAYON-тканина – це штучні волокна, отримані з целюлози. Rayon (віскоза) регенерується з целюлози, а ацетат Rayon – з ацетилювання целюлози. Обидва волокна характеризуються високим блиском і вважаються подібними до штучного шовку. Целюлозні Rayon є за своєю природою, їх хімічними та фізичними властивостями, аналогічними до бавовни. Вони використовуються в сумішах з поліестером для текстилю, побутового текстилю, такі як меблі і килими, та як в медичні тканини.

Нейлон є загальною назвою лінійних аліфатичних поліамідів. Найбільш важливі волокна в цьому класі нейлон 66 і нейлон 6. Нейлон 66 – полігексаметиленадіпамід, конденсаційний полімер гексаметиленадіаміна і адипінової кислоти. Суфікс 66 позначає число атомів вуглецю в мономері. Нейлон 6 – polycaprolactamide, мономер містить ϵ -капролактамі. Це група синтетичних полімерів з набагато більш високою міцністю і подовженням, ніж целюлозні волокна. Він доступний у вигляді регулярної напівпрозорої

тонкої нитки і може бути перетворений в штапельні волокна. Нейлонова тканина, яка є термопластичним матеріалом, піддається термічній усадці, і, крім того, вона генерує статичну електрику при терті. Тому під час обробки нейлонових волокон повинні бути вжиті особливі запобіжні заходи. Нейлонові тканини широко використовуються для килимів, оббивки і одягу. Висока міцність, еластичність і стійкість до стирання дозволяє нейлон використовувати для різних промислових цілей: наприклад, фільтрувальних тканин, сіток, лямок, снастей, парашутів, канатів, балістичних тканин і т.д.

Поліестер належить до класу полімерів, що містять ряд повторних ефірних груп в полімерному ланцюгу. Комерційно доступне поліефірне волокно є поліетилентерефталат [171, 172] відомо в різних країнах під різними торговими марками. У Великій Британії він відомий як терилен, у США – лавсан. Волокно може бути у вигляді нитки, а також у вигляді штапельного волокна. Ряд інших поліефірів були перетворені у волокна, але вони не були використані в комерційних цілях. Як нейлон поліефірні тканини також створюють статичну електрику і піддаються термічній усадці. Тканини демонструють погану адгезію до вкритої полімерної плівки. Основне використання поліестеру та його сумішей – з бавовною, віскозою, шерстю для текстилю, побутових тканин і промислового текстилю [173].

Поліпропіленові волокна (поліпропілен) являють собою вуглеводневе волокно, властивості якого залежать від мікроструктури. З текстильної точки зору, тільки ізотактичний поліпропілен може бути фібрілляруваний, індекс ізотактичності повинний бути вище, ніж 90 %. Молекулярна вага діапазонів поліпропіленових покриттів знаходиться в межах від 100 000 до 300 000. Поліпропіленові волокна виробляються в різних формах як мононитки і мультифіламентні. Завдяки своїй легкій вазі, незначним водопоглинанням і високою стійкістю до стирання, поліпропілен широко використовується для виготовлення канатів, рибальських сіток, тафтингових килимів тощо.

Арамідні – це ароматичні поліаміди, які тісно пов'язані з нейлоном. Арамідні мають високу міцність і високий модуль пружності волокна. Вони в основному використовуються в композитній арматурі для балістичного захисту, тросів, канатів, а також для вогнетривкого одягу.

«Spinning» належить до процесу конверсії невеликих волокон в нитки, або у випадку синтетичних волокон, прядіння відноситься до процесів, які перетворюють полімери в нитки. Більшість натуральних волокон, таких як бавовна, шерсть тощо можуть бути тільки зі штепельного волокна, що мають різну довжину. «Spinning» з натуральних волокон розділяється на наступні системи залежно від довжини волокна: 1) короткі: продукти системи прядіння або бавовни, система «Spinning»; 2) довгі: головний продукт системи прядіння або система прядіння вовни. Синтетичні нитки, при перетворенні зі штапельного волокна, при прядінні аналогічні тому, що з бавовни або вовни.

Синтетичне волокно «Spinning» принципово відрізняється від штапельного волокна «Spinning». У синтетичного волокна саме волокно/нитка формується шляхом екструзії рідкого полімеру через дрібні отвори. У синтетичного волокна діаметр нитки визначається трьома факторами: швидкістю, з якою вони прокачуються через фільтри; діаметром отворів фільтри і швидкістю, з якою вони стискаються роликками. Синтетичні волокна «Spinning» розділені на три системи, засновані на плавкості та розчинності полімеру, а саме розплаву і прядильний розчин. Прядильний розчин може бути у подальшому розділений на дві системи, враховуючи природу розчинника: сухого і мокрого прядіння. Більш детально це описано в [165, 166].

Процес перетворення набору ниток в тканині на ткацькому верстаті називається ткацтвом. Механізм переплетення має два набори ниток, що розташовані під прямим кутом один до одного відповідно до конструкції та узору, що виробляється на ткацькому верстаті. Два набори ниток – основи (поздовжні нитки) і підткання (бічна скрутка) – вима-

гають окремих наборів обробки, перш ніж вони будуть готові до виробництва на ткацькому верстаті. Це особливо важливо, якщо необхідно надати спеціальних властивостей, наприклад: амортизаційні та адгезійні властивості тканини. Властивості сірої тканини (тканина виходить з верстата) залежать від властивостей волокна, пряжі, щільності ниток в тканині, типу ткання [173].

Гладке полотняне переплетення є найпростішою формою переплетення двох ниток. Нитки переплітаються одна з одною під прямим кутом в довільному порядку. Максимально можлива кількість перетинань нитки основи та підткання робить полотняне переплетення тканини більш міцним і армованим серед різних тканих структур. Близько 40 % всіх тканин вироблені саме полотняним переплетенням. Прикладами тканин полотняного переплетення є вуаль, мусліл-плівка, поплін, батист, газон, органза, шантунг, тафта, полотно тощо. Переплетення, похідні від полотняного, широко використовуються в різних промислових тканинах, наприклад, для наметів, захисного одягу, парашутів та іншого спеціалізованого одягу. Прикладами таких переплетень є «кошик»-переплетення – коли використовується дві або більше ниток основи одночасно з чергуванням рядків з двома або більше наповнювачами, а дизайн який нагадує кошик. Вони виробляються у вигляді малюнка за схемами 2×2 , 3×3 або 4×4 з двома або більше і заповнюють переплетені нитки з відповідним числом ниток основи. «Oxford»-тканина дещо відрізняється від звичайного «кошика» тим, що має конструкцію $\times 1$, т. е. заповнення ниток відбувається по чергово над і під двохнитковою основою, які виступають як одна нитка. Як правило, тонкість нитки підткання приблизно еквівалентна тонкості ниток основи. «Кошик» має переплетення, що складається з меншої кількості переплетень порівняно з полотняни.

В саржевому переплетенні перша нитка основи переплітається з першою утковою ниткою, друга основна нитка з другою ниткою підткання, третя основна нитка з третьою ниткою підткання і так далі до кінця повторюється. Саржеві лінії формуються на обох сторонах тканини. Напрямок діагональних ліній на лицьовому боці тканини протилежний напрямку діагональних ліній на задній стороні, що відповідає ниткам підткання та основи, що переходять на іншу сторону. Саржеве переплетення мають тканини типу фланель, денім, дріль, габардин тощо.

Сатинові переплетення: нитки основи пропускають ряд ниток підткання перед переплетенням, таким чином, основна нитка домінує. З іншого боку, в сатиновому переплетенні, нитки підткання пропускають ряд перекосів попередніх переплетень і тканини підткання домінують над основою. Тканини з таким переплетенням також характеризуються максимальним ступенем гладкості. Прикладами сатинів є античний атлас, весільний атлас, бавовна-сатин тощо. Кожне переплетення може бути представлене в квадратній конструкції, щоб проілюструвати ткацький рисунок. Вертикальні стовпці квадратів на папері представляють нитки основи, а горизонтальні – нитки підткання. На рис. 4.12 показано графічні символи деяких основних переплетень [171].

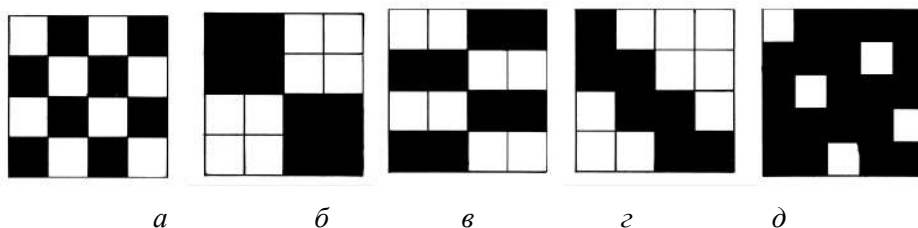


Рис. 4.12. Графічні позначення деяких основних переплетень:
a – полотняне; *б* – 2×2 «кошик»; *в* – 2×1 «кошик» / «Оксфорд»,
г – 2×2 саржеве; *д* – 4×1 атласне

Неткані матеріали виробляються безпосередньо з полотна волокон без проміжної стадії виготовлення пряжі, яка необхідна для тканих, трикотажних, плетених або тафтингових тканин. Ці тканини широко застосовуються в товарах одно- та багаторазового використання через їх низьку вартість та придатність для декількох спеціалізованих покриттів, наприклад в легкоплавких прокладках, фільтруючих матеріалах, хірургічних, санітарно-гігієнічних виробках, підгузках тощо. В індустрії ці покриття широко використовуються для синтетичної шкіри, оббивки, військового та захисного одягу. Неткані матеріали можуть бути класифіковані за типом використовуваного волокна, методом формування, характером зв'язків і типом використання закріплення. Волокна сформовані з бавовни, нейлону, поліестеру, віскози, ацетату, олефіну та їх комбінації. Існує два етапи у виробництві нетканних матеріалів. Перший крок – це виробництво павутинного волокна. Укладені волокна, відомі також як повсть, не мають достатньої міцності. Другий етап включає заплутування або склеювання волокон для отримання адекватної міцності.

4.5. Моделі взаємодії потоку з підкладкою

Існують три моделі «Крапля–Підкладка» (рис. 4.13). У першій моделі «Поглинання» (рис. 4.13, а) передбачений непружний удар краплі, яка досягає підкладки. Краплі прикріплюють до неї на місці падіння і проникають углиб. У другій моделі «Відбивання» (рис. 4.13, б) відбувається пружний удар краплі, яка досягає поверхні підкладки і відштовхується як від стіни з тангенціальними та нормальними компонентами швидкості, які залишаються незмінними, але компонент нормальної швидкості має протилежний знак (дзеркальне відображення). У третій моделі «Перетворення» (рис. 4.13, в) передбачається, що крапля завершує дотик до поверхні способом перетворення у рідкий струмінь. Мотивацію використання цієї струменевої аналогії можна побачити, розглядаючи граничний випадок поглинання безперервного потоку тісно розташованих крапель, який, як очікується, буде поводитися як рідкий струмінь, тому його й беремо за основу.

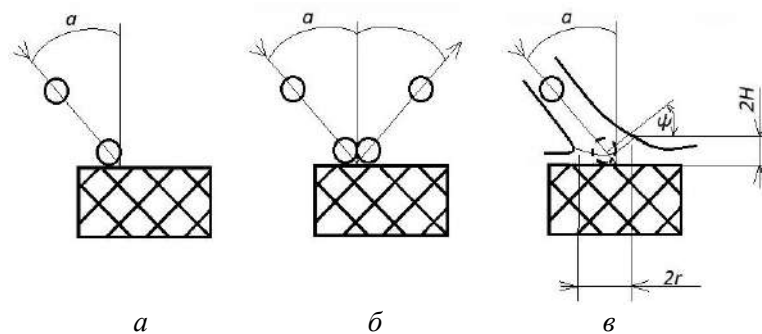


Рис. 4.13. Схематичні схеми моделей: «Поглинання» (краплі кріпляться до стіни), «Відбивання» (краплі відбиваються) і «Перетворення» (краплі ковзають вздовж стіни)

Розглянемо проблему рідкого струменя, що падає на похилій стіні, який потім перетворюється на полотно, що тече назовні вздовж стіни. Проблема може бути вирішена аналітично для двовимірного (плоского) струменя. Товщину вихідного полотна $H(\psi)$ складно визначити при тривимірному моделюванні, так як кутовий її розподіл по поверхні не дає повної картини щодо збереження маси та імпульсу матеріалу, що розпилюється. (див. рис. 4.13). Автори роботи [167] представили емпіричний підхід, де товщина полотна вважалася заданою:

$$H(\psi) = H_{\pi} \exp(\beta(1 - \psi / \pi)), \quad (4.17)$$

де H_{π} – товщина полотна при $\Psi = \pi$, а β – параметр, визначений за збереженням маси та імпульсу, тобто:

$$\rho_1 q \pi a^2 = 2 \int_0^{\pi} \rho_1 q R H(\psi) d\psi, \quad (4.18)$$

$$\rho_1 q \pi a^2 \sin \alpha = 2 \int_0^{\pi} \rho_1 q^2 R H(\psi) \cos \psi d\psi, \quad (4.19)$$

де α – кут нахилу струменя; a – радіус наближення струменя, а R – радіус окружності, за яким визначається товщина аркушу $H(\Psi)$.

Товщина, яка утворюється між Ψ та $\Psi + d\Psi$, пропорційна товщині полотна, оскільки в потоці потенціалу швидкість рідини q , не змінюється уздовж струменів. Поєднання значень (4.17) та (4.18) дає:

$$\sin \alpha H \int_0^{\pi} (\psi) d\psi = \int_0^{\pi} H(\psi) \cos \psi d\psi$$

або

$$\sin \alpha = \left(\frac{\exp(\beta) + 1}{\exp(\beta) - 1} \right) / \left(1 + \left(\frac{\pi}{\beta} \right)^2 \right), \quad (4.20)$$

який є вираз для β .

Далі було припущено, що кут Ψ , при якому крапля, що падає, залишає поверхню, також можна знайти з аналізу рідкого струменя. У цьому випадку функція $H(\Psi)$ інтерпретується як ймовірність того, що крапля виходить у напрямку між Ψ та $d\Psi$, а кут отримують шляхом інтегрування рівняння, отримаємо:

$$\psi = -\frac{\pi}{\beta} \ln \{ 1 - p(1 - \exp(\beta)) \}, \quad (4.21)$$

де p – випадкова рівновага на інтервалі $(0, 1)$. Це припущення узгоджується з стохастичним методом розв'язання рівнянь розпилення, що використовуються [168, 170].

Випробування моделі з експериментальними даними про поглинання бризок на похилих плоских пластинах показало, що модель «Перетворення» найкращим чином узгоджується з даними.

Між потоком і стінкою при високих кутах розпилення спостерігається мало взаємодії, що порівнює прогнозовані та вимірювані об'єми спрею при різних кутах нахилу стінки. Для великих значень α весь спрей відхиляється від стіни. Узгодженість між обчисленими та вимірними контурами спрею достатня, проте обчислюваний спрей зазвичай недооцінює вимірювані контури струменя.

Сучасні конструкційні полімери, особливо композитні матеріали, часто використовуються в конструкціях, де здатність створювати такі властивості, як жорсткість і міцність, робить їх привабливими порівняно з традиційними інженерними матеріалами. Легкі та композиційні полімерні матеріали є предметом багатьох досліджень і використовуються в різних галузях як опорні або несучі конструкції [169, 170]. Поєднання полімерних матеріалів і текстилю дозволяє отримувати вироби з поліпшеними властивостями [171].

Пориста тканина поглинає частину полімерного покриття, збільшує його довговічність і змінює його гнучкість [172]. Структури з полімерним покриттям та модифіковані властивості тканин були предметом багатьох досліджень і аналізів [171–174].

Процес нанесення полімерного покриття досліджено та показано в роботах [154–155], проте процес фіксації полімеру на тканині детально не вивчений. Це зумовлено складністю опису процесу проникнення полімеру в структуру тканини [175]. Як правило, його гарячим наносять на тканину, після чого він охолоджується і твердне.

Формування безперервної рідинної плівки, яка змочує тканину, також не описано моделлю взаємодії зі стінкою. Деталі рідкої плівки впливають на теплопередачу та швидкість випаровування в умовах високих температур. У затопленому випадку теплообмін моделюється на основі кореляції пограничного шару.

У незатопленому режимі теплопередачу можна змоделювати, враховуючи кореляції для окремих крапель, що стикаються з поверхнею (рис. 4.14 та 4.15).

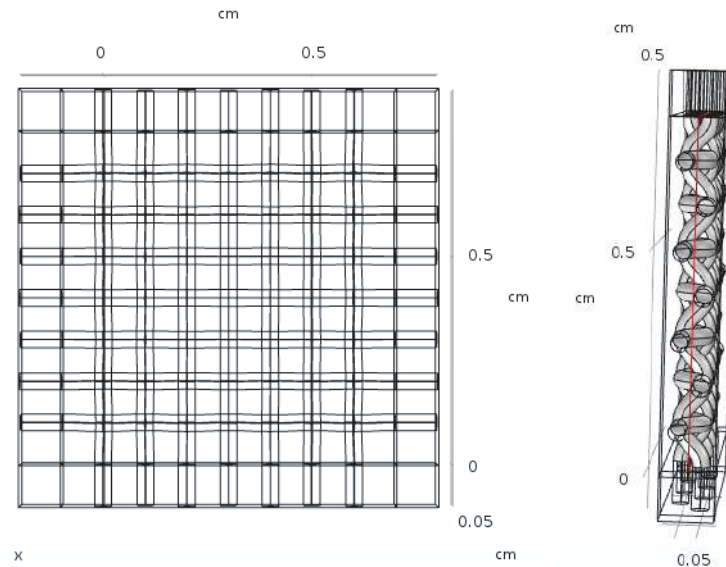


Рис. 4.14. Модель структури тканини підкладки

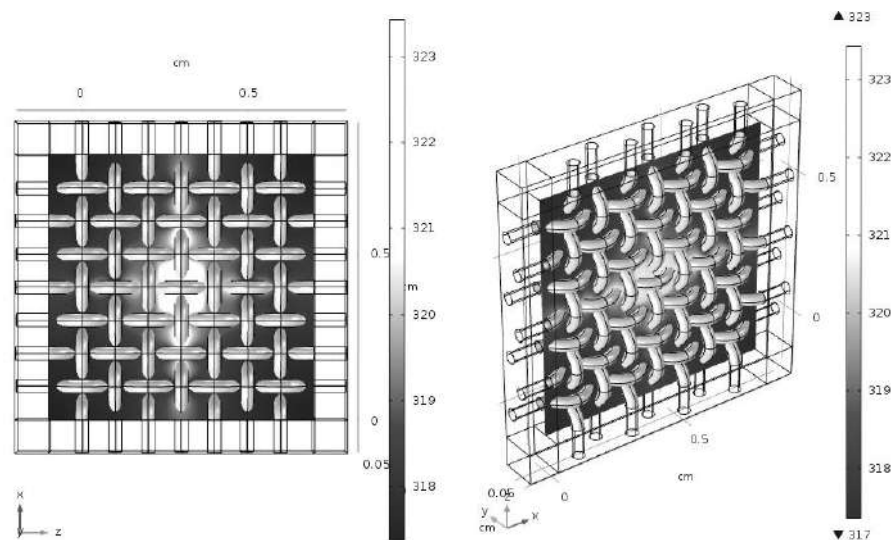


Рис. 4.15. Моделювання проникнення краплини у структуру тканини

Загальна теплопередача від поверхні до краплі або плівки показана на рис. 4.16 і знайдена з [162]:

$$Q = k_t h_L (T - T_S) t_{res} + Q_g, \quad (4.22)$$

де h_L – площа рідини, що контактує з тканиною; $k_t = \text{Nu}K / d$ – коефіцієнт конвективної теплопровідності, тут Nu – число Нуссельта, d дорівнює діаметру краплі або, для затоплених випадків, товщині плівки; K – теплопровідність рідини; T – температура краплі рідини або плівки; T_S – температура поверхні на тканині; t_{res} – час перебування рідини на поверхні; Q_g – теплопровідність від газу (актуально тільки при наявності плівки).

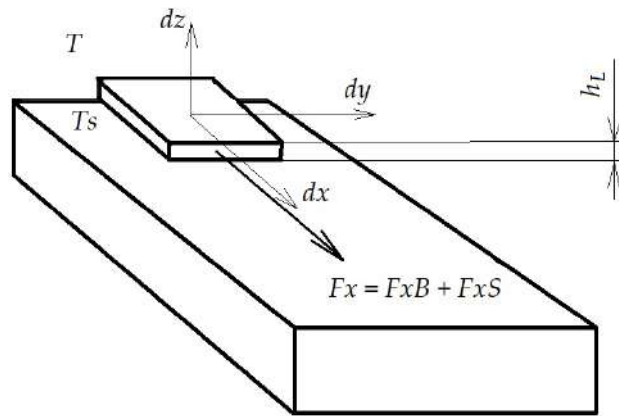


Рис. 4.16. Схема нанесення полімеру на поверхню тканини

Завдання, пов'язані з формуванням у рідкій фазі додаткових внутрішніх пружних напружень при формуванні покриття з полімерів на стадії розтягу формування багатомолекулярних частин. Полімерні частини переорієнтовуються відповідно до руху потоку в інтенсивному русі, і їх гідродинамічна дія призводить до утворення опору загальному потоку. Термічне наплення полімерних покриттів можна використовувати для захисту поверхні деталей від корозії та механічного впливу [175].

Процес нанесення рідкого покриття – це рідина в русі. Загальний макроскопічний баланс сил, отриманий шляхом застосування принципу збереження імпульсу до об'єму в рідині. Сила, що діє на об'єм, була задана швидкістю зміни імпульсу рідини, що оточує його в будь-який момент часу, тобто потік імпульсу, сумованого по всій контрольній поверхні, і швидкість зміни імпульсу в об'ємі.

Сила F_x , що діє в напрямку x на елемент рідини, що рухається зі швидкістю полімеру, є сумою сили, спричиненої вагою елемента об'єму F_xB , і сили, яка через напруги, що діють на нього вздовж напрямку x , F_xS . Тому $F_x = F_xB + F_xS$.

Для елемента диференціальної маси: ρ, dx, dy, dz :

$$\rho dx dy dz \left(\frac{dU_x}{dt} \right) = \rho dx dy dz \cos \beta + \left(\frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} \right) dx dy dz, \quad (4.23)$$

яке при перестановці зводиться до рівняння,

$$\rho \frac{dU_x}{dt} = g \cos \beta + \left(\frac{d\tau_{xx}}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} \right), \quad (4.24)$$

де U_x – швидкість рідкого елемента в напрямку x ; ρ – щільність полімерного елемента; g – прискорення сили тяжіння; β – кут, який утворює полімерний елемент з віссю x ; τ – час; $\tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx}$ – складові напружень, що діють у напрямках x, y, z .

Підставою значень напруги та швидкості можна отримати рівняння Нав'є–Стокса [154, 174]. Це рівняння об'ємного руху елемента в напрямку x , яке використовується для аналізу гідродинаміки полімеру:

$$\begin{aligned} \frac{U_x dU_x}{dx} + \frac{U_y dU_y}{dy} + \frac{U_z dU_z}{dz} = g \cos \beta - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \\ + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{d^2 U_x}{dx^2} + \frac{d^2 U_x}{dy^2} + \frac{d^2 U_x}{dz^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\eta}{\rho} \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 U_x}{dx^2} + \frac{d^2 U_x}{dy^2} + \frac{d^2 U_x}{dz^2} \right) \end{aligned} \quad (4.25)$$

де U_x, U_y, U_z – швидкість рідини в напрямках x, y, z ; ρ – тиск, що створюється рухом рідкого елемента в напрямку x ; η – в'язкість полімеру [175, 176].

За допомогою простого аналізу товщина плівки, яку потрібно покрити, є функцією лише п'яти змінних. Це відстань, швидкість, в'язкість, щільність і поверхневий натяг полімеру до покриття [177]. Рух полімеру вважається стабільним і одновимірним за своєю природою, а полімер нестисливим. Для руху вздовж осі x , де вісь y перпендикулярна до неї, рівняння спадає як:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^3} + \rho g, \quad (4.26)$$

Граничні умови, які виконуються: на тканині, припустимо, що рідина нерухома, тобто $U = 0$; швидкість потоку рідини в смузі така сама, як швидкість, $U = U_0$ для $y = h$.

Використовується модель паралельного потоку. Двічі інтегруючи рівняння та застосовуючи наведені граничні умови для ньютонівської рідини, швидкість отримуємо як:

$$U = U_0 \frac{y}{h} + \frac{1}{2} \eta \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} - \rho g \right) (y^2 - h^2), \quad (4.27)$$

Загальна кількість рідини, що проходить через щілину на одиницю довжини, за одиницю часу Q , це отримується шляхом інтегрування наведеної вище швидкості між $y = 0, U = 0, y = h, U = U_0$. Товщину покриття h_L можна отримати, поділивши Q на швидкість U_0 .

$$h_L = \frac{h}{2} - \frac{1}{12} \eta U_0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} - g \right) h^3, \quad (4.28)$$

Гradient тиску з поверхневим натягом рідини покриття отриманий з урахуванням балансу сил:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\sigma}{2h_2}, \quad (4.29)$$

де σ – поверхневий натяг рідини.

Таким чином, товщина покриття, отримана комбінуванням отриманих з урахуванням п'яти зазначених параметрів,

$$h_L = \frac{h}{2} + \frac{1}{12} \left(\frac{\sigma}{2h_2} + \rho g \right) \frac{h_3}{U_0}. \quad (4.30)$$

Висновок аналізу полягає в тому, що при нанесенні покриття товщина покриття складається з частин шару покриття, деякі з яких залежать від значень, безпосередньо пов'язаних з поверхневим натягом і зазором, а інші від в'язкості та швидкості. Однак ця модель не враховує параметри поверхні, на які наноситься полімер. У нашому випадку тканина має пористу структуру, тому стоїть завдання розробити модель формування полімерної плівки та дослідити її фіксацію на поверхні тканини.

Схема переміщення полімерного шару, закріпленого на тканині, наведена на рис. 4.17. Було зроблено наступні припущення: полімерний шар між деталями є пружним тілом, поки зовнішні сили не перевищать критичне значення молекулярної адгезії; тканина абсолютно міцна і фіксована. Дія сили фіксації полімерного шару F_f не повинна перевищувати значення адгезійного зв'язку між полімером і тканиною F_a для збереження адгезійної фіксації [177, 178]. Критичне значення сили зсуву досягається при $F_i = F_f$ при якому сили фіксації ще діють і полімер залишається пружним тілом.

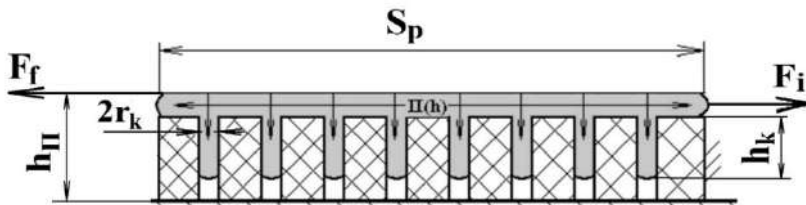


Рис. 4.17. Модель закріплення полімерного шару на тканині

Значення коефіцієнта, що враховує збільшення площі контакту між полімером і тканиною, можна отримати як [179]:

$$k_i = 1 + \Pi_i \left(\frac{2h_k}{r_k} - 1 \right), \quad (4.31)$$

де Π_i – пористість тканини.

Коефіцієнт k_i залежить від величини пористості матеріалу, середнього радіуса капілярів і глибини капілярного проникнення.

Відповідно до мікрореологічної теорії адгезії, для заповнення полімером капілярів матеріалу деталей потрібен час. Існує залежність [180], яка визначає вплив часу на глибину заповнення капіляра певних розмірів з урахуванням в'язкості самої рідини [181]. Однак ця залежність не має вигляду певного рівняння, зауважимо лише, що на величину

часу наповнення також впливає кількість самої рідини. З її допомогою можна визначити коефіцієнт, що враховує час заповнення капіляра рідиною, за формулою:

$$K_3 = \sqrt{\frac{Pt}{\eta} \frac{2h_k}{r_k}}, \quad (4.32)$$

де η – в'язкість полімеру; t – час заповнення капіляра; r_k – радіус капіляра; h_k – глибина заповнення капіляра полімером; P – зовнішній тиск.

Цей коефіцієнт дозволяє врахувати затримку формування контактної площини при формуванні адгезійної взаємодії між полімером і тканиною.

Сила зчеплення F_a може ставитися до роботи зчеплення. Питома робота адгезії може бути розрахована за допомогою рівняння [182]:

$$W_a = \sigma_p (1 + \cos \Theta), \quad (4.33)$$

де σ_p – надійний натяг полімеру; Θ – крайовий кут змочування твердої поверхні.

Значення енергії адгезії можна визначити за формулою (4.33) з урахуванням площини контакту та структури матеріалу:

$$E_a = W_a S_p k_i, \quad (4.34)$$

де S_p – актуальна зона контакту.

Підставляючи значення (4.31) та (4.32) в (4.33), отримуємо:

$$E_a = \sigma_p (1 + \cos \Theta) S_p \left[1 + \left(\frac{2h_k}{r_k} - 1 \right) \right], \quad (4.35)$$

Аналіз (4.35) показує, що величина енергії адгезії залежить від фізичних властивостей полімеру та тканини, глибини капілярного проникнення та площі контакту. Отримане рівняння дозволяє кількісно визначити енергію фіксації.

Відповідно до прийнятої моделі полімерний шар деформується під дією зовнішніх сил і протидіє їй силою зчеплення. Природа сил пружності пов'язана з силами міжатомної взаємодії в рідкому тілі. Сили адгезії зумовлюють наявність міжмолекулярних сил між полімером і тканиною. Крім того, сила опору деформації впливає на цілісність покриття. Тому в подальшому сукупність сил зчеплення і сил деформації слід розглядати як єдине ціле, тому надалі силу фіксації будемо розглядати лише як суму сил деформації шару рідини та сили адгезійної взаємодії полімеру та тканини:

$$F_f = F_a + F_d, \quad (4.36)$$

Значення енергії фіксації характеризують відомим рівнянням Леонарда–Джонса, яке впливає з рівняння роботи, яку необхідно витратити на пружну деформацію полімерного шару:

$$E_d = F_t \delta_p, \quad (4.37)$$

де δ_p – зсув полімерного шару під дією зовнішніх сил.

Оскільки ми вважаємо полімер пружним тілом, величину енергії його закріплення визначаємо за [182]. Якщо дотичні деформаційні напруження характеризувати допустимим значенням адгезійної міцності за критичних умов деформування, то отримуємо:

$$E_d = \frac{\tau_p^2 V_p}{2G_p}, \quad (4.38)$$

де $\tau_p = \frac{F_f}{S_F}$ – дотичні напруги деформації полімерного шару; V_p – об’єм полі-

меру; G_p – модуль пружності полімеру.

Величину пружної деформації можна визначити за формулами опору матеріалів зовнішньому навантаженню [182]:

$$\delta_p = \frac{F_{i2} h_{\Pi}}{3G_p J_p}, \quad (4.39)$$

де h_{Π} – товщина полімеру; $J_p = \frac{\pi D_p^4}{32}$ – момент інерції полімеру; G_p – модуль пружності полімеру.

Відповідно до [184, 185], величина енергії фіксації дорівнює сумі енергій, витрачених на деформацію полімерного шару E_p і руйнування адгезійного зв’язку E_a , тому $E_f = E_p + E_a$. Це дає нам $F_f = Fi$ і підставляючи (4.37) в (4.38) можна отримати енергію з рівняння:

$$\sigma_p (1 + \cos \Theta) \frac{\pi D_p^4}{32} K_3 k_i + F_f \frac{32 F_{i2} h_{\Pi}^3}{3 G_p \pi D_p^4} = \left(\frac{F_f}{S_p} \right)^2 \frac{V_p}{2 G_p}, \quad (4.40)$$

Використовуючі (4.24), (4.25), (4.27), (4.29) в (4.40) можна визначити значення сили фіксації:

$$F_f = \sqrt{\frac{\sigma_p (1 + \cos \Theta) \frac{\pi^3 G_p D_p^4}{32 V_p} K_3 \left(1 + \Pi_i \left(\frac{2h_k}{r_k} - 1 \right) \right)}{1 - \frac{4\pi h_{\Pi}^3}{3V_p}}}, \quad (4.41)$$

Аналіз (4.41) показує, що сила фіксації залежить від властивостей матеріалу деталей; полімер, фактична площа контакту та глибина капілярного проникнення залежать від параметрів застосування.

Значення виразу $1 - \frac{4\pi h_{\Pi}^3}{3V_p}$ наближається до «1», оскільки значення другого члена

виразу приблизно 10^{-10} . Таким чином, враховуючи, що $S_p = \pi D_p/4$ вираз (4.41) можна записати наступним чином:

$$F_f = \sqrt{\sigma_p (1 + \cos \Theta) \frac{G_p S_p^3}{V_p} K_3 \left(1 + \Pi_i \left(\frac{2h_k}{r_k} - 1 \right) \right)} = \sqrt{K_3 k_i (1 + \cos \Theta) \frac{G_p S_p^3}{V_p}}. \quad (4.42)$$

Підставлені в (4.41) значення параметрів нанесення матеріалів і об'єму полімеру визначають значення сили фіксації деталей.

4.6. Дослідження нанесення полімерних покриттів на вироби легкої промисловості

Розроблено пристрій, що дозволяє проводити експериментальні дослідження процесу розпилення рідин з різними фізико-хімічними характеристиками, а саме: відносною густиною, в'язкістю та температурою.

Комп'ютерну модель пристрою для розпилення рідини виконано в програмі SolidWorks з урахуванням порад [186, 187]. Експериментальний зразок обладнання, здатного розпилювати певну кількість полімеру, зображено на рис. 4.18. Установка складається з електродвигуна 1, рами 2, кривошипно-шатунного механізму 3, бака для підігріву полімеру 4, насоса з камерою змішування 5, розпилювача 6 з регульованою форсункою 7. Прогнозована картина розпилення для відстані 200 мм показана на рис. 4.18. Розпилення розпадається та в основному випаровується до того моменту, коли воно впадає приблизно через 1 с після вприскування.

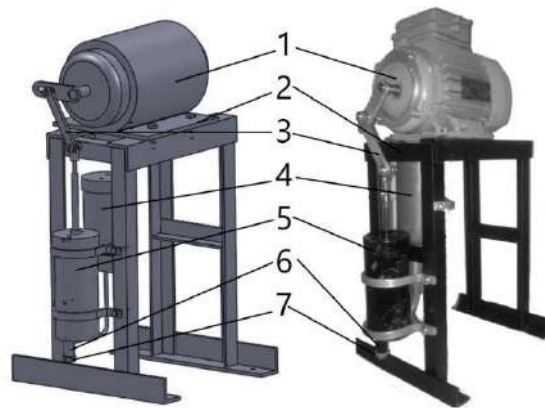


Рис. 4.18. Модель експериментального пристрою для полімерного покриття

Жорсткість зразків на розрив визначають згідно з ДСТУ ISO 6892-1:2019. Були обрані тканини: штучна шкіра СК-2 (ДСТУ ISO 2589:2019); натуральна яловича шкіра (ДСТУ 2726-94); тканина Денім (ДСТУ ГОСТ 21790:2008). Зразки були випробувані на комп'ютеризованому комплексі, який міг задавати різні значення навантаження та вимірювати подовження зразка (див. рис. 4.19). Отримано середні значення вимірювань для кількох зразків різної товщини полімерної плівки.

Розраховано значення, що дозволяють визначити формулу залежності міцності на розрив від товщини полімерного покриття z , а саме:

$$4,8h_p - 5L_m - 0,085F_r + 65,7 = 0, \quad (4.43)$$

де h_p – експериментальна товщина полімерного покриття на тканині; L_m – значення допустимого подовження; F_r – допустима сила.

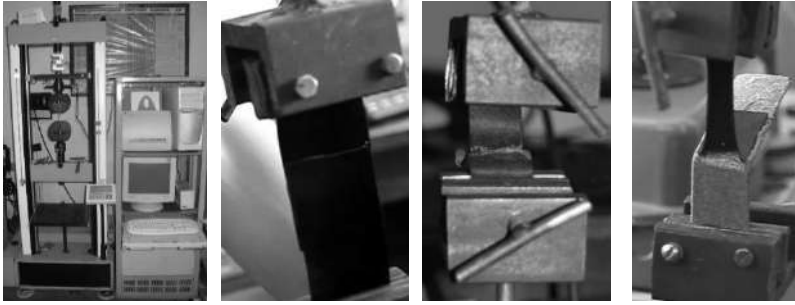


Рис. 4.19. Експериментальна установка зразків полімерних плівок на тканині

Результати аналітичних розрахунків за (4.43) наведені на рис. 4.20–4.21 для об’єму полімеру $0,00001 \text{ м}^3$, площа контакту $0,04 \times 0,04 \text{ м}$.

Отримана залежність дозволяє прогнозувати величину деформації при розтягуванні матеріалу з полімерним покриттям залежно від товщини, що дозволяє створювати нові види одягу з урахуванням вимог експлуатації [186].

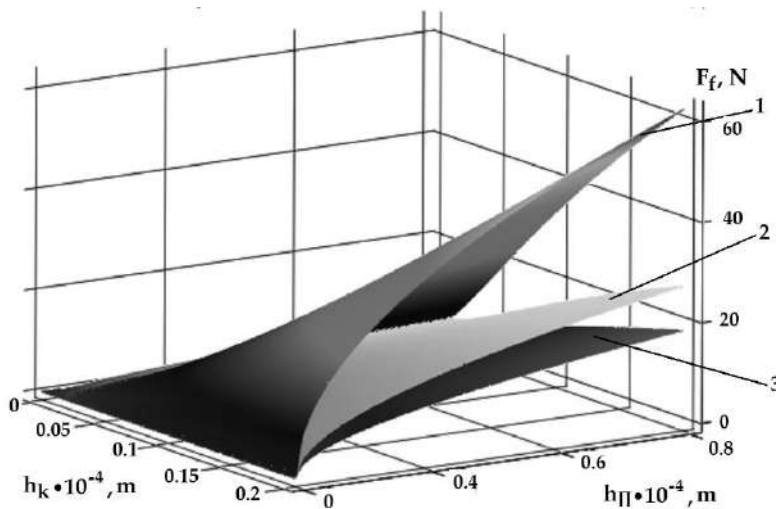
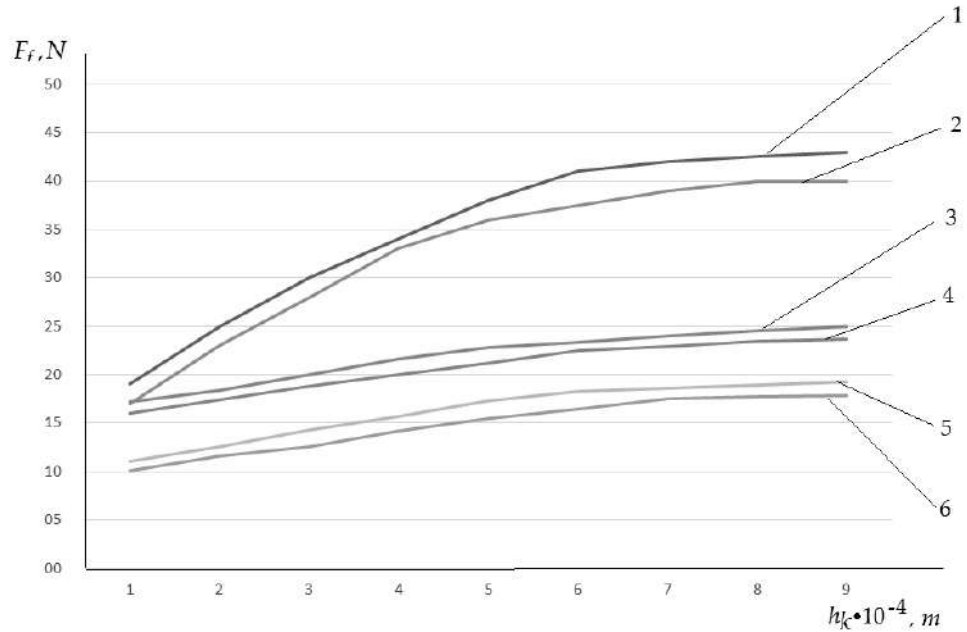


Рис. 4.20. Графік залежності міцності полімеру на розрив від товщини покриття та капілярної проникності полімеру:
1 – тканина Денім; 2 – натуральна яловича шкіра; 3 – штучна шкіра СК-2

За отриманими результатами аналітично можна визначити величину деформації. Залежність допустимої деформації полімерного шару від сили зсуву показана на рис. 4.22. Для таких малих величин вона може бути лінійною.

Температурний фактор полімеру впливає на величину сили фіксації також, якщо полімер нанесено гарячим. Величина пористості матеріалу в даному випадку не сильно впливає на величину фіксації, оскільки в основному деформує верхній шар полімеру. Отримані дані наведені на рис. 4.23. При $h_{П} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ товщина плівки не зменшується і сила фіксації F_f не змінюється.



1, 2 – теоретичні та експериментальні дані для тканини Денім;
 3, 4 – теоретичні та експериментальні дані для яловичої шкіри;
 5, 6 – теоретичні та експериментальні дані для штучної шкіри СК-2

Рис. 4.21. Графіки залежності сили фіксації від товщини полімерної плівки

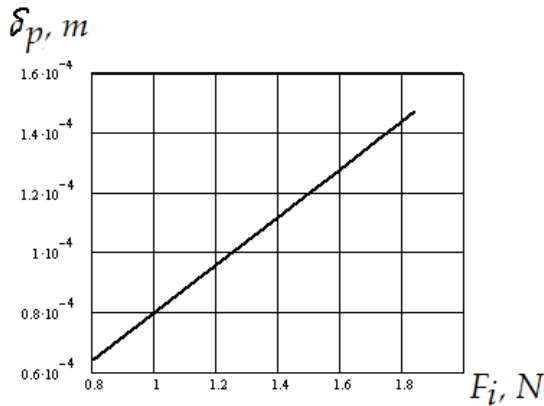


Рис. 4.22. Залежність допустимої деформації полімерного шару від сили зсуву

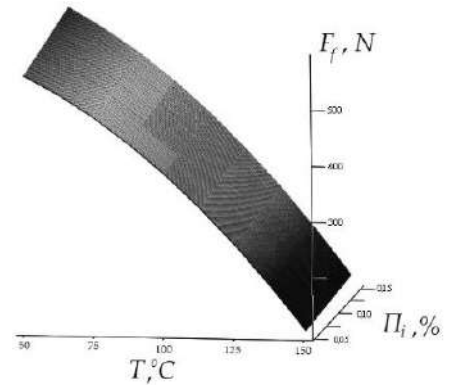


Рис. 4.23. Залежність міцності зчеплення від температури та пористості

Аналіз залежності допустимої деформації полімерного шару від зсувної сили (див. рис. 4.22) показує, що зі збільшенням зсувної сили деформація полімерного шару зростає лінійно. Однак деформація можлива лише до певних критичних значень. На $\sigma_p > 1.47 \cdot 10^{-4}$ м відбувається руйнування полімерного шару.

Температура полімеру також впливає на силу фіксації. Величина сили зчеплення невелика при утворенні плівки покриття, але полімер може проникати в пористу структуру матеріалу. Після охолодження сила фіксації швидко зростає.

4.7. Експериментальна установка для нанесення покриттів та методика проведення експериментів

Для вирішення проблеми якісного нанесення полімерних композицій на поверхні деталей розроблені установки з широким спектром технічних можливостей для нанесення полімерних композицій на поверхні деталей легкої промисловості (рис. 4.24).

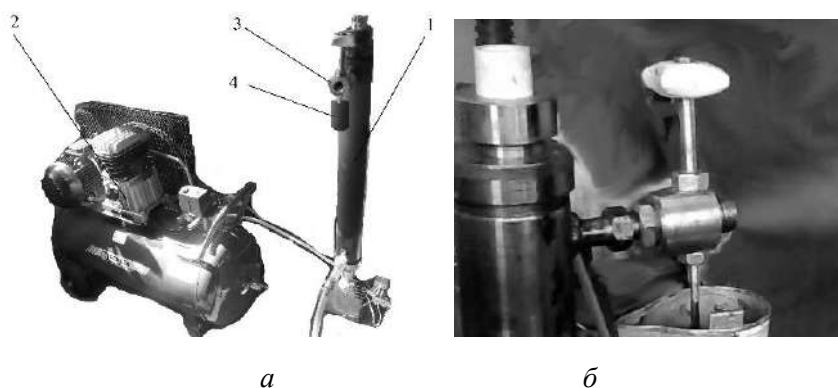


Рис. 4.24. Установка для нанесення полімерних композицій на поверхню:
а – загальний вигляд; б – вузол розпилення

Система складається з компресора 1, модуля підготовки полімеру 2, модуля підігріву та подачі повітря 3 і модуля розпилення 4. На відміну від аналогічних продуктів, ця система може наносити композитні матеріали на поверхню легких деталей, як на відкритому повітрі, так і в камері. Конструкція установки дозволяє змінювати широкий спектр технічних параметрів завдяки можливості додавання наночастинок до композиційного матеріалу.

Модуль підготовки повітря забезпечує його нагрівання до температури приблизно 100 °С і подачу в ежекторну камеру (модуль розпилення, куди надходить вже нагрітий композитний матеріал). Температура нагрівання композитного матеріалу варіюється в межах від 50 до 250 °С, а тиск, при якому відбувається розпилення композитного матеріалу, варіюється в межах від 0,2 до 1 МПа.

Критерієм ефективності запропонованого обладнання для нанесення полімерної композиції на поверхню ШВП є процес та величина адгезійної взаємодії між полімерною композицією та поверхнею деталі.

На першому етапі дослідження процесу адгезійної взаємодії полімерної композиції з поверхнею деталі проведено оптимізацію технічних параметрів обладнання для нанесення полімерної композиції на поверхню деталі. Критерієм оптимізації є інтенсивність адгезійної взаємодії полімерної композиції з поверхнею деталі.

Для вибору основних факторів, що впливають на ефективність нанесення полімерної композиції на поверхню деталі, було проведено ряд досліджень.

Аналіз поведінки клею-розплаву під час нагрівання показав, що клей досягає рідкого стану і зазвичай розпилюється в камері ежектора при температурі від 150 до 170 °С, але вище цієї температури він починає кипіти і спостерігається процес горіння. Коли температура повітря, що надходить в ежекторну камеру під тиском, падає нижче 80 °С, клей-розплав вступає в контакт з повітряним струменем і спостерігається процес «ламінування». Цей процес не спостерігається при температурі повітря вище 100 °С. Процес ежекторного розпилення в представленому обладнанні починається при тиску повітря

приблизно 0,2 МПа. Відстань від інжекторної камери до поверхні деталі вибирали з точки зору забезпечення рівномірності нанесення клею-розплаву та мінімально допустимого кута нахилу розпилювача до поверхні деталі [178, 188].

Аналіз факторів, які могли впливати на міцність адгезійної взаємодії полімерної композиції з поверхнею шарикопадшипникового гвинта при використанні запропонованого способу монтажу з урахуванням [189], показав, що найбільш важливими факторами є температура термоклею та тиск повітря, що надходить в ежекційну камеру.

Для оцінки міцності адгезійної взаємодії полімерної композиції з поверхнею кульки використовувався перевірений метод відшарування.

Тестер призначений для випробування пластичних і волокнистих матеріалів на гістерезис при розтягуванні, стисканні і згині, малоциклову втому за рахунок активного зміщення захвату і малоциклову втому за рахунок навантаження [190]. Для реєстрації значень навантаження використовувалися тензометричні датчики, підключені до мостової схеми. Сигнали з датчика через підсилювач і аналого-цифровий перетворювач (АЦП) передаються через USB-порт на електронний комп'ютер (ЕК), де обробляються системою LabView. На рис. 4.25 наведено програму обробки сигналів з тензорезисторів у системі LabView, а на рис. 4.26 – варіант фіксації сигналу.

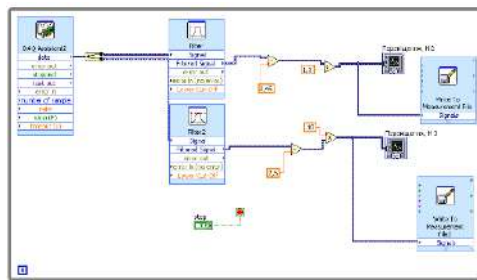


Рис. 4.25. Програма обробки сигналу, що поступає з тензодатчиків

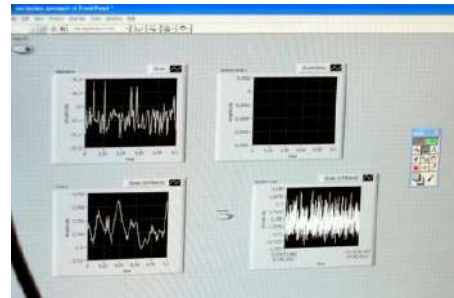


Рис. 4.26. Фіксація результатів вимірювань у системі LabView

Для оцінки впливу окремих технологічних факторів на міцність адгезійної взаємодії при нанесенні полімерних композицій на основі відходів на поверхню деталей легкої промисловості було проведено експеримент, а саме, некомпозиційний дизайн обертання другого порядку. В результаті обробки даних отримано рівняння регресії другого порядку, що описує залежність сили адгезійної взаємодії (адгезійної міцності) від конкретних технологічних факторів. Нижче наведені зразки матеріалів з нанесеним покриттям (див. рис. 4.27 та 4.28).



Рис. 4.27. Отримані зразки покриття з різною товщиною на деталях шкіри



Рис. 4.28. Отримані зразки покриття з різною товщиною на текстильних деталях

Для якісної оцінки адгезії термоклею до поверхні штучної шкіри використовували металографічний мікроскоп МІМ-10, призначений для візуального спостереження і фотографування мікроструктури металів та інших матеріалів, у т.ч. волокон (рис. 4.29).

Фотографували поперечні зрізи поверхні штучної шкіри, напильної термоклеєм. Мікроскоп налаштований на збільшення $1000\times$. На фотометричному зображенні (рис. 4.30) показані найбільш характерні особливості процесу адгезії при нанесенні клею-розплаву на поверхню штучної шкіри.



Рис. 4.29 – Металографічний мікроскоп МІМ-10



Рис. 4.30. Отримані зображення нанесених покриттів на поверхні деталей легкої промисловості

Аналіз фотопластинок показує, що адгезія визначається не лише молекулярною взаємодією на межі розділу фаз, але й механічною поведінкою матеріалу. Взаємодія між

клеєм (термоклеєм) і текстильним матеріалом відбувається так, ніби клей заповнює пори і тріщини штучної шкіряної поверхні. Ця взаємодія інтерпретується механічною теорією адгезії [170, 191].

4.8. Результати аналітичних та експериментальних досліджень нанесення полімеру на деталі легкої промисловості

В результаті отриманих даних ми отримали рівняння регресії другого порядку, що описує залежність міцності адгезії від взаємодії (міцності зчеплення) окремих технологічних факторів, які корелюються з [192]:

$$G = 500 + 32,8T + 90PT + 0,02T^2 - 12,8P^2, \quad (4.44)$$

де $T = (T_i - 150)/20$ – сумісна температура полімеру; $P = (P_i - 6)/2$ – значення тиску повітря в камері ежектора.

На основі отриманих математичних залежностей було побудовано графік залежності твердості зразків полімерів, отриманих експериментальним методом, від товщини (рис. 4.31). Як видно з графіка, теоретичні та експериментальні значення знаходяться в близькому узгодженні. Похибка склала менше 12 %. Ця залежність дозволяє розробляти обладнання та методику нанесення полімерних покриттів на поверхню деталей із заданими значеннями. Фотографії покриття деталей з мікроскопа показано на рис. 4.32.

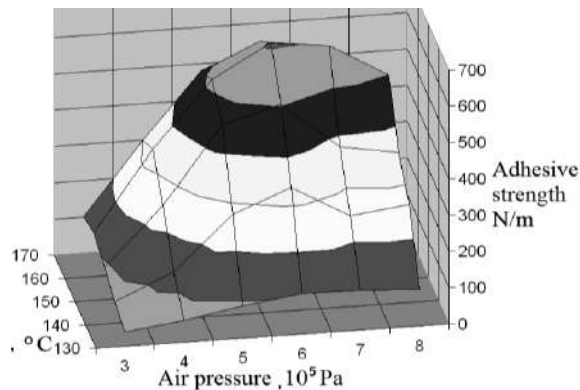


Рис. 4.31. Залежність адгезійної сили полімеру від температури (°C) і тиску повітряного розпилення (10^5 Pa)

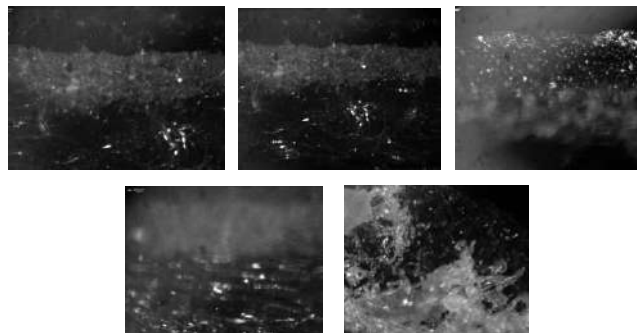


Рис. 4.32. Фотографії покриття деталей

Залежність дозволяє прогнозувати величину деформації розтягування матеріалу покриття залежно від товщини (рис. 4.33 та 4.34), що дає змогу створювати нові види одягу відповідно до вимог експлуатації з урахуванням [193, 194].

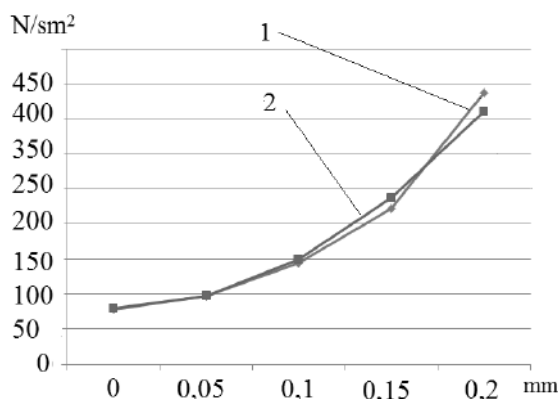


Рис. 4.33. Вплив товщини полімерної плівки на умовну жорсткість при згині:
1 – експериментальні дані; 2 – теоретичні дані

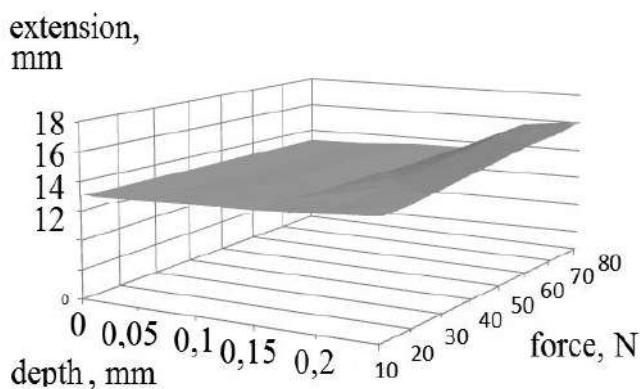


Рис. 4.34. Графік залежності розтяжності матеріалу з певною товщиною полімерного покриття від сили навантаження

Дослідження показало можливість нанесення полімерних шарів на тканини різної структури з урахуванням бажаної глибини проникнення. Отримані результати дозволять розробити нове обладнання для нанесення полімерних покриттів на швейні вироби [195, 196].

Технологія та обладнання можуть бути легко адаптовані до вимог замовника та властивостей матеріалу. Обладнання може бути модернізоване додатковими модулями для виробництва полімерних гранул меншого розміру, переведення полімерів у рідкий стан і попереднього включення наночастинок у полімер [197].

Прогнозований тепловий потік, внаслідок комбінованого перенесення газової та рідкої фаз, добре узгоджується з експериментальними результатами, але розрахункове значення є вищим за тепловий потік, виміряний наприкінці періоду порівняння. Це можна пояснити невизначеністю у швидкості внесення, яка в моделюванні вважалася постійною, в той час як в експериментах процес внесення змінювався з часом. Таким чином, були змодельовані процеси, що відбуваються в полімері на тканині. Отримані значення показали, що існуючі підходи до використання полімерних матеріалів не забезпечують якісних результатів через нестабільність температурного поля в процесі формування покриття на

тісті. Крім того, полімери швидко охолоджуються і, таким чином, загусають до контакту з поверхнею матеріалу [198].

Процес заповнення капілярів проаналізовано та розраховано. Після охолодження полімер міцно закріплюється в структурі тканини. Це робить шар полімеру ще більш стійким до деформаційних зусиль. Розбіжність між математичною та експериментальною моделями склала 12 % [199].

Отримані математичні залежності дають основу для прогнозування покращення морфологічної стійкості одягу при нанесенні на поверхню полімерів. Також є можливість спроектувати новий пристрій для їх реалізації.

Розділ 5.

Застосування полімерів у виробках легкої промисловості

5.1. Аналіз ринку одягу спеціального призначення та проблем їх використання

Створення безпечних умов праці та реалізація в Україні кращих європейських і світових практик промислової безпеки, гігієни праці та виробничого середовища неможливе без проектування, виготовлення і впровадження якісно нових різновидів захисного одягу для працівників. Не маючи глибинного наукового обґрунтування, визначених методів і критеріїв оцінки параметрів захисного одягу, важко розширити номенклатуру виробів, потреба в яких безперервно зростає [200, 201].

Створення захисного одягу на сучасному етапі – це складна задача, обумовлена різноманітністю умов, з якими стикається працівник в процесі виробничої діяльності. З розвитком промислового виробництва підвищуються вимоги до якості захисного одягу, оскільки він повинен забезпечувати безпеку праці, запобігати дії шкідливих виробничих факторів, зберігати нормальний функціональний стан людини, її працездатність протягом всього робочого часу, не бути токсичним, не чинити подразнюючої дії на організм працівника, витримувати науково обумовлені терміни експлуатації. Кожна професія висуває специфічні вимоги до захисного одягу, які необхідно врахувати при його розробці.

Проблемою створення засобів індивідуального захисту в різних аспектах опікуються такі провідні науковці, як: Мичко А. А., Кочетов О. П., Ковтун І. І., Колосніченко М. В., Колосніченко О. В., Остапенко Н. В., Литвиненко Г. Є., Теличко К. І., Івасенко М. В., Третьякова Л. І., Третьякова Л. Д., Tarruga K., Holdstock P. та інші фахівці [203–218]. Проте багатofакторність та міждисциплінарність розвитку наукових основ проектування захисного одягу, стійка тенденція до появи на світовому ринку нових текстильних захисних матеріалів, сучасні технології виготовлення одягу виключають одномоментність рішень та вичерпність теми.

Основним призначенням захисного одягу є надійний захист людини від несприятливих факторів і забезпечення працездатності та нормального функціонального стану організму [202, 219].

Терміни «спеціальний» та «виробничий» одяг, попри своє першочергове завдання – захищати працівника від шкідливих впливів виробничих умов, мають різні пояснення. Відповідно до стандартизованого тлумачення, спеціальним називають одяг для захисту тих, хто працює в умовах впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Виробничим є одяг для роботи у виробничих умовах промисловості та сільського господарств.

Існуючий на споживчому ринку захисний одяг вітчизняного виробництва не витримує встановленого терміну експлуатації з різних причин, не забезпечує належного захисту працівників від задекларованих видів небезпек, не повністю відповідає конкретному рівню висунутих до нього вимог, створює додаткові фактори ризику, не завжди забезпечує реалізацію специфічних потреб виробничого середовища, а також має невідповідно високу вартість.

Ергономічна недосконалість виробів для захисту працівників при виконанні ними професійно-виробничої діяльності призводить до фізичного перевантаження внаслідок завеликої маси одягу, ускладнення та обмеження характерних рухів працівника, невідповідності конструктивно-технологічних рішень виробів умовам експлуатації і, як наслідок, – порушення теплового балансу [203, 206].

Наразі актуальність визначеного напряму досліджень з проблеми розробки ефективного захисного одягу різної функціональної спрямованості видається беззаперечною і підтвердженням цього є статистичні дані про рівень виробничого травматизму та смертності працівників.

Різноманітність та велика кількість різновидів виробів захисного одягу обумовлює доцільність їх розподілу на різні класифікаційні угруповання: за терміном експлуатації; способом захисту; захисними властивостями; сезоном; статтю; опорними ділянками; асортиментом; складністю конструкції тощо.

Слід зазначити, що для подальших досліджень в розрізі дизайн-проекування захисного одягу виокремлено одяг пасивного способу захисту працівника різної конструктивної складності з метою формування асортиментних рядів комплектів, складовими яких є плечові та поясні вироби. Для систематизації елементів спеціального одягу проаналізовано асортимент існуючого захисного одягу різного призначення [203–208, 220–225].

5.2. Встановлення значущості показників властивостей матеріалів одягу спеціального призначення

Успішною розробкою захисного одягу є задоволення чітко визначених захисних вимог та відповідність нормативним стандартам, враховуючи основні аспекти візуальної значущості одягу та їх вплив на споживача. Вимога – це «сформульована потреба або очікування, загальнозрозумілі або обов'язкові» [202]. Вимоги, що висувуються до швейних виробів, поділяють на дві групи: споживчі та виробничі. Якість спецодягу характеризується сукупністю його споживчих і виробничих вимог. Споживчі вимоги до одягу визначаються його відповідністю умовам експлуатації.

Від того, наскільки захисний одяг відповідає певним вимогам, залежить найцінніше – життя і здоров'я людей [202]. Головне призначення спецодягу – захист працюючих від виробничих ризиків і забруднень при дотриманні вимог санітарних норм. Спеціальному одягу повинна бути притаманна підвищена зносостійкість та зовнішній вигляд, а також відповідність гігієнічним вимогам [202, 219].

З урахуванням ситуації в країні, найбільш затребуваним є спеціальний одяг універсального призначення, який може використовуватися в різних ситуаціях як на роботі, так і в домашній умовах. При цьому на деяких підприємствах його носіння є обов'язковим [203–206].

Відмінними рисами цієї форми одягу є:

– практичність. Робочі комбінезони виготовляються із міцної, немаркої тканини, яку легко доглядати;

– функціональність;

– зручність.

Цілі використання:

– захист від високих або низьких температур, радіоактивного та електромагнітного впливу;

– попередження травматизму внаслідок попадання іскор та полум'я;

- забезпечення комфорту при роботі з жирними субстанціями, оліями, нафтопродуктами, кислотами та іншими хімічними речовинами та складами;
- захист від пилу та інших забруднень виробничого характеру.

Сфера застосування:

- у будівництві;
- під час виконання монтажних робіт (на підприємствах різного профілю, в автомайстернях);
- у харчовій промисловості;
- при виконанні зварювальних та електромонтажних робіт;
- у хімічній, меблевій та переробній промисловості;
- у сільському господарстві тощо.

За результатами аналізу умов праці та мікроклімату на підприємствах і особливостей технологічного процесу й взаємодії елементів системи «людина – одяг – виробниче середовище» встановлено, що спеціальний одяг універсального призначення повинен мати високий рівень захисту від впливу шкідливих виробничих факторів (ШВФ) механічної та хімічної дії; бути зручним при виконанні основних робочих рухів; простим в експлуатації. Його конструкція має забезпечувати високий рівень функціональності також за рахунок необхідного переліку і зручного розташування похідних деталей (кишень і т.п.).

До споживчих вимог придатності спеціального одягу універсального призначення належать захисні, експлуатаційні, гігієнічні та естетичні. Виробничі вимоги одягу визначаються економічністю і технологічністю виробу.

Спеціальний одяг повинен задовольняти основні вимоги, зазначені в праці [219], а саме:

- забезпечувати збереження нормального функціонального стану людини і його працездатність протягом усього періоду експлуатації;
- забезпечувати захист людини від дії виробничих факторів;
- не чинити загальнотоксичної дії;
- бути достатньо зносостійким та естетичним.

Строк захисної дії спеціального одягу універсального призначення багато в чому визначається якістю, кількістю додаткових накладок [214–215].

Умови праці робітників, залежно від особливостей сфери застосування, створюють специфічний комплекс факторів. Ці фактори впливають на людину в умовах виробничого середовища та визначають ряд споживчих вимог до спеціального одягу універсального призначення для робітників, які представлені в таблиці 4.1.

За наведеною структурою споживчих вимог до спецодягу робітників необхідно, щоб виріб відповідав одночасно захисним (захист від механічних пошкоджень, загально-виробничих забруднень) та гігієнічним (паропроникність, повітропроникність, гігроскопічність) вимогам, що, згідно з визначенням, є фізичним протиріччям [206]. Таке фізичне протиріччя спричиняє технічне, оскільки, наприклад, для забезпечення спецодягом оливодіштовхувальності слід використовувати матеріал, що ймовірно не зможе забезпечити виконання гігієнічних вимог.

Усунути фізичне протиріччя можна шляхом використання типових прийомів подолання технічних суперечностей [205, 206].

Відповідно до принципу місцевої якості до-цільно наносити полімерне покриття не на основні деталі спецодягу, а на окремі коняч-руктивні елементи (підсилюючі накладки).

Таблиця 5.1

Структура споживчих вимог до спецодягу універсального призначення

Група споживчих вимог		Показник призначення	Шляхи забезпечення	Властивості, що забезпечуються
найменування	Позначення			
Захисні	x_1	Забезпечення захисту від механічних пошкоджень	Вибір матеріалів з необхідними захисними властивостями	Стійкість до дії тертя
		Забезпечення захисту від загально-виробничих забруднень		Розривне зусилля
Експлуатаційні	x_2	Легкість відновлення зовнішнього виду	Вибір оптимального матеріалу, незмінність зовнішнього вигляду	Опір багаторазовому згину
		Легкість очищення від виробничого забруднення	Вибір оптимального Матеріалу, знімні конструктивні елементи	Стійкість до дії проникнення ШВФ
Гігієнічні	x_3	Паропроникність	Вибір оптимального матеріалу	Зминання
		Повітропроникність	Вибір оптимального матеріалу, раціональна конструкція виробу	Зсідання
		Гігроскопічність	Вибір оптимального матеріалу за сировинним складом	Жорсткість при згинанні
Естетичні	x_4	Функціонально-конструкторська доцільність	Вибір оптимального матеріалу, раціональна конструкція виробу	Стійкість до хімічного чищення чи прання
		Художньо-технічне оформлення	Вибір оптимального матеріалу, раціональна конструкція виробу	Паропроникність
		Цілісність композиції	Відповідність матеріалів формі і конструкції, гармонійність кольорового рішення	
				Гігроскопічність
				Художньо-кolorистичне оздоблення тканини, зовнішній вигляд

За принципом динамічності запропоновано зробити накладки знімними, щоб забезпечити зручність в експлуатації спецодягу (знімати накладки, коли в них немає потреби, а саме під час перерв, відвідування їдальні тощо).

Використання розглянутих принципів створює необхідність встановлення окремих вимог як до матеріалів для спецодягу, так і до матеріалів для підсилюючих накладок.

З метою встановлення вагомих груп споживчих вимог та властивостей матеріалів для спецодягу універсального призначення проведено поетапне апріорне ранжування [206]: на першому етапі – ранжування груп вимог, на другому – властивостей матеріалів.

Кількість експертів склала 20 осіб. В якості експертів виступили викладачі кафедри технології та конструювання швейних виробів Хмельницького національного університету, конструктори та технологи швейних підприємств з виготовлення спецодягу (ТОВ «КОТОН СТИЛЬ», ТЗОВ «УЛІНЕ» м. Виноградів), майстри підприємств, що досліджуються.

Анкета складена за рекомендацією [206]. Ранжування виконувалося за допомогою спеціальної програми. За результатами обробки даних першого етапу апріорного ранжування побудована апріорна діаграма рангів, представлена на рис. 5.1, та сформована номенклатура властивостей для матеріалів спецодягу універсального призначення робітників та для матеріалів підсилюючих накладок спецодягу.

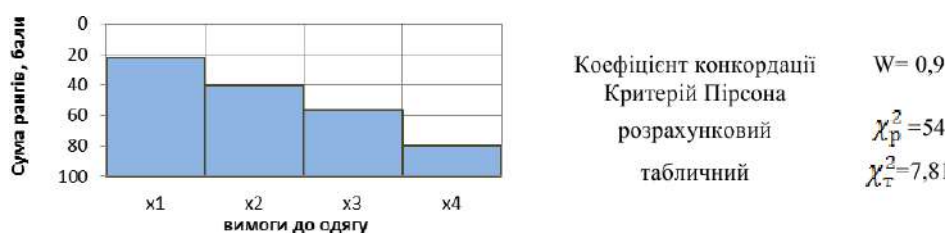


Рис. 5.1. Апріорна діаграма рангів для вимог спецодягу

Оскільки величини коефіцієнтів конкордації суттєво відрізняються від нуля, вважаємо, що вагомість окремих властивостей у всіх експертів суттєво повторюється.

Для проведення експертизи чи оцінки рівня якості конкретного виробу або матеріалу необхідно сформулювати номенклатуру показників якості. З апріорної діаграми рангів (рис. 5.1) видно, що менш вагомими є естетичні. Тому для оцінки рівня якості матеріалів для підсилюючих накладок та спеціального одягу універсального призначення для робітників, сформовано номенклатуру властивостей за вагомими групами споживчих вимог, а саме для захисних, експлуатаційних та гігієнічних (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

Результати апріорного ранжування показників властивостей матеріалів для спеціального одягу та підсилюючих накладок

Вимоги до одягу	Показник вагової властивості матеріалу	Матеріал			
		для спецодягу		для підсилюючих накладок	
		Позначення	Ранг	Позначення	Ранг
Захисні	Стійкість до дії тертя	$x_{1,1}$	20	$x_{1,1}$	36
	Розривальне зусилля	$x_{1,2}$	46	$x_{1,2}$	60
	Стійкість до дії проникнення ШВФ (забруднення)	$x_{1,3}$	54	$x_{1,3}$	24
Експлуатаційні	Жорсткість при згинанні	$x_{2,1}$	92	$x_{2,1}$	86
	Зсідання	$x_{2,2}$	154	$x_{2,2}$	120
	Зминання	$x_{2,3}$	146	$x_{2,3}$	94
Гігієнічні	Паропроникність	$x_{3,1}$	88	$x_{3,1}$	—
	Повітропроникність	$x_{3,2}$	120	$x_{3,2}$	—
	Гіроскопічність	$x_{3,3}$	180	$x_{3,3}$	—

Із загального переліку властивостей доцільно визначити вагомості матеріалів, значення яких забезпечують встановлення відповідності розглядуваного спецодягу та підсилюючих накладок в умовах експлуатації.

Встановлення вагомих вимог було проведено аналогічно встановленню вагомих груп споживчих властивостей. За отриманими результатами побудовані апріорні діаграми рангів (рис. 5.2).

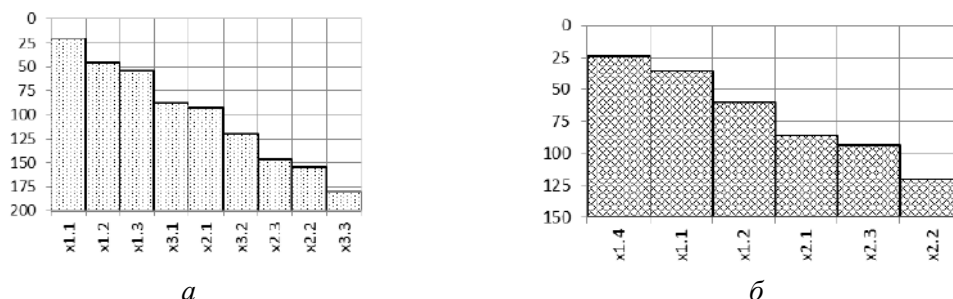


Рис. 5.2. Априорна діаграма рангів показників вагомих властивостей матеріалів для: *а* – спецодягу; *б* – підсилюючих накладок

Результати ранжування	Показники властивостей матеріалів для спецодягу	Показники властивостей матеріалів для підсилюючих накладок
Коефіцієнт конкордації	0,95	0,97
Критерій Пірсона:		
– розрахунковий χ_p^2	156,3	95,5
– табличний χ_m^2	15,5	9,34

Оскільки коефіцієнт конкордації для визначення вагомих властивостей для спецодягу та підсилюючих накладок перевищує 0,77, а значення критерію Пірсона розрахункового більше за значення табличного, то думки експертів є узгодженими, а результати ранжування – достовірними.

Також серед властивостей матеріалів для спецодягу були визначені найбільш значимі, шляхом визначення коефіцієнта значущості [203, 206]. Необхідність визначення коефіцієнтів значущості (вагомості) показників обумовлюється ще й тим, що збільшення кількості показників при комплексному оцінюванні відповідності, не тільки ускладнює процес вимірювання, а й приводить до збільшення сумарної похибки, яка складається з похибок окремих показників якості.

Номенклатура показників якості формується, ґрунтуючись на результатах проведених розрахунків таким чином, щоб визначений комплекс показників містив найбільш вагомні показники якості та в мінімально можливій кількості і при цьому давав змогу достатньо широко та вірогідно оцінювати ступінь відповідності виробу конкретного призначення вимогам до його рівня якості.

Коефіцієнт значущості характеризує вагомність показника чи вимоги у комплексі властивостей конкретного швейного виробу. Результати розрахунку коефіцієнтів значущості показників якості матеріалів для спецодягу наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Оцінка значущості показників вагомих властивостей матеріалів для спецодягу

Показник вагомих властивостей	Значення показника для:	
	матеріалів спецодягу	підсилюючих накладок
Стійкість до дії тертя	0,396	0,165
Міцність (розривне зусилля)	0,238	0,263
Жорсткість при згинанні	0,170	0,198
Стійкість до дії проникнення ШВФ	0,093	0,374
Паропроникність	0,103	–

З таблиці 5.3 видно, що найбільш значущим показником для вагомих властивостей матеріалів підсилюючих накладок спецодягу є стійкість до дії проникнення шкідливих виробничих факторів матеріалу та стійкість до дії тертя. Найбільш значущим показником для вагомих властивостей матеріалів спеціального одягу універсального призначення для робітників є стійкість до дії тертя та розривне зусилля.

5.3. Визначення деталей одягу та взуття, що найбільш навантажені у процесі носіння

Будь-який діючий процес виробництва характеризується рядом факторів виробничого середовища, які повністю визначають зміст, характер та окремі умови праці. Впливаючи сукупно та взаємопов'язано, фактори виробничого середовища визначають умови праці робітників, знижують її працездатність, а також погіршують самопочуття [203, 206, 209, 214].

Для спеціального одягу універсального призначення для робітників, який захищає від загальноновиробничих забруднень та механічного впливу, велике значення має дотримання експлуатаційних вимог, що забезпечують відповідність одягу умовам праці [202, 203].

На сьогодні захисний одяг робітників виготовляється відповідно до ДСТУ 7239:2011 «Системи стандартів безпеки праці засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація». Для встановлення типових конструктивних особливостей моделей спецодягу, що призначений для захисту від загальноновиробничих забруднень та механічних пошкоджень, виконано аналіз сайтів і представлення продукції кількох провідних fashion-брендів, що займаються виготовленням спеціального одягу ПромСІЗ [221], OLTEKS [222], ТОВ «УКРІНТЕКС» [223].

Проаналізовано, узагальнено і систематизовано основні принципи та етапи створення графічної експлікації модних інновацій даного актуального сектору моди. Проведений аналіз свідчить, що з'явилися нові типи підприємств з виготовлення спеціального одягу: гнучкі, ефективні, незалежні від інерційності великих серій. Візуалізація моди на сайтах цих підприємств представлена в чітко організованому процесі, що враховує три групи факторів впливу на ефективність інноваційного дизайн-проектування спеціального одягу [201, 210].

Кожен з проаналізованих сайтів складається з декількох розділів, посилання на які можна знайти на головній сторінці: About (Про бренд); Lookbooks (лукбука); Product Shots (Фотографії товарів); Stocklist (Список магазинів); Contacts (Контакти). Презентація виробів спеціального призначення здійснюється у вигляді аватарів 3D-манекенів (див. рис. 5.3, а), технічних ескізів (див. рис. 5.4), брендового спецодягу з логотипом (рис. 5.3, б) і відбувається за допомогою комп'ютерних технологій, що надають широкі колористичні можливості (рис. 5.3, в).

Основні види одягу та їх конструктивні особливості визначені формою та силуетом одягу, кроєм рукава, коміру. Виявлено, що переважає такий вид одягу, як спеціальний костюм, що складається з куртки та штанів (55 %). Комплекти спецодягу з куртки та штанів можуть бути з різними горизонтальними та вертикальними членуваннями. На другому місці – комбінезони спеціального призначення [221–226].

За результатами аналізу конструкції, найчастіше проєктують спецодяг прямого силуету (72 %), з вшивним сорочковим рукавом (64 %), зі стояче-відкладним коміром (73 %), з горизонтальними членуваннями (74 % – вигляд спереду, 62 % – вигляд ззаду, 64 % – в цілому по костюму), рис. 5.4.

Розділ 5. Застосування полімерів у виробів легкої промисловості

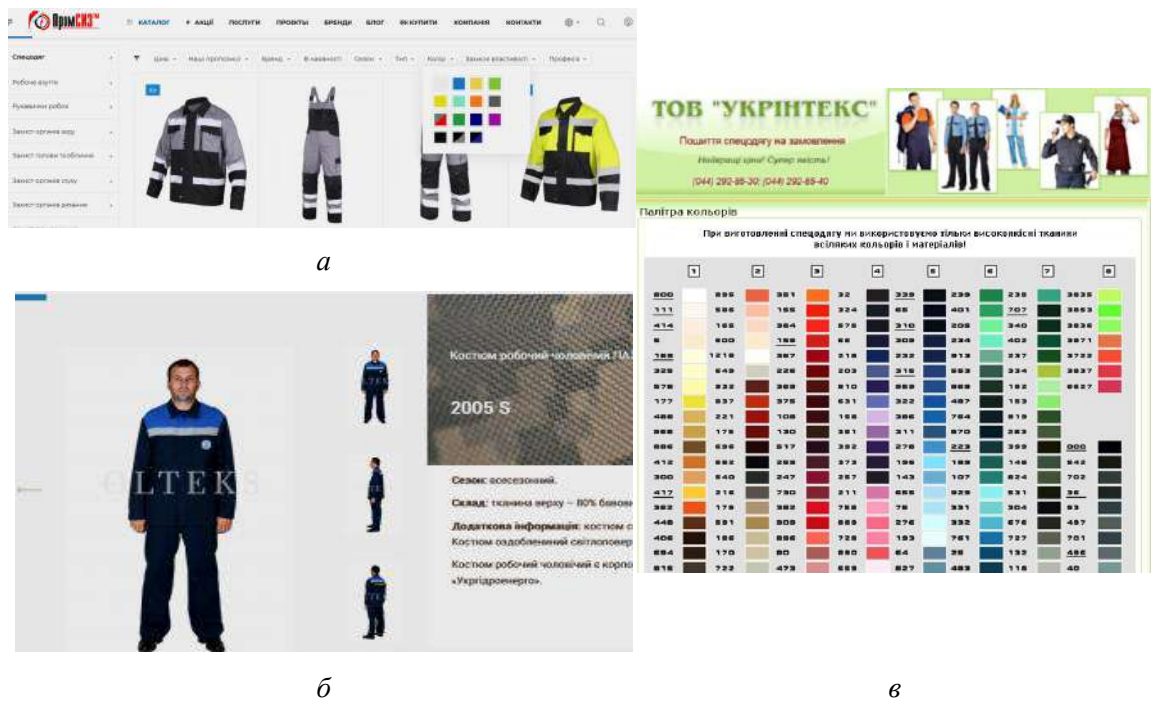


Рис. 5.3. Приклади сучасних варіантів візуального представлення виробів спеціального призначення

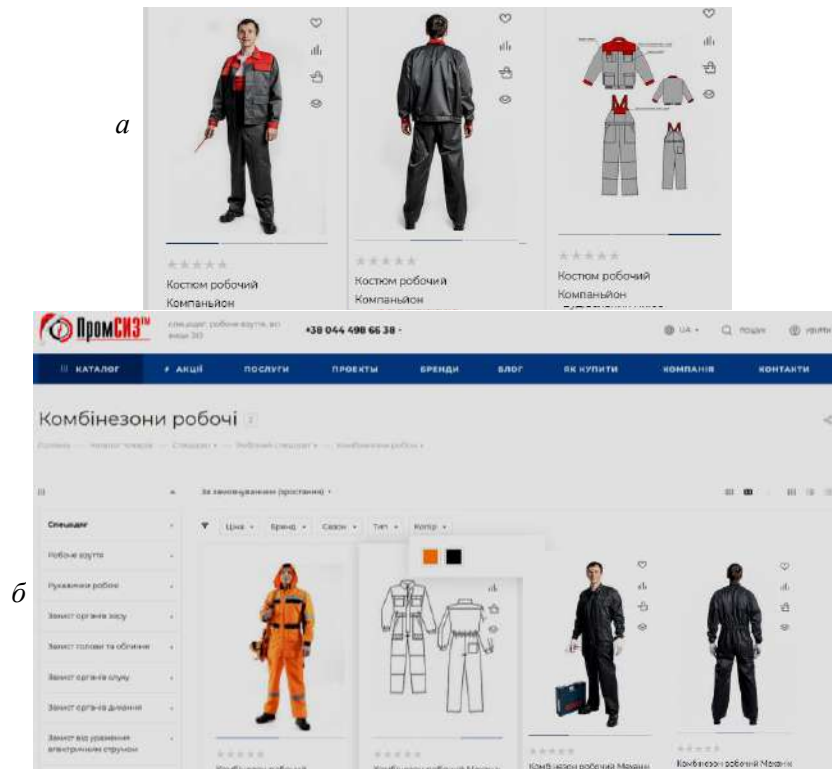


Рис. 5.4. Переважні види виробів спеціального призначення для захисту від загальнопромислових забруднень: *а* – костюми робочі; *б* – комбінезони робочі

Куртки в комплектах спецодягу можуть бути різної довжини, з різним видом кишень (накладні, в швах), їх кількістю (дві, три та більше) та місцем їх розташування (кишені по низу пілочок куртки, нагрудна, кишені на рукавах).

Центральна бортова застібка може бути потайною, на гудзики, тасьму-«блискавку», кнопки. Низ куртки та рукава можуть регулюватись за допомогою еластичного шнура (тасьми), за допомогою пат із гудзиками чи кнопками.

Штани на поясі можуть мати різні види кишень (накладні, з відрізним бочком) різної конфігурації та розмірів (з гострими кутами, з заокругленими, похилою чи з горизонтальною лінією входу). Місце розташування кишень – на передніх частинках штанів симетрично, на задніх частинах штанів, у бічних швах.

З метою гарантування безпечних умов праці людини в умовах загальновиробничих забруднень та механічних впливів, в конструкціях передбачають додаткові конструктивні деталі – накладки, що розташовуються відповідно до топографії впливу ШВФ. Частота зустрічності розташування накладок у спецодязі представлена на рис. 5.5.

З діаграми видно, що частіше накладки розміщують на таких ділянках: колін (35 %), ліктів (35 %) та сідниць (22 %).

Аналіз інноваційних проєктів fashion-брендів сегменту сучасного спеціального одягу виконано не тільки в системі «Спеціальний одяг – людина – середовище», а також в системі «Колір – форма – середовище».

Колірна гама в спеціальному одязі несе в собі не тільки стиль та імідж компанії, але й дуже потрібний і важливий психологічний аспект сприйняття, до якого в наш час все більше приділяють увагу як великі компанії, так і невеликі організації [221–226]. Проаналізовано частоту зустрічності кольорів матеріалів виробів спеціального призначення, що представлено на рис. 5.6.

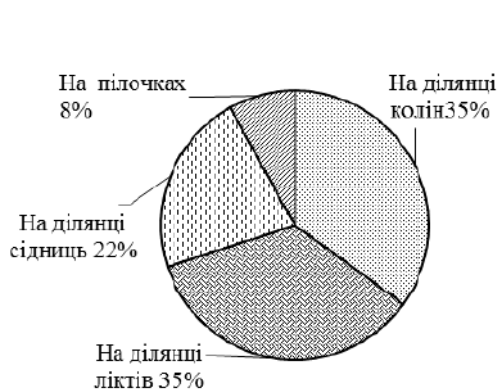


Рис. 5.5. Частота зустрічності розташування накладок у спецодязі

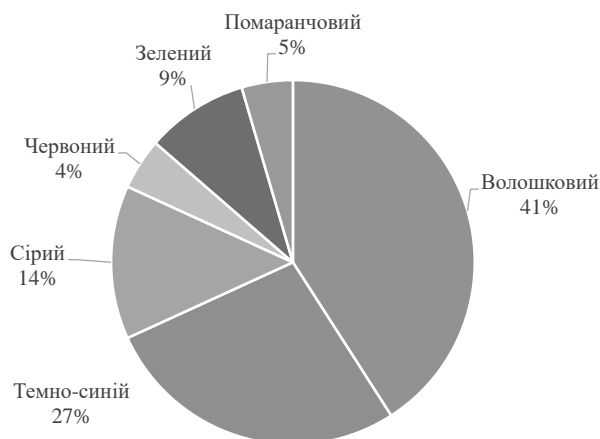


Рис. 5.6. Кольори матеріалів, що застосовуються для виготовлення спеціального одягу для захисту від загальновиробничих забруднень

Найбільшим зустрічними є наступні кольори спецодягу: волошковий (41 %) темно-синій (27 %), сірий (14 %), зелений (9 %), помаранчевий (5 %), червоний (4 %) [221–226].

Волошковий. Цей насичений колір звертає на себе увагу, але не дратує. Спецодяг такого кольору використовують майже у всіх галузях: співробітники автосервісу, ремонтники, монтажники, будівельники, сантехніки і т.п. Волошковий часто комбінують з темно-синім, щоб виглядало естетично і не помітно.

Темно синій – холодний і спокійний колір. Так одягаються робочі на виробництві, щоб розмірено робити свою роботу. Головна перевага цього кольору – він нейтральний і не приваблює зайвої уваги. Темно-синій колір налаштовує на робочий лад. На відміну від чорного він не такий офіційний і добре комбінується з яскравими кольорами: білим, жовтим, помаранчевим. На синьому тлі вони здаються яскравіше (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Приклади сучасних варіантів візуального представлення робочих комбінезонів популярних кольорів: а – на фігурі; б – на 3D-манекені

Таким чином, систематизація методів і прийомів гармонізації систем «Спеціальний одяг – людина – середовище», «Колір – форма – середовище» є основою інноваційного потенціалу художньо-естетичних факторів виробів спеціального призначення.

Інноваційний потенціал художньо-естетичних факторів виробів спеціального призначення. Останніми роками естетична складова вітчизняних спеціальних виробів не повністю задовольняє вимогам споживачів [211–214], що й визначає актуальність створення естетичних рядів у дизайн-ергономічному проектуванні одягу спеціального призначення.

До інновацій художньо-естетичних факторів відносяться творчі ескізи проектних образів моделей-ідей виробів спеціального призначення відповідно до конкретного технічного завдання: удосконалення процесів проектування комплектів спецодягу а також чоловічого робочого комбінезону в умовах ТЗОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів) [226].

Ескізи комплектів спецодягу і їх технічний опис представлено на рис. 5.8.

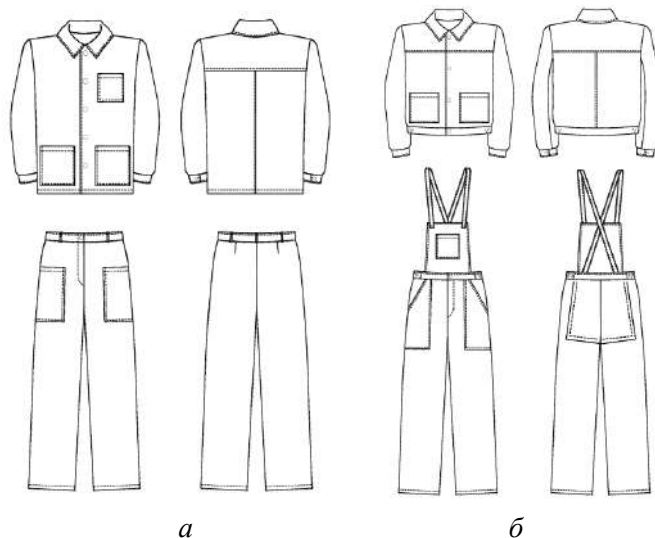


Рис. 5.8. Ескізи комплектів спецодягу універсального призначення, що експлуатується на сьогодні: а – вигляд спереду; б – вигляд ззаду

Технічний опис комплекту 1 (див. рис. 5.8, а). Куртка прямого силуету довжиною до лінії стегон. На пілочки оброблені бічні накладні кишені з прямими кінцями. На правій пілочці розміщена нагрудна накладна кишеня з прямими кінцями. Спинка із середнім швом та прямою кокеткою, що розташована по лінії лопаток. Рукав одношовний, вшивний, довгий. Низ рукава оброблений пришивною манжетою, що застібається на одну петлю і один гудзик. Застібка центральна на п'ять петель і п'ять гудзиків. Комір стояче-відкладний з гострими кінцями. По краю борту, шву пришивання кокетки спинки, середньому шву спинки, низу виробу, відльоту та кінцях коміра, краях кишень, нижніх краях манжет рукавів прокладена оздоблювальна строчка.

Штани прямого силуету, довгі. На передніх частинах штанів оброблені накладні кишені, бічні краї яких вшиті у бічний шов штанів. Лінія входу в кишеню пряма. На задніх частинах штанів запроєктована талієва виточка.

Застібка у шві банта на тасьму-«блискавку». Штани з пришивним поясом, що застібається на один гудзик та одну петлю. На поясі оброблено шість хомутиків. По лінії входу в накладні кишені, верхньому краю поясу та бічних краях хомутиків прокладена оздоблювальна строчка. Низ штанів – швом у підгін з відкритим зрізом.

Технічний опис комплекту 2 (див. рис. 5.8, б).

Комплект складається з куртки та напівкомбінезона, прямого вільного силуету.

Куртка довжиною до лінії талії, на пілочках пришивна кокетка та настроєні накладні кишені по лінії низу. Спинка з кокеткою та середнім швом. Рукав вшивний двошовний, довгий. Низ рукава оброблений пришивною манжетою, що має застібку на петлі та гудзики. Застібка центральна на чотири петлі та чотири гудзика.

Комір стояче-відкладний, з гострими кінцями. По краю борта, коміра, кокетки на пілочці та спинки та середньому шві спинки прокладена оздоблювальна строчка.

Низ куртки оброблений на ділянках бічного шва еластичною тасьмою.

Нагрудник напівкомбінезона має накладну кишеню. Лінія входу в кишеню пряма. На передніх половинках штанів накладні кишені, лінія входу в кишені пряма. На задній половинці штанів підсилювальна накладка. На поясі вставлена еластична тасьма для регулювання ширини по лінії талії, пришиті бретелі, що регулюються по довжині та застібаються на нагруднику, застібка у шві банта на тасьму-«блискавку».

По лінії входу в накладні кишені, верхньому та нижньому краях пояса, краях бретелей та нагрудника прокладена оздоблювальна строчка. Низ напівкомбінезона застрочений у підгін.

Чоловічий робочий комбінезон представляє собою поєднання в єдиний виріб робочої куртки і штанів (див. рис. 5.9).

Завдяки цілісному крою, така модель спецодягу практична і зручна у використанні. Поєднуючи деталі одягу, отримано комбінезони робочі прямого силуету, напівприлягаючі за допомогою куліси на текстильній еластичній стрічці.

З основних переваг модельного поєднання можна відзначити такі:

1. Ергономічний крій не обмежує рухів, дозволяючи виконувати фізично активні рухи і роботи з піднятими руками.
2. Забезпечення повного захисту тіла працівника.
3. Професійні тканини, які використовуються для пошиття робочого комбінезона, мають унікальні захисні властивості.
4. Практичність використання виражається у зручних конструктивних деталях – наявність функціональних кишень і тримачів.

На рис. 5.9 показано варіанти комбінезонів спеціального призначення, які виготовляються в умовах ТзОВ «УЛІНЕ».



Рис. 5.9. Ескіз робочого комбінезона спеціального призначення, що експлуатується на сьогодні:
a – базовий виріб; *б-в* – приклади колористичного вирішення базового виробу

Технічний опис комбінезона 1. Комбінезон прямого силуету. На передніх частинах розміщені нагрудні накладні кишені з прямими кінцями і горизонтальними застібками на тасьму-«блискавку». Спинка з прямою кокеткою, що розташована по лінії лопаток. Рукав одношовний, вшивний, довгий. Низ рукава призібраний на еластичну тасьму, ширина регулюється за допомогою двох ґудзиків. Застібка центральна на тасьму-«блискавку». Комір стояче-відкладний з гострими кінцями.

Штани прямого силуету, довгі. На передніх частинах штанів оброблені накладні кишені, бічні краї яких вшиті у бічний шов. Лінія входу в кишеню пряма. На задніх частинах штанів запроєктована талієва виточка. Низ штанів – швом у підгін з відкритим зрізом, ширина регулюється. По краю борта, шву пришивання кокетки спинки, низу виробу, краях кишень, прокладена подвійна оздоблювальна строчка.

На основі попереднього аналізу кольорів (див. рис. 5.10) та з урахуванням рекомендацій [221–225] запропоновано ряд колористичних рішень чоловічого комбінезона спеціального призначення в художній системі «Сім'я» на засадах діджиталізації [201]. Практична реалізація описаного підходу представлена у вигляді візуальних перетворень зображень ескізних форм проєктних образів цифрових виробів з використанням програми комп'ютерної графіки PaintTool SAI [227].

Для удосконалення стратегії просування fashion-бренду «УЛІНЕ» (м. Виноградів) та реалізації на ринку моделей виготовленого чоловічого робочого комбінезона розроблено базу даних візуальних перетворень зображень. Генерацію модних інновацій здійснено як візуалізацію художнього образного рішення майбутнього модного об'єкта в графічному, пластичному і колористичному рішеннях, за допомогою розробленої інформаційної моделі [228, 229]. Візуальний ряд сформовано за аналогією з презентацією представлення продукції fashion-бренду «Karcher» [221] (див. рис. 5.11).

Практична реалізація запропонованого підходу представлена у вигляді бази даних візуальних перетворень зображень робочого комбінезона спеціального призначення fashion-бренду «УЛІНЕ» в таблиці 5.4.

Візуальний ряд супроводжується коротким описом запропонованого виробу: робочий чоловічий комбінезон для захисту від механічних ушкоджень та загальних виробничих забруднень, прямого силуету із застібною на тасьму-«блискавку», основного темно-синього кольору з яскраво жовтими деталями та тримачами, фурнітура чорного кольору. Матеріал: бавовна [226].

Розділ 5. Застосування полімерів у виробах легкої промисловості



а



б

Рис. 5.10. Візуалізація композиційного рішення кольорів і фактур матеріалів цифрових моделей чоловічих робочих комбінезонів у графічному редакторі Paint Tool SAI



Рис. 5.11. Варіанти візуального представлення виробів спеціального призначення fashion-бренду «Karcher»

Таблиця 5.4

База даних візуальної презентації проектного образу робочого комбінезона спеціального призначення з підвищеними захисними властивостями

Фото виробу	Технічні ескізи виробу		Фото конструктивно-технологічних рішень елементів			
	ахроматичний	кольоровий				

Потенціал інноваційності утилітарних факторів спеціального одягу: топографія зношення спецодягу робітників. До інновацій утилітарних факторів спеціального одягу відносяться методи надання виробам спецодягу ТзОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів) підвищеної зносостійкості за рахунок додаткових конструктивних елементів шляхом їх обробки полімерними композиціями.

Апріорно доведено, що чим більше пошкоджений спецодяг внаслідок впливу шкідливих виробничих факторів (ШВФ), тим у нього більший ступінь зношення і відповідно зменшується термін його експлуатації.

Існують «критичні» ділянки конструкції деталей комплектів спецодягу, що втрачають свою захисну здатність і суттєво погіршують нормативні терміни експлуатації спецодягу внаслідок окремої та комплексної дії ШВФ. Для цього проаналізовані ознаки зовнішнього вигляду і якості використовуваного спецодягу після встановленого терміну експлуатації. Тобто визначено місця забруднення шкідливими факторами виробництва з диференціацією їх розподілу по поверхні виробу та визначенням площі їх дій на ділянках поверхні досліджуваного зразка одягу. Оглянуто 80 комплектів спецодягу, що були списані на ТОВ «Європаекспорт плюс» внаслідок втрати експлуатаційної захисної здатності [230].

У результаті візуального огляду костюмів робітників окреслено топографію впливу ШВФ (рис. 5.12), а саме: контури ділянок забруднення від бризок змащувально-охолоджувальної рідини верстатів, від замасленої поверхні деталей, що обробляються, та поверхонь обладнання, на якому обробляються деталі; від дії тертя (внаслідок торкання) об поверхні верстата, необроблених країв деталей; місця пошкодження від розривної дії внаслідок перевищення фізичних навантажень.

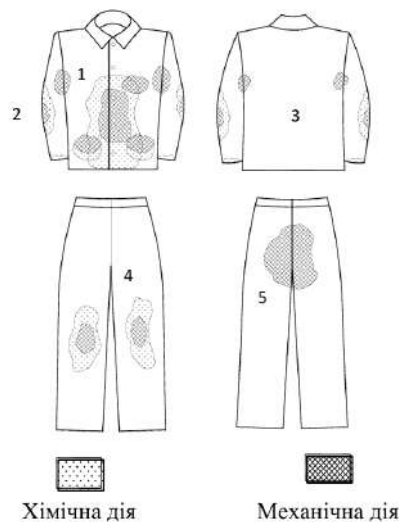


Рис. 5.12. Топографія зношення спецодягу робітників

Контури забруднених ділянок перенесено на кальку та поміщено в декартову систему координат [206], визначені величини площ забруднених та пошкоджених ділянок від дії сукупності факторів.

Вимірювання площ забруднених ділянок виконано в САПР «Грація» з попереднім внесенням отриманих контурів деталей. Внесення контурів виконано за допомогою макрооперації «Візуальна побудова» та послідовним введенням координат з клавіатури.

Результати розрахунків в САПР «Грація» представлені у вигляді середніх значень площ зношених ділянок досліджуваних комплектів у таблиці 4.5.

Таблиця 5.5

Площа забруднених та пошкоджених ділянок

Ділянки костюму (рис. 5.12)		Площа дії ШВФ, м ²
Розташування	Позначення	
Пілочка	1	0,1774
Рукав	2	0,0462
Спинка	3	0,0048
Передні частини штанів	4	0,0574
Задні частини штанів	5	0,0654

Натисканням в строчці меню на пункт «Модель» та опції «Створити специфікацію» викликається команда «Розрахунок площі». За допомогою вказаної команди отримані значення площ усіх зношених ділянок.

Статистична обробка даних здійснена за допомогою табличного процесора Microsoft Excel. За результатами таблиці 5.5, видно що на першому місці за забрудненістю та пошкодженістю від дії ШВФ є ділянка, яка розташована на пілочках куртки, на другому – на задніх частинах штанів, на третьому – на передніх частинах штанів, на четвертому – на рукаві. Вплив ШВФ на певні ділянки костюма працівників має систематичну дію. Отже, це повинно бути враховано при формуванні вимог до одягу працівників при виборі матеріалу, місця розташування і величини додаткових конструктивних елементів виробу.

5.4. Особливості надання виробу захисних властивостей за рахунок додаткових конструктивних елементів

У результаті експлуатації спеціального одягу відбувається як повне, так і локальне його зношення, що приводить до погіршення основної захисної функції. Тому характер конструктивних елементів визначається призначенням спецодягу і умовами його експлуатації. Відповідно вони мають певну форму, розмір та місце розташування для підсилення конкретної ділянки конструкції.

Розгляд моделей (див. рис. 5.8–5.9) [221–223] показав, що відповідно до захисних вимог з урахуванням умов виробництва, конструкція спеціального одягу не повинна мати конструктивних елементів, що сприяють виникненню небезпеки на робочому місці, зокрема вільних країв деталей костюма – бретелі чи клапани, що можуть потрапити під час обробки деталі до робочих органів верстату. Цим вимогам для куртки відповідає прямий силует з потайною застібною, без деталей, що виступають.

Також одним з необхідних конструктивних елементів для спецодягу є манжета, що забезпечує захист від потрапляння пилу та бризків змащувально-охолоджувальної рідини на тіло. Для регулювання ширини штанів по талії, ширини рукава по низу можуть використовуватись хлястики, еластична тасьма та ін. [210–212, 221–223].

Після аналізу моделей спецодягу встановлено, що в переважній кількості конструкцій для підвищення захисних властивостей передбачене виготовлення підсилювальних накладок. Місцем їх розташування є рукав, передні та задні частини штанів; інколи – пілочка куртки.

Відповідно до [207, 208] конструкції підсилюючих накладок уніфіковані, проте трапляються і спеціальні конструкції для захисту від впливу того чи іншого ШВФ [206]. За способом кріплення підсилювальні накладки можуть бути знімними та незнімними. [215].

Швидкому вибору оптимальних підсилюючих накладок перешкоджає відсутність систематизованої класифікації, яка набагато полегшила б здійснення правильного обґрунтованого вибору за відповідним алгоритмом. Цьому сприяє розробка класифікатора

підсилюючих накладок для спецодягу. На вибір підсилюючої накладки впливає топографія зношення через вплив ШВФ того чи іншого виробництва.

Поверхнею тканини здійснюється адсорбція ШВФ хімічної природи дії, внаслідок чого спецодяг потребує частого очищення, що призводить до швидкої втрати захисних властивостей. Тому для підвищення захисних властивостей спецодягу робітників доцільно використовувати як конструктивний спосіб, так і технологічний, а саме удосконалити у комплексі конструкцію спецодягу та підсилювальних накладок, крім того підвищити захисні властивості матеріалів, з яких виготовлятимуться накладки.

З урахуванням рекомендацій авторами визначено рівні структурних ознак накладки у спеціальному одязі [225, 229, 230].

Формування класифікатора накладок. Як показує аналіз літературних джерел [218–220] якісній та швидкій роботі спеціаліста по підборі варіанта конструктивно-технологічного рішення (КТР) підсилюючих накладок перешкоджає відсутність систематизованої класифікації. Така ситуація зумовлює неможливість їх подальшого представлення в системах автоматизованого проектування у цифровому форматі та неможливість вибору оптимального КТР накладки при проектуванні спеціального одягу без особистого втручання конструктора. Задля усунення таких перешкод необхідно виконати систематизацію конструктивно-технологічних рішень.

Систематизація масивів інформації щодо конструктивно-технологічних рішень накладки для спеціального одягу можлива за рахунок розробки системи їх кодування і класифікації.

Для розробки класифікатора доцільно використовувати структуру загального класифікатора продукції, тобто використовувати десяткове цифрове позначення. Запис інформації за допомогою цифр є більш компактним і забезпечує її обробку на різних рівнях конструкторсько-технологічної підготовки виробництва з використанням автоматизованих систем з елементами штучного інтелекту.

За результатами аналізу конструктивно-технологічної характеристики існуючого спеціального одягу, представлених в інтернет-каталогах, методичними рекомендаціями з проектування конструкцій спецодягу [205], новітніми розробками [215, 216], визначено ознаки, які найбільше характеризують конструктивно-технологічні рішення накладок: за зоною розміщення, формою, пакетом матеріалів, способом з'єднання шарів матеріалів накладки, способом з'єднання підсилювальної накладки з одягом.

На основі аналізу накладок з урахуванням рекомендацій запропоновано класифікатор накладок, який представлений у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Класифікатор накладок у спеціальному одязі

Код	Класифікаційна ознака	Код	Класифікаційна ознака
1. Накладки за зоною розміщення		2. Накладки за двома і більше зонами розміщення	
1	Плечовий одяг	1	Дві зони розміщення
1.1	Плечова	1.1	Плечова-ліктьова
1.2	Ліктьова	1.2	2–3 Ліктьова-низу рукава
1.3	Низу рукава	1.3	1–5 Плечова-Передньої/бічної частини пілочок
1.4	Передньої частини рукава	1.4	2–4 Ліктьова-Передньої частини рукава
1.5	Передньої/бічної частини пілочок	1.5	4–3 Передньої частини рукава – низу рукава
2	Поясний одяг	1.6	6–7 Колінна – крокового шва
2.1	Колінна	1.7	6–8 Колінна – бічних частин
2.2	Крокового шва	1.8	6–9 Колінна – низу штанів

Код	Класифікаційна ознака	Код	Класифікаційна ознака
2.3	Бічних частин	2	Більше зон розміщення
2.4	Низу штанів	2.1	6–8–9 Колінна – бічних частин – низу штанів
2.5	Верхньої частини задніх половинок	3–9	Резерв
2.6–2.9	Резерв		
3. Форма накладки		4. Пакет матеріалів	
1	Проста геометрична форма	1	Одношарові
1.1	Трикутник	1.1	Основна тканина
1.2	Ромб	1.2	Тканина з покриттям
1.3	Квадрат	1.3	Тканина з просочувачем
1.4	Трапеція	1.4	Шкіра
1.5	Багатокутник	1.5	Штучна шкіра
1.6	Коло	1.6	Трикотаж з металізованою сіткою
1.7	Овал	1.7–1.9	Резерв
1.8–1.9	Резерв	2	Багатошарові
2	Складна геометрична форма	2.1	Основна тканина з синтепоном
3–9	Резерв	2.2	Основна тканина з нетканим клейовим текстилем
5. Спосіб з'єднання шарів матеріалу накладки		2.3	Основна тканина з ударопоглинаючим елементом
1	Нитковий	2.4	Основна тканина з теплоізоляційним флокірованим матеріалом
1.1	Зшивний без обметаних зрізів 1.01.01	2.5–2.9	Резерв
1.2	Зшивний з обметаними зрізами 1.01.01	3–9	Резерв
1.3	Зшивний у підгин з відкритим зрізом	6. Кріплення накладки з одягом	
1.4	Накладний з двома закритими зрізами 1.06.01	1	Знімні
1.5	Обшивний в розкол 1.06.02	2	Незнімні
1.6	Подвійний 1.06.03	3–9	Резерв
1.7–1.9	Резерв	7. Спосіб з'єднання накладки з одягом	
2	Клейовий	1	Нитковий
2.1	З'єднувальний	1.1.	Накладний з закритим зрізом 2.05.01, 2.05.03
2.2–2.9	Резерв	1.2–1.9	Резерв
3	Зварний	2	Клейовий
3.1	З'єднувальний	2.1	З'єднувальний
3.2–3.9	Резерв	2.1–2.9	Резерв
4	Комбінований	3	Зварний
4.1	Поєднання ниткового та клейового способів	3.1	З'єднувальний
4.2–4.9	Резерв	3.2–3.9	Резерв
5	Відсутнє з'єднання (одношаровий пакет)	4	Комбінований
6–9	Резерв	4.1	Поєднання ниткового і клейового способів
		4.2–4.9	Резерв
		5	Кнопки
		6	Текстильна застібка
		7	Тасьма-блискавка
		8–9	Резерв

На основі класифікатора підсилюючих накладок сформована структура коду накладки (рис. 5.13).

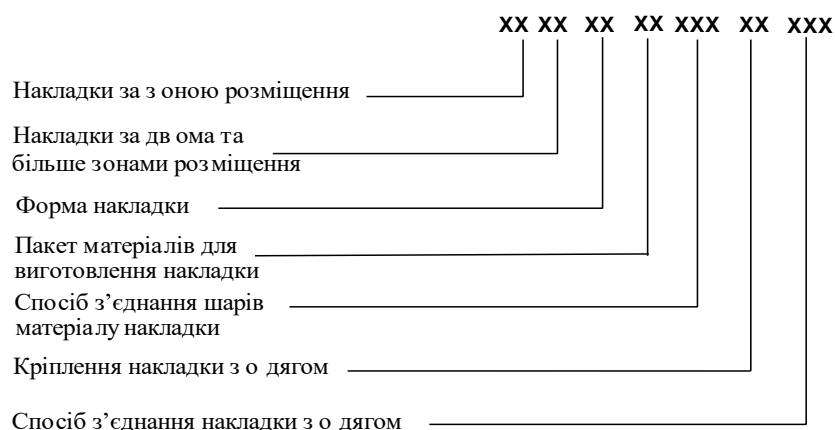


Рис. 5.13. Структура коду накладок в спеціальному одязі

Використання накладок за функціональним призначенням зумовлено здатністю матеріалів або деталей виробу протистояти дії різних видів небезпеки і їх різних комбінувань, подовженням терміну експлуатації, здатністю утримувати стабільні розміри та форму протягом заданого терміну експлуатації тощо.

Угрупування різновидів накладок за їх призначенням обумовлено дією небезпечних і шкідливих виробничих факторів виробничого середовища на конкретну зону виробу. Так, захисний одяг передбачає наявність накладок для захисту від стирання, інфрачервоного випромінювання, електричного струму, пилу; токсичних речовин, ковзання, води, розчинів нетоксичних речовин; розчинів кислот, лугів, органічних розчинників, нафти, нафтопродуктів, олій, жирів; шкідливих біологічних факторів; іскор та бризок розплавленого металу, механічних ударів, вібрації, статичного здавлювання, проколів, порізів та інших пошкоджень. Наприклад, накладки низу виробу найчастіше застосовують для захисту від стирання. Наприклад, в костюмі зварювальника, який виготовляють з термозахисних тканин, обов'язковим є використання накладок як по низу задніх половинок штанів для захисту від іскор і бризок розплавленого металу, які відбиваються від підлоги, так і на передніх частинах пілочок, рукавів і передніх половинках штанів. Водночас, відомими є накладки, які насторочуються на стояк горішнього коміра куртки металурга для унеможливлення подразнення шкіри шиї, накладки, які посилюють місця з'єднання бретелей або зав'язок з фартухом тощо.

Асортимент накладок у виробках для захисту рук (рукавиці, рукавички, нарукавники, надолонники тощо), ніг (бахили, гамаші тощо), голови (шоломи, підшоломники, підкаски тощо) також доволі різноманітний і маловивчений, і потребує окремих досліджень.

За зоною розміщення відомими є плечові накладки, ліктюві (налокітники), колінні (наколінники), накладки у верхніх частин задніх половинок (леї) тощо.

Захист різних ділянок тіла людини обумовлює такі рішення накладок, які поєднують два та більше їх видів.

Запропоноване класифікаційне угруповання накладок за пакетом матеріалів передбачає їхнє застосування як з основного матеріалу одягу, так і з матеріалів з підвищеними захисними властивостями, в тому числі знімними або стаціонарними з амортизуючими прокладками для надання цим деталям специфічних властивостей. Накладки можуть виготовляти з тканин різного сировинного складу, структури, призначення тощо; натуральної

та штучної шкіри, трикотажних полотен; нетканих матеріалів; матеріалів з покриттями, просочуваннями тощо. Відомим є поєднання різних матеріалів у накладках – наприклад, тканина та трикотажне полотно тощо.

Вибір матеріалів для захисного одягу відповідного призначення обумовлює способи з'єднання деталей накладок і виробу, до яких належать нитковий, зварний, клейовий, комбінований, а місця їх з'єднань можуть бути герметизованими.

Слід зазначити, що накладки можуть бути плоскими, об'ємними і комбінованими. Як правило, об'ємні накладки є більш ергономічними і ефективними при динамічних навантаженнях, тому що мають більший ступінь відповідності рухам працівника, здійснюють менший тиск на суглоби та не призводять до його швидкої втомлюваності. Причому ергономічними мають бути всі шари виробу, які розташовані під накладкою. Відомими є колінні, плечові, ліктьові накладки у вигляді кишень із стаціонарно розміщеними або знімними прокладками, зокрема амортизуючими.

У спеціальному одязі для захисту від виробничих забруднень широко використовуються леї – накладки, які розміщено у верхніх частинах задніх половин штанів, напівкомбінезона, комбінезона, шортів. Використання таких накладок є доцільним при виконанні робіт сидячи. Варто відмітити, що леї можуть бути з прокладками (рис. 5.14, д), в тому числі амортизуючими.

Залежно від конкретних умов експлуатації такі накладки виготовляють: у крокових швах (рис. 5.14, а, в, д, е); одночасно у бічних і крокових швах (рис. 5.14, б), настрочними з розміщенням зрізів у бічних швах (рис. 5.14, б); у шві пришивання пояса (рис. 5.14, в); вистьобаними (рис. 5.14, д) тощо [219, 220].

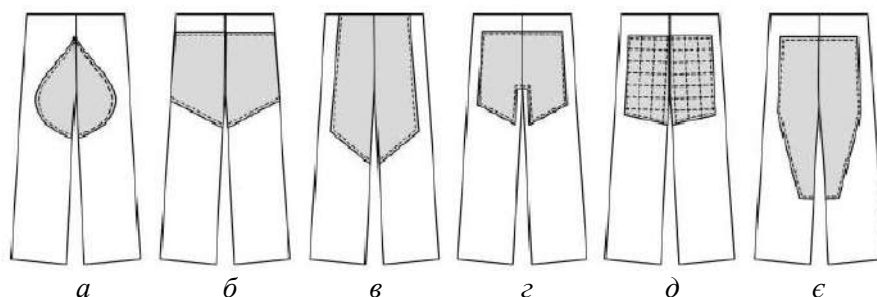


Рис. 5.14. Приклади різновидів елементів (оформлення лей) у захисному одязі

Асортимент накладок бічних частин в плечових і поясних виробах є обмеженим. Підвищення зносостійкості і/або захисних властивостей бічних ділянок виробу забезпечують відповідні накладки, які різняться за формою, розмірами, площею тощо. Ці ділянки потребують підвищеного захисту для зменшення сили ударів та інших механічних дій завдяки використанню амортизаційної прокладки. Приклади різновидів бічних накладок у поясних виробах наведено на рис. 5.15.

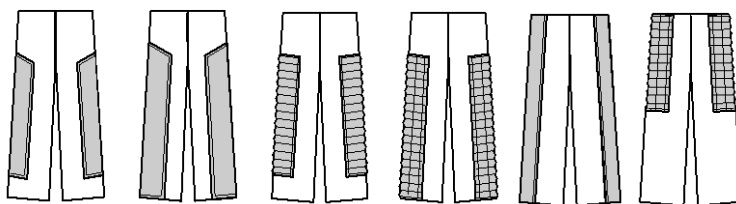


Рис. 5.15. Приклади різновидів елементів (оформлення накладок бічних частин) у поясних виробах захисного одягу

Найбільш розповсюдженими серед усіх видів накладок є наколінники. Відомо, що наколінник – це підсилювальна чи захисна накладка на зовнішній стороні передніх половин штанів, напівкомбінезона, комбінезона в ділянці коліна [219, 220].

В цьому дослідженні запропоновано різновиди колінних накладок з полімерним покриттям для робочих чоловічих комбінезонів для захисту від механічних ушкоджень та загальних виробничих забруднень, прямого силуету із застібною на тасьму-«блискавку», конструктивно-технологічне рішення яких і раціональні методи технологічної обробки наведено на рис. 5.16 та 5.17. Наколінники-кишені із знімними прокладками можуть мати вхід згори, знизу і збоку. Для унеможливлення потрапляння в кишеню пилю, води тощо застосовують клапани, за умови вкладання прокладки згори або розміщують вхід в неї знизу.

Залежно від конкретних умов експлуатації наколінники можуть бути з членуваннями; виточками (рис. 5.17, з); вистьобані (рис. 5.17, д); настрочні з розміщенням зрізів тільки у бічних швах (рис. 5.16, б, д), тільки у крокових швах (рис. 5.16, е), одночасно у бічних і крокових швах (рис. 5.16, з; 5.17, а–з); настрочні з розміщенням зрізів, які перекривають бічний або кроковий шви, або обидва, або які не входять ні до бічного, ні до крокового швів тощо. Відомими є різновиди комбінованих накладок шляхом поєднання наколінників з накладками передніх половин, верхніх частин, низу штанів, бічних частин, і крокового шва тощо.

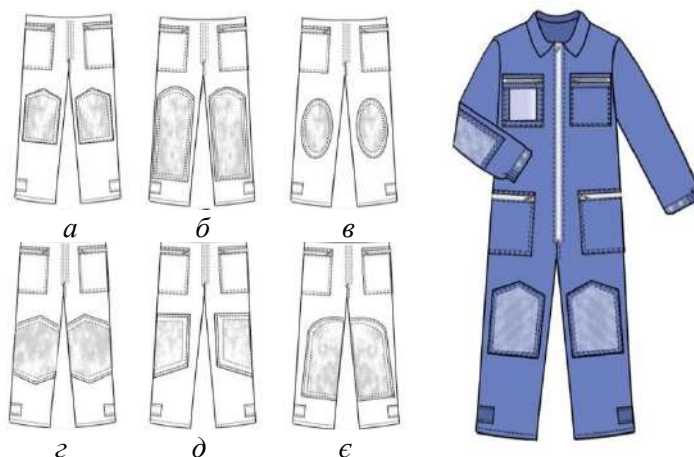


Рис. 5.16. Різновиди наколінників з полімерним покриттям для робочого комбінезона 1

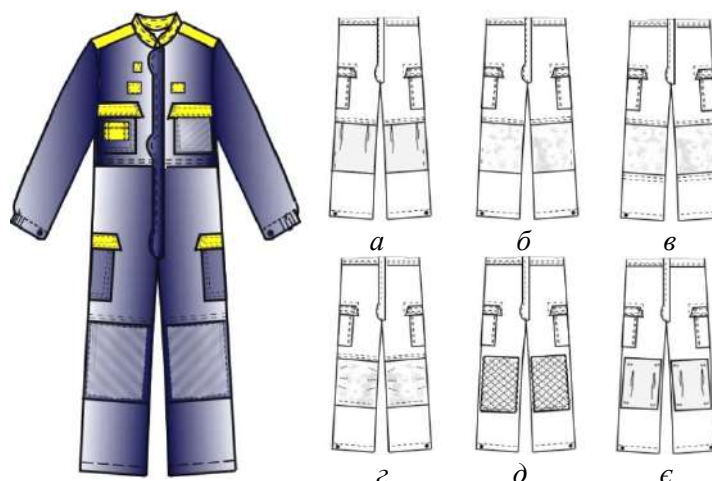


Рис. 5.17. Різновиди наколінників з полімерним покриттям для робочого комбінезона 2

Отже, при проектуванні захисного одягу і, зокрема, накладок для конкретного виду виробництва важливим є врахування всіх вимог до виробу спеціального призначення та матеріалів для його виготовлення. При цьому кількість накладок має бути необхідною і достатньою за умов ергономічності, технологічності та економічності конструкції. При розробці конструктивно-технологічних рішень накладок в конкретній ситуації слід врахувати інформацію про призначення захисного одягу і галузь виробництва. Аналіз різновидів накладок в ньому дозволив виявити їх конструктивні і технологічні особливості.

Запропонована систематизація різновидів накладок захисного одягу за різними класифікаційними угрупованнями спрямована на формування інформаційної бази цих деталей, їх конструктивних і технологічних характеристик з можливістю прогнозування, розширення асортименту. Розроблена класифікація дозволить розробити матрицю уніфікованих конструктивних елементів на основі принципів трансформації і створити інформаційну базу даних таких елементів з визначенням розмірів, місць розташувань, способів з'єднання з виробом.

5.5. Проектно-конструкторська проробка спеціального одягу

Виготовлення сучасного ефективного захисного одягу потребує принципово нових підходів до його дизайн-проекування. Тому досить поширеними стають системи автоматизованого проектування одягу (САПР), в англійському написанні CAD System (Computer Aided Design). Їхнє використання дозволяє значно зменшити час виконання розробки та використовувати для цього засоби з одночасним збільшенням точності проектно-розробки, скороченням витрат матеріалів і часу обробки за рахунок оптимізації роботи з ПЕОМ.

5.5.1. Процес дизайн-проекування спеціального одягу у САПР «Julivi»

Запропонований одяг для захисту від механічних ушкоджень та загальних виробничих забруднень є ергономічним та максимально захищає тіло робітника, сумісний з іншими засобами індивідуального захисту. Для розробки захисного одягу використано системний підхід. Конструкція спецодягу виконана в «Julivi» CAD, що забезпечує високу точність розробки конструкції і простоту виготовлення в умовах масового виробництва. В якості вихідної конструкції з бази даних АРМ Дизайнер САПР «Julivi» обрано креслення базових конструкцій чоловічої сорочки і чоловічих штанів за методикою «Мюллер і син» [176]. Конструкція робочого комбінезона побудована за вимогами ДСТУ EN ISO 13688:2016. «Одяг захисний. Загальні вимоги» [154] на типову фігуру 188-116-104 за наданим ескізом. Етапи розробки моделі спецодягу представлені на рис. 5.18–5.23 [174, 183].

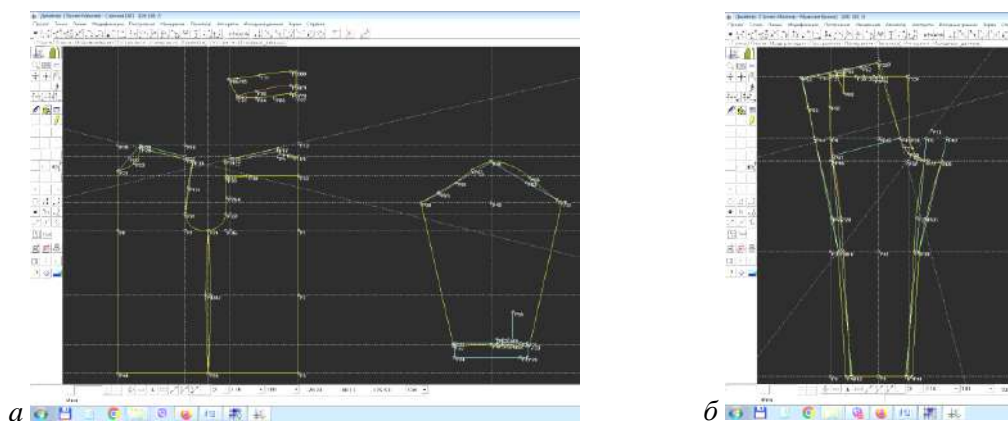


Рис. 5.18. Вихідна конструкція за методикою «Мюллер і син» з бази даних АРМ Дизайнер САПР «Julivi»: а – чоловічої куртки; б – чоловічих штанів

Розділ 5. Застосування полімерів у виробх легкої промисловості

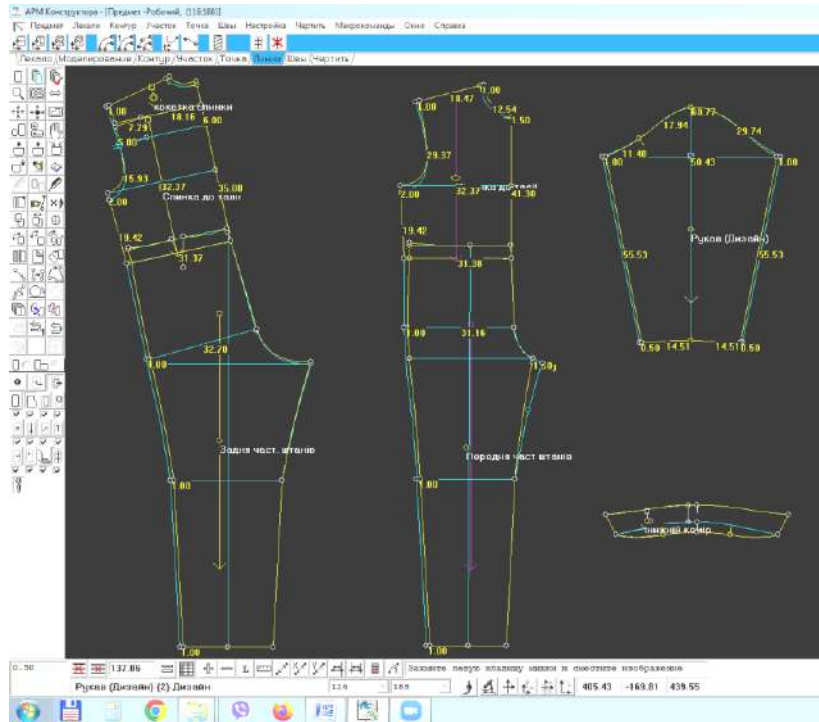


Рис. 5.19. Процес конструктивного моделювання для побудови комбінезона спеціального призначення

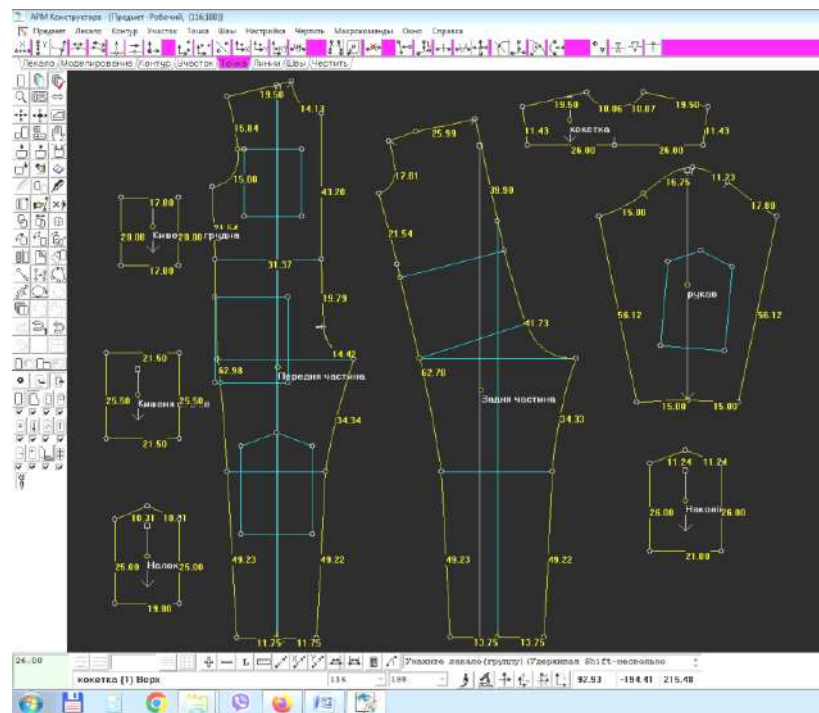


Рис. 5.20. Кресленник модельної конструкції робочого комбінезона 1

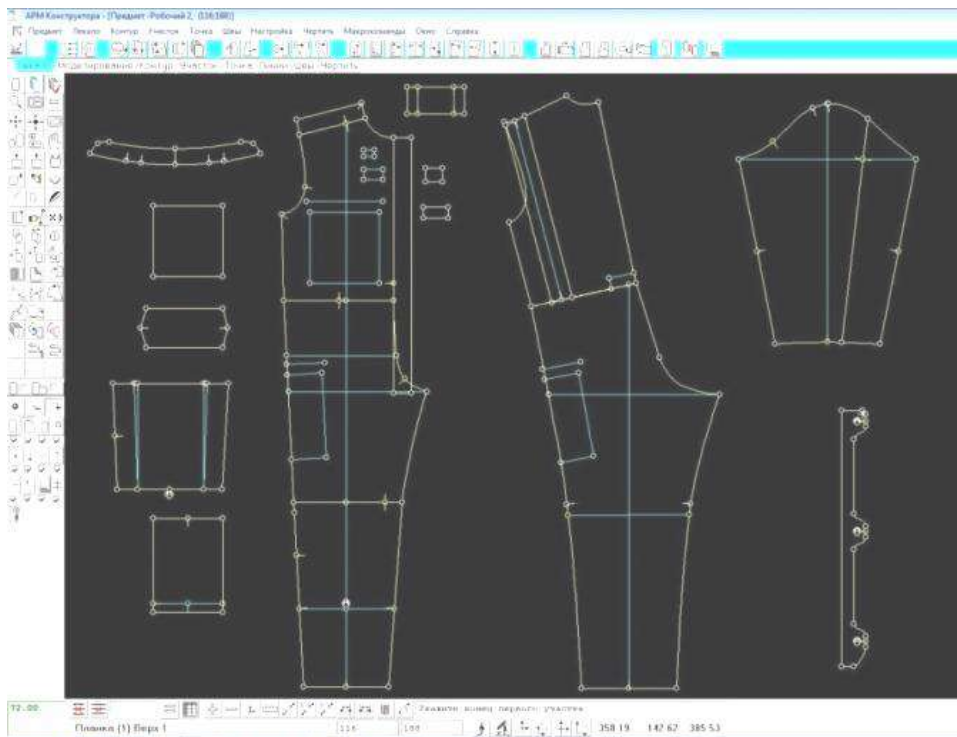


Рис. 5.21. Кресленик модельної конструкції робочого комбінезона 2

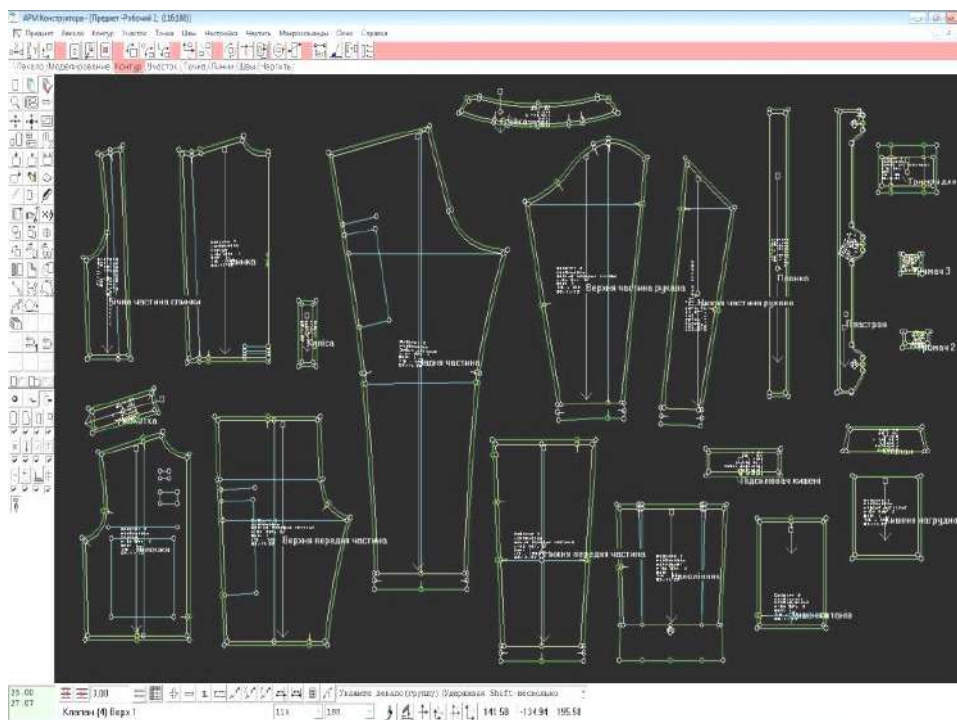


Рис. 5.22. Кресленики основних лекал чоловічого робочого комбінезона 2

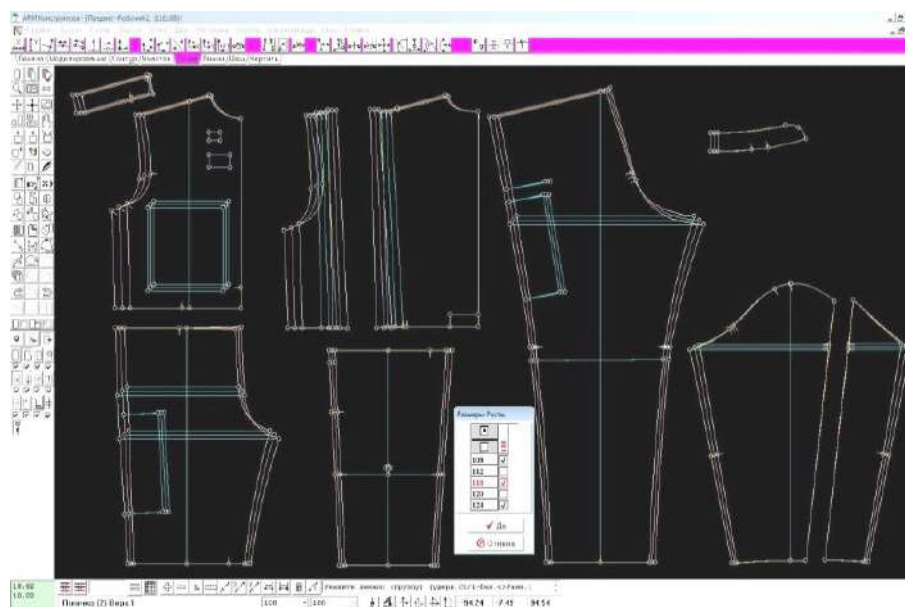


Рис. 5.23. Кресленики градації чоловічого робочого комбінезона 2

5.5.2. Процес візуалізації віртуальної моделі спеціального одягу у САПР «Julivi»

Процес візуалізації віртуальної моделі виробу на тривимірному манекені індивідуальної фігури споживача у середовищі «Julivi» передбачає виконання таких етапів:

1. Зміна розмірів стандартного манекена середовища «Julivi» відповідно до розмірів типової фігури споживача 188-116-100 у діалоговому вікні «Редактор розміру манекена».

2. Візуалізація процесу одягання виробу на віртуальну модель фігури людини (див. рис. 5.24, б) з демонстрацією виробу на фігурі у «Вікні аватара» і процесу розташування лекал навколо технічного ескізу фігури у «Вікні лекал».

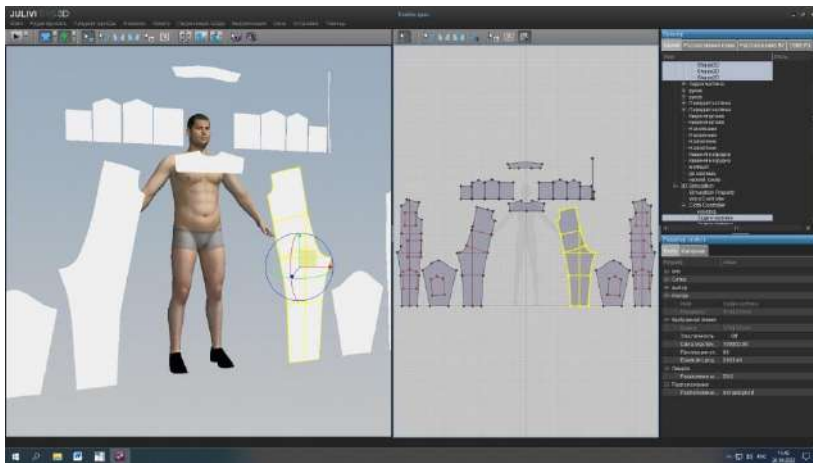
Розташування деталей навкруги віртуального тіла людини виконано за допомогою контрольних точок, які відображають ключові позиції на тілі, такі як груди, стегна, талія, пройма. Контрольні точки належать контрольному обмежуючому масиву, що покриває всі точки тіла аватара. Опція «Зшивання сегментів» дозволила утворити шви. Для відтворення віртуальної примірки на екрані монітора використано кнопку «Симуляція» [228].

Відповідно до ДСТУ EN ISO 13688:2016 [202], конструкція захисного одягу має забезпечувати правильне положення одягу на тілі користувача та гарантувати незмінність його положення на передбаченому місці протягом усього визначеного періоду використання з урахуванням факторів навколишнього середовища, можливих рухів і поз, які приймає користувач у процесі роботи чи іншої діяльності. Для адаптації захисного одягу до морфології користувача передбачено такі можливі засоби, як відповідні системи регулювання або відповідні діапазони розмірів.

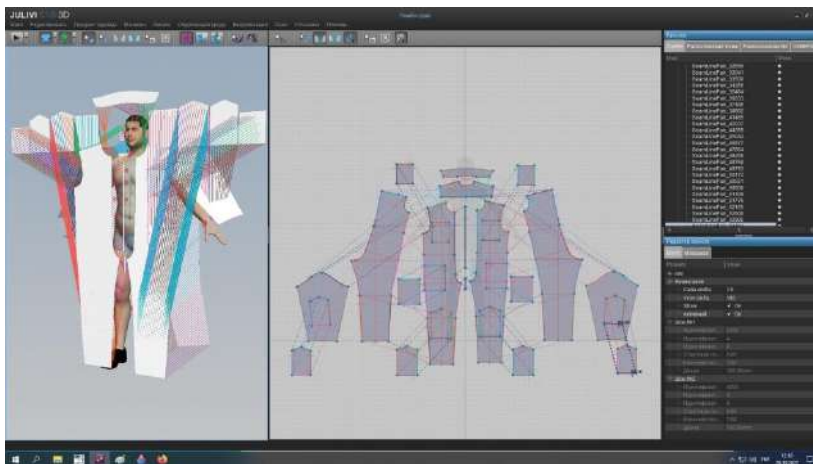
Для того, щоб переконатися, що неправильна посадка одягу не перешкоджає результатам подальшої оцінки посадки конструкції, віртуальну модель робочого комбінезона оцінювали в режимі сітки (див. рис. 5.25–5.26).

Задання і зміна текстури тканини виконано за допомогою підпункту «Редактор властивостей → Матеріал → Властивості поверхні → Поверхня текстури» [231].

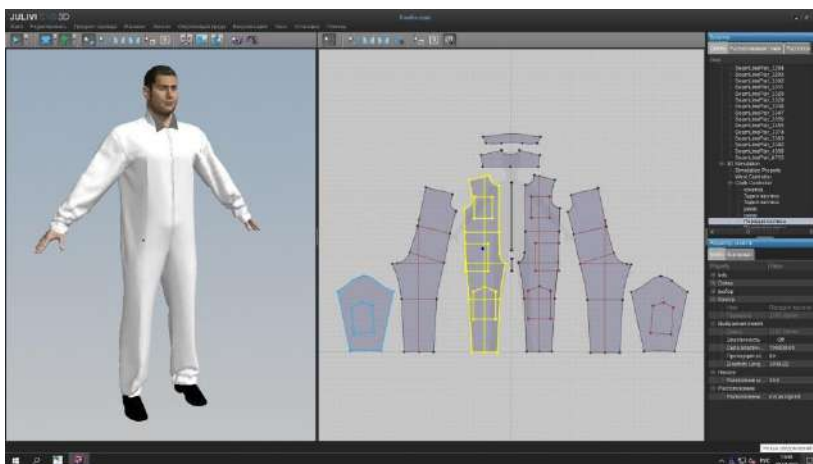
Зміна кольору відбувається у діалоговому вікні налаштувань властивостей матеріалу на одній з вкладок варіантів текстури та кольору.



a



б



в

Рис. 5.24. Етапи одягання комбінезона 1 на 3D-манекен: *a* – завантаження лекал в CLO 3D; *б* – орієнтування деталей до манекена і «зшивання деталей»; *в* – результат «одягання»

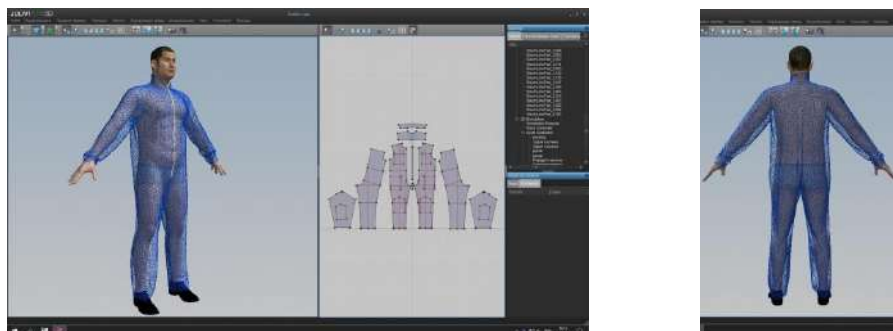


Рис. 5.25. Перевірка посадки конструкції в режимі поверхні одягу «Сітка» (комбінезон 1)

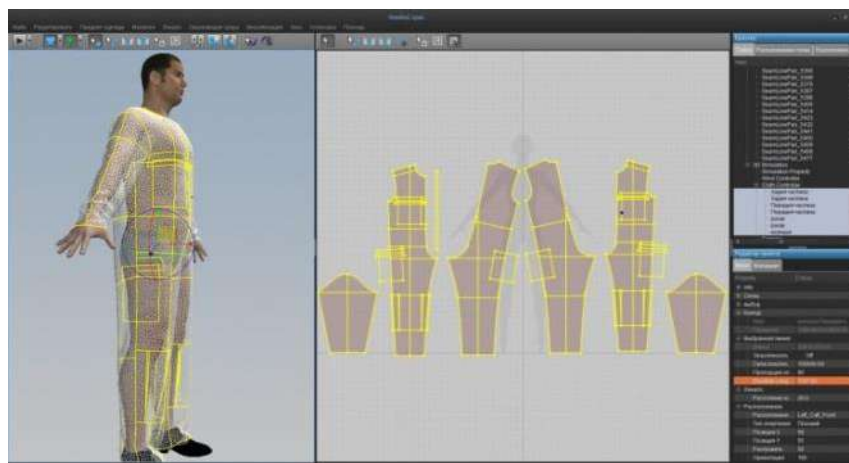


Рис. 5.26. Візуалізація «одягання» комбінезона 2 на 3D-манекен: перевірка прилягання конструкції та розташування накладних елементів у режимі поверхні одягу «Сітка»

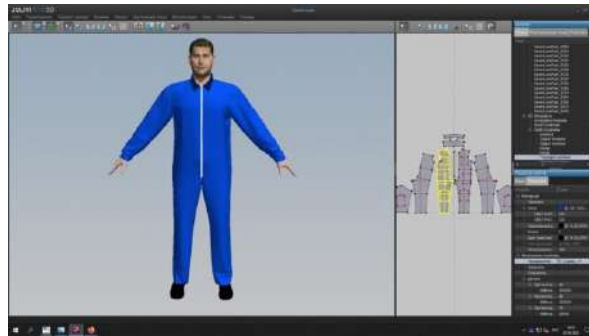
Для симуляції поверхні текстури робочого комбінезона обрано текстуру тканини саржа, що є одною з рекомендованих для спеціального одягу. Деталям комбінезона надані фізичні властивості, що характерні для тканини – бавовняна тканина.

В результаті у полі аватара отримано симуляцію одягання виробу на віртуальний манекен з нанесеною текстурою, заданими властивостями матеріалу і кольором та вказаними лініями зшивання деталей (див. рис. 5.27).

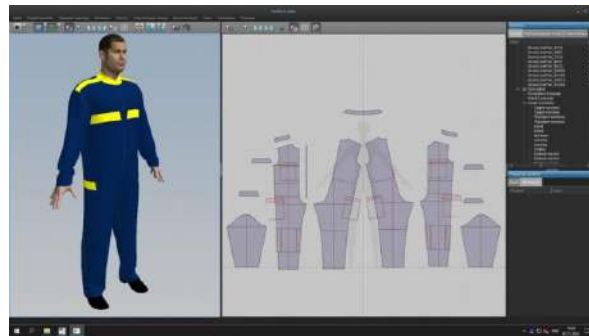
Режим підсвічення контурних ліній лекал дозволяє уточнити місце розміщення накладних деталей на виробі (див. рис. 5.28).

Візуальний аналіз моделей комбінезонів свідчить про збереження типового вигляду окремих деталей і конструкції загалом.

За необхідності, конструкція захисного одягу має передбачати можливість застосування інших елементів захисного одягу чи спорядження того самого виробника для формування повного захисного комплекту. В разі застосування двох чи більше елементів разом вони мають бути сумісні та кожний з них має відповідати вимогам свого власного стандарту. Жодний з них не повинен знижувати експлуатаційних властивостей іншого(-их) елемента(-ів), а в місцях з'єднання цих виробів необхідно забезпечити однаковий рівень захисту, наприклад у комбінації рукавів з рукавичками, штанів з взуттям, каптура з респіратором.

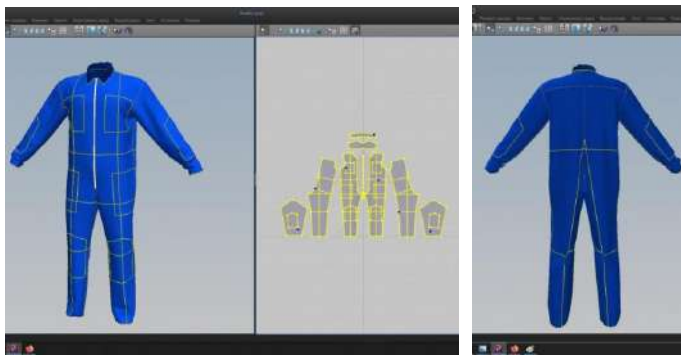


a

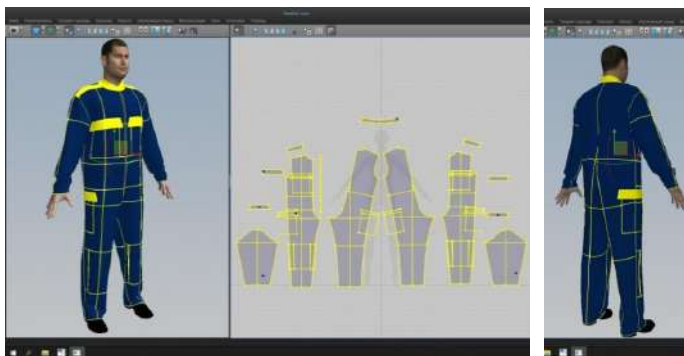


б

Рис. 5.27. Готовий вигляд: *a* – комбінезона 1; *б* – комбінезона 2



a



б

Рис. 5.28. Режим підсвічення контурних ліній лекал: *a* – комбінезона 1; *б* – комбінезона 2

5.6. Технологічне пророблення спеціального одягу

Потенціал інноваційності утилітарних факторів спеціального одягу. До інновацій утилітарних факторів спеціального одягу відносяться методи надання виробам спецодягу ТзОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів) підвищеної зносостійкості за рахунок запропонованих матеріалів і додаткових конструктивних елементів шляхом їх обробки полімерними композиціями.

Матеріали захисного одягу не повинні несприятливо впливати на гігієну та здоров'я користувача. Матеріали не повинні в передбачуваних умовах звичайної експлуатації розпадатися, виділяючи токсичні, канцерогенні, мутагенні, алергенні, зі шкідливим впливом на репродуктивну функцію та інші шкідливі речовини [152, 154]. Кожний шар матеріалу захисного одягу має відповідати таким вимогам:

– вміст хрому VI в шкіряному одязі не повинен перевищувати 3 мг/кг згідно з ISO 17075;

– усі металеві матеріали, які можуть вступити в тривалий контакт зі шкірою (наприклад, штифти, арматура), повинні мати показник виділення нікелю менше ніж 0,5 мкг/см² на тиждень. Випробування проводять згідно з EN 1811;

– значення рН матеріалу захисного одягу має бути більше ніж 3,5 та менше ніж 9,5. Метод випробування для шкіри – згідно з ISO 4045, для текстильних матеріалів – згідно з ISO 3071;

– не повинно бути виявлено азопігментів, які виділяють канцерогенні аміни, внесені до переліку з EN 143621, метод визначення яких не встановлено в цьому стандарті [230].

Таблиця 5.7

Характеристика основного матеріалу чоловічого комбінезону (ТзОВ «УЛІНЕ»)

№ з/п	Назва матеріалу	Маса зразка, г	Товщина, мм	Лінійна густина, г/м	Поверхнева густина, г/м ²
1	Бавовняна тканина	1,592	0,571	15,92	318,4

Для з'єднання деталей чоловічого робочого комбінезона обрано швейні нитки, характеристика яких наведена в таблиці 4.8.

Таблиця 5.8

Характеристика швейних ниток

Умовний номер	Сировинний склад, %	Лінійна щільність, текс	Розривне зусилля сН
65Л	ПЕ – 100	65,5	2100

В якості основної фурнітури запропоновано тасьму-«блискавку», характеристика якої наведена в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9

Характеристика фурнітури

№ з/п	Назва	Загальна характеристика
1	Тасьма-«блискавка» 1	Матеріал – 100 % віскоза, ширина зубців 2,5 мм, матеріал зубців 100 % ПАМ, довжина 80 см
2	Тасьма-«блискавка» 2	Матеріал – 100 % віскоза, ширина зубців 2,5 мм, матеріал зубців 100 % ПАМ, довжина 22 см

5.6.1. Вибір обладнання та оптимальних режимів технологічної обробки

Одним з напрямів вдосконалення виготовлення спеціального одягу є розробка малоопераційної технології за рахунок скорочення швів, застосування паралельних і послі-

довно-паралельних методів обробки, суцільнокроєних деталей. Все це дозволяє рекомендувати для виготовлення спецядягу напіваавтоматичне обладнання, двоголкові машини, зшивально-обметувальні машини, а також швейні машини, максимально обладнані пристроями малої механізації.

Використовуються машини човникового і ланцюгового стібків.

Можна рекомендувати наступне обладнання [230]:

– одноголкові машини човникового стібка: 274-140342 (Дюркопп-Адлер), 481-G-8/01-900/99-917/02-972/21-926/01 (Пфафф), 8334/4563, 8332/3783 (Алтін), BD-DD7100-9-1 (Бразер), DLU-5490-6 (Джукі) тощо;

– двоголкові човникового стібка: 852Ч10,852Ч12, 85228(36) (Росія), LT2-B845-900S (Бразер), LH-1162-5-4В/МС-210 (Джукі), 294-185082/Е6/8 (Дюркопп-Адлер), 1242-720/04-900/61-910/5 (Пфафф) тощо;

– одноголкові машини ланцюгового стібка: 173-141521, 171-141521 (Дюркопп-Адлер), 5489-814/01-748/56 (Пфафф) тощо;

– двоголкові машини ланцюгового стібка: DT4-B261-012Т (Бразер), MS-261J, MH-380/AT-8 (Джукі), 171-141521/Е208/0,4 (Дюркопп-Адлер);

– зшивально-обметувальні машини:

а) чотириниткові: MO-2506E, MO-2514E-BE6-300 (Джукі), AZ-8502-C5DF-C5DA (Ямато), «Маузер Спеціаль» 9751-142 FA3/14-463 (Пфафф), EF4-V51-22-6 (Бразер), 8515/710 (Алтін) тощо;

б) п'ятиниткові: 8515/720 (Алтін), MA4-V92-63-5 (Бразер), Z610-C5DA (Ямато), MO-2516E-DH6-500 (Джукі) тощо.

Таблиця 5.10

Характеристики швейного обладнання

№ з/п	Клас машини, призначення	Вид стібка	Швидкість головного вала	Довжина стібка, мм	Механізм переміщення	Вид матеріалу за товщиною	Додаткові дані
Універсальні машини							
1	DLU-5490-6 (Джукі)	301	3500	4,0	Комбінований	Середні	Автоматичне підрізання ниток та піднімання лапки, виконання закріпки
Спеціальні машини							
2	НВ-500 Спец. машина для вшивання рукавів в пройми	301	1200	4,5	Диференціальний	Середні	Автоматичне обрізання ниток
3	LH-1162-5-4В/МС-210 (Джукі) Прокладання оздоблюючих строчок	2×301	2800	6,0	Комбінований	Середні	Двоголкова. Автоматичне підрізання ниток, піднімання лапки, виконання закріпок, відключення голки при виконанні строчок в кутах
4	MO-2514E-BE6-300 (Джукі)	514	8000	2,5	–	Середні	-
5	DLM-5400NF-7-WB-AK/85 для з'єднання деталей з підрізанням припусків	301	4500	4	Нижня рейка	Легкі та середні	Автоматичне підрізання припусків шва, обрізання ниток та піднімання лапки
Автомати, напіваавтомати							
6	LK-1300 (Джукі)	304	2300	3,0		Середні	Виконання закріпок. Комп'ютерне управління

Машини напівавтоматичної дії для виготовлення петель, закріпок, пришивання фурнітури, повузлової обробки вибираються залежно від заданого виробу, який виготовляється в умовах підприємства.

Детальні технологічні характеристики швейного обладнання для виготовлення спеціального одягу представлені в таблиці 5.10.

Для пришивання тасьми-«блискавки» до робочого чоловічого комбінезона запропоновано використовувати спеціальну лапку Q020, яка прикріплюється до універсальної машини DLU-5490-6 (Джукі). Використані види швів та їх характеристики наведені у таблиці 5.11 [230].

Таблиця 5.11

Характеристика швів для виготовлення чоловічого робочого комбінезона

Найменування шва	Графічне зображення шва	Код шва	Область застосування
Зшивний		1.01.01	Зшивання деталей комбінезона
Зшивний з обметаними зрізами		1.01.02	Зшивання деталей комбінезона з обметуванням зрізів
Обшивний в кант		1.09.01	Обшивання коміра, клапанів накладних кишень, пластрону застібки
Настрочний з двома відкритими зрізами		2.02.03 2.01.01	Настрочування тримачів
Настрочний з закритим зрізом		5.31.06	Настрочування накладних кишень двома строчками
Накладний з закритим зрізом		2.05.01	Обробка накладних кишень
Оздоблюючий		5.01.01	Виконання оздоблювальних строчок
Упідгин з закритим зрізом		6.03.04	Обробка низу колінної накладки
Застрочування краю деталі		6.04.01	Застрочування низу колінної накладки
Зшивний з шиванням тасьми блискавки		1.01.01	Обробка тасьми-«блискавки»

5.6.2. Розробка раціональної технології обробки основних вузлів спеціального одягу

В умовах ТЗОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів) запропоновано різновиди колінних накладок з полімерним покриттям для костюма спеціального призначення, конструктивно-технологічне рішення яких і раціональні методи технологічної обробки наведені на рис. 5.29. Місця з'єднання деталей виробу з накладками запропоновано герметизувати використовуючи плівку з полімерним покриттям [232–235].

Як представлено на рис. 5.29 переріз А–А, накладки можуть об'ємними. Як правило, об'ємні накладки є більш ергономічними і ефективними при динамічних навантаженнях, тому що мають більший ступінь відповідності рухам працівника, здійснюють менший тиск на суглоби і не призводять до швидкої втомлюваності працівника.

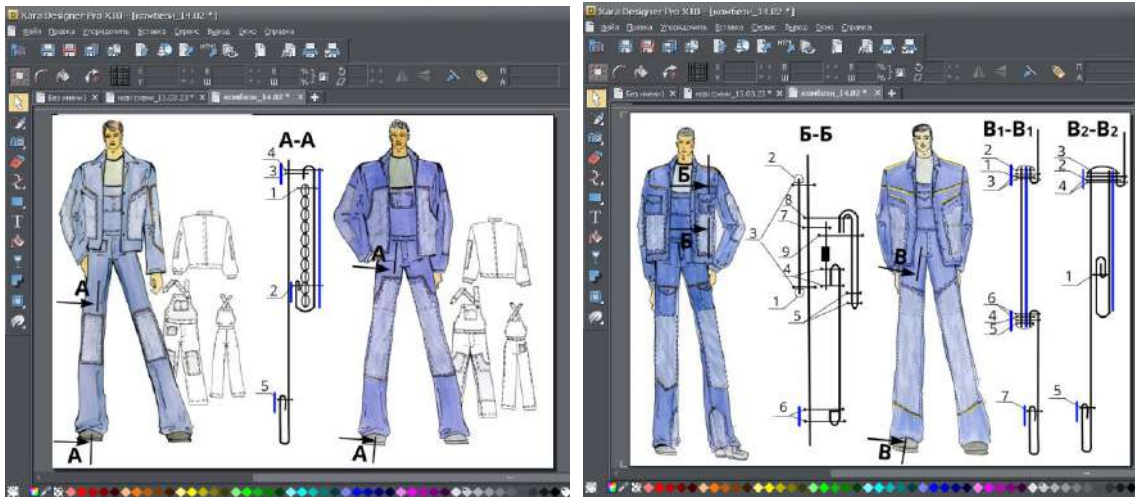


Рис. 5.29. Дизайн-розробка спецкостюмів (куртка та напівкомбізон) підвищеної зносостійкості в графічному редакторі Xara PRO X 19

Рациональні методи обробки горловини виробу, резинки в кулісі на спинці комбінезона, застібки і накладної кишені з клапаном наведені на рис. 5.30.

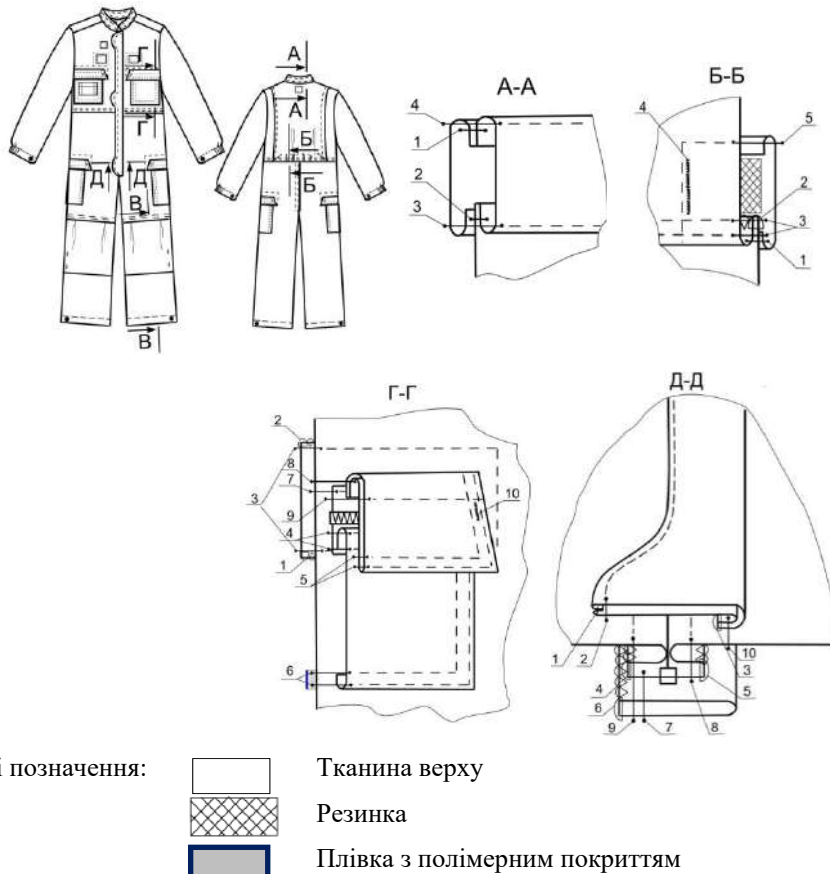


Рис. 5.30. Складальні кресленики основних вузлів комбінезона 2

Варіанти раціональних методів обробки функціонального вузла «колінна накладка і низ штанів» з кодуванням з'єднань наведені на рис. 5.31. Приклади 2–4 демонструють застосування полімерного покриття для накладок.

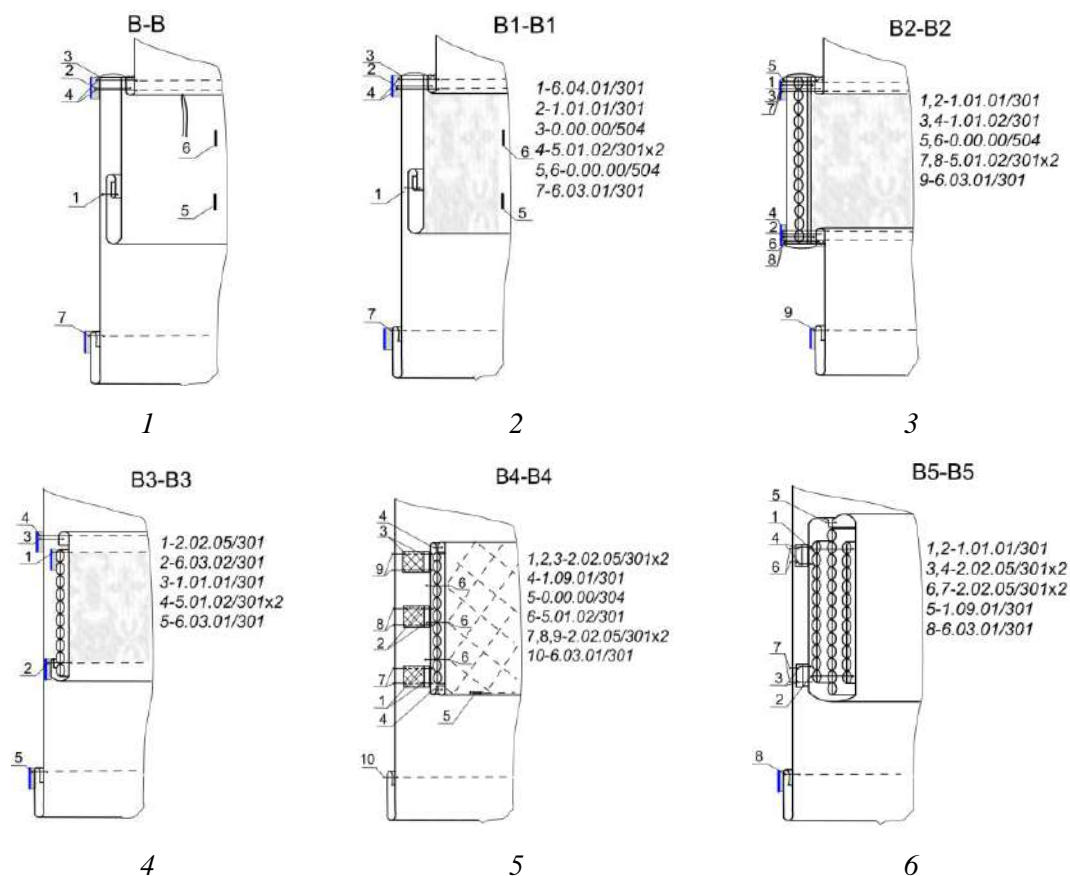





Рис. 5.31. Складальні кресленки варіантів обробки колінної накладки комбінезона 2 (шість варіантів)

Вибір матеріалів для захисного одягу відповідного призначення обумовлює способи з'єднання деталей накладок і виробу, до яких належать нитковий, зварний, клейовий, комбінований, а місця їх з'єднань рекомендовано герметизувати.

Детальна технологічна характеристика рекомендованого швейного обладнання для герметизації швів представлена в таблиці 5.12 [230].

При виготовленні робочого комбінезона застосовуються суперміцні сумішеві тканини, різні за своєю структурою, які оптимально поєднують в собі поліефірні і бавовняні волокна. На верхній шар полотен наносяться спеціальні обробки з полімерних композицій, що надають матеріалам специфічні властивості – водотривкість. При виробництві використовуються якісні тканини нового покоління різної щільності, що забезпечують збереження захисних властивостей на весь період служби виробу. Легкі за вагою (з меншою щільністю, до 250 г/м^2) мають більш високий індекс повітропроникності. Більш щільні матеріали (від 250 г/м^2 до 280 г/м^2) мають підвищені індекси зносостійкості, міцності і довговічності.

Характеристика обладнання для герметизації швів

Зображення / тип, марка обладнання, фірма-виробник	Максимальна температура, °С	Тиск стисненого повітря, бар	Ширина сопла, мм	Параметри ролика	Додаткові дані
 AI-001	800	4	22	Ширина ролика, мм: верхнього – 25,4; нижнього – 31	Габарити машини 1200 × 750 × 1800 мм. Вага нетто – 150 кг. Електроживлення – 3600 Вт. Додатковий ролик – 10–31 мм
 JACK JK -6100	700	3,5–5	22	Висота підйому верхнього ролика – 18–30 мм. Притискний ролик, мм: ширина – 25,4; діаметр – 65	Потужність нагрівної трубки – 4 кВт. Тиск верхнього ролика – 0,15 МПа. Загальна потужність – 5кВт, 220V, 50Hz
 Vetron 5374-3025	600	6	25	Ширина протяжного ролика – 26 мм. Діаметр ролика, мм: верхнього – 45; нижнього – 25/45	Стійка нижнього ролика пряма. Кількість проходу стрічки – 0–30 м/хв. Автоматичне обрізання стрічки. Підключення – 230 В, 50–60 Гц. Потужність – 700 Вт. Рівень шуму – 80 дБ (А)

На рис. 5.32 представлені фото етапів процесу виготовлення зразка чоловічого робочого комбінезона 1 в умовах ТзОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів). Запропонована модель комбінезона з глибокими функціональними кишнями та підсиленими наколінниками. Всі накладні деталі прострочені двома декоративними строчками.

Конструктивні особливості: комбінезон з центральною потайною застібкою на тасьму-«блискавку». Комір-стійка. Нагрудні накладні кишні з клапанами, бічні кишні з підсилювальними накладками для перенесення гострих деталей. По лінії талії на спинці еластична стрічка. Рукави на манжетах. Манжети застібаються на амінопластикові гудзики. Додаткові підсилювальні накладки розташовані в області колін.

Застосування: комбінезон робочий використовується для зручної та безпечної роботи механіків, слюсарів, працівників складських господарств, автослюсарів, техніків.

Таким чином, досліджено можливість отримання великої кількості різноманітних фактурно-колеристичних рішень чоловічих робочих комбінезонів за допомогою методів комбінаторики за композиційно гармонізованими ознаками форм, кольору, малюнка, фактури матеріалів за допомогою комп'ютерних технологій.

За результатами досліджень в умовах ТзОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів) виготовлено експериментальні зразки чоловічого робочого комбінезона зі знімними захисними елементами в ділянці колін для підвищення експлуатаційних характеристик одягу [225, 230], (рис. 5.33).



Рис. 5.32. Фото етапів процесу виготовлення зразка чоловічого робочого комбінезона 1 в умовах ТзОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів)



Рис. 5.33. Фото готового зразка чоловічого робочого комбінезона 2

Отже, наукова новизна дослідження полягає в аналізі та систематизації інноваційних технологій дизайн-проектуювання спеціального одягу з підвищеними захисними властивостями за рахунок використання композиційних полімерних матеріалів на всіх стадіях створення й просування виробів на fashion-ринок.

Практичне значення полягає у підвищенні інноваційного потенціалу складових дизайн-проектів сучасного спеціального одягу на прикладі удосконалення процесів проектування виробів спеціального призначення в умовах ТзОВ «УЛІНЕ» (м. Виноградів).

5.7. Передумови використання полімерних композицій у взуттєвій галузі

Проблема якості сьогодні стає актуальною абсолютно для всіх виробів та послуг, яка з другорядного фактору стає найважливішою умовою успішної діяльності підприємств та розвитку економіки в цілому. При цьому важливим фактором виступає управління якістю відповідно до сучасних вимог до якості продукції [236]. Пріоритетним на-

прямом розвитку легкої промисловості, зокрема взуттєвої галузі, та викликів сьогодення є розробка та розширення асортименту спеціального взуття, особливо для військових. Асортимент такого взуття постійно розширюється, змінюються конструктивні елементи та вузли, удосконалюється технологія виготовлення тощо [237]. Спеціальне взуття як один з елементів засобів індивідуального захисту має відповідати певним вимогам і показникам якості.

Згідно з ДСТУ ISO 9000-2001 «Системи управління якістю. Основні положення та словник», якість – це здатність продукції задовольняти потреби відповідно до її призначення. До основних вимог показників якості для спеціального взуття належать комфортність, гігієнічність, надійність, безпечність. Вимоги визначаються умовами експлуатації спеціального взуття та екстремальним впливом на взуттєві матеріали з боку навколишнього середовища: контрастні кліматичні зміни, вплив різноманітних хімічних речовин, термохімічна дія тощо. До особливих умов експлуатації спеціального взуття відноситься значна тривалість безперервного носіння порівняно з періодом відпочинку виробу [238].

Спеціальне взуття розробляється з урахуванням вимог, щоб відповідати стандартам та показникам якості та призначення. Зокрема, повинні враховуватись такі показники:

– **експлуатаційно-споживчі**: забезпечення необхідного рівня захисту від конкретних небезпек (хімічних, механічних, термічних); комфорту носіння протягом тривалого часу;

– **технологічності**: вибір матеріалів, які відповідають конкретним умовам експлуатації та задовольняють гігієнічні вимоги; розробка конструкції, яка враховує особливості взуття та його призначення;

– **безпеки та інноваційність**: дотримання відповідних стандартів та норм безпеки; застосування інновацій у матеріалах та виробничих процесах.

У комплексі властивостей, що визначають в загальному якість спеціального взуття, одним з найважливіших показників є формостійкість виробу [239], яка нерозривно пов'язана з конструкцією верху, способом формування та властивостями матеріалів, котрі застосовуються для деталей верху та низу. Для деталей низу взуття використовуються штучні та синтетичні матеріали, які зберігають повною мірою ці властивості під час експлуатації. Тому основні зміни розмірів та форми взуття, а отже, і формостійкості виробу в цілому, залежать від матеріалів верху та конструктивних елементів. Ці аспекти враховуються для того, щоб взуття було не лише ефективним у відповідному середовищі, але й задовольняло очікування споживачів. Технології виготовлення та використання сучасних матеріалів грають ключову роль у досягненні цих властивостей.

5.8. Технологічні особливості процесу виготовлення спеціального взуття із застосуванням полімерних композицій

Виготовлення спеціального взуття включає ряд технологічних процесів, котрі спрямовані на створення високоякісного та функціонального взуття для забезпечення відповідних потреб споживачів [240]. Цей процес може змінюватися залежно від типу спеціалізованого взуття, такого як: військов, спортивне, антистатичне тощо. Технологічний процес виготовлення спеціального взуття складається з таких етапів [241]:

1) проектування та розробка: розробка дизайну взуття, враховуючи специфікації та функціональні вимоги; проектування деталей верху та низу з урахуванням відповідності анатомо-біомеханічним параметрам стоп; деталювання та градирування;

2) вибір матеріалів: вибір матеріалів з урахуванням умов експлуатації; використання спеціальних тканин, шкіри, пластмас та інших матеріалів;

3) технологічний процес: розкрій, розруб та обробка матеріалів; складання деталей заготовки; виготовлення деталей низу з використанням спеціальних матеріалів (гума або

полімери); з'єднання заготовки верху та деталей низу; обробка взуття (фарбування, полірування, нанесення логотипів тощо);

4) контроль якості: перевірка взуття на відповідність стандартам та вимогам; контроль якості для виявлення дефектів.

Цей процес може бути досить складним, особливо коли йдеться про виготовлення взуття для спеціальних потреб, таких як військове взуття, яке повинно відповідати високим стандартам з комфорту, захисту та довговічності. У стандартах [242, 243] перераховані матеріали, які використовуються для виготовлення деталей верху та низу спеціального взуття. Ці вимоги включають фізико-механічні, технологічні і гігієнічні показники. Чинні нормативні документи також визначають матеріали для зовнішніх, внутрішніх і проміжних деталей верху та низу, якщо їх якість та захисні властивості забезпечують необхідні показники. Основними показниками якості матеріалів для спеціального взуття є:

1) фізико-механічні властивості: міцність матеріалу; еластичність і гнучкість; зносостійкість та довговічність; стійкість до впливу агресивних середовищ;

2) технологічні властивості: спосіб формування та обробки матеріалу; вибір методу кріплення; можливість фарбування чи нанесення інших покриттів;

3) гігієнічні властивості: повітро-водонепроникність, здатність до вологовіддачі; антимікробні властивості.

Одним з аспектів технічного прогресу у взуттєвій промисловості є широке застосування штучних та синтетичних матеріалів. Це пов'язано з кількома факторами:

– штучні матеріали мають підвищену стійкість до впливу навколишнього середовища, а також можуть залишитися в стабільному стані довше, ніж натуральна шкіра;

– штучні матеріали дозволяють виробникам створювати різноманітні дизайни та текстури, яких проблематично досягти з використанням натуральної шкіри;

– заміна натуральної шкіри може вирішувати питання екології та збереження ресурсів. Адже шкіряна промисловість часто потребує великої кількості ресурсів та негативно впливає на довкілля;

– штучні та синтетичні матеріали зазвичай легші та мають меншу вагу по відношенню до натуральної шкіри, що робить взуття більш комфортним для носіння.

Як слідує з [244, 245], штучними шкірами називають матеріали, які виготовляють шляхом просочування та покриття тканин або нетканих текстильних матеріалів плівкоутворюючими речовинами. За структурою розрізняють дво- та тришарові склеєні матеріали. Для верхнього (лицьового) шару використовують плівкоутворююче покриття, другий шар – один з якісних текстильних матеріалів (тканину, трикотаж, неткане полотно), для проміжного – армуючий матеріал (текстильний поліуретан тощо).

Стандартність фізико-механічних властивостей, можливість створення матеріалів з комплексом властивостей, менша вартість сприяють удосконаленню технологічних процесів виготовлення взуття, підвищенню продуктивності праці та зниженню його собівартості. Властивості штучних шкір на основі тканин і нетканих матеріалів залежать від властивостей основи, природи проклеюючих речовин, складу просочуючих і покривних матеріалів, їх кількості, способів просочування і нанесення покриття, характеру оздоблювальної обробки.

Для нанесення полімерних композицій за технологією, яка детально описана у п. 4.6, тканина-основа штучної шкіри має відповідати наступним вимогам: пружно-пластичні властивості – тканина-основа повинні бути достатньо гнучкими та пружними, щоб забезпечити комфорт під час експлуатації взуття; формостійкість матеріалу; щільність; стійкість кольору тканини-основи; запобігання проникненню клею; гладка лицьова поверхня; когезійна міцність; стійкість до стирання; межа міцності при розтягуванні; гігієнічні показники. Дотримання цих вимог забезпечить високу якість нанесення полімерних композицій на тканину-основу і підвищить функціональність спеціального взуття в цілому.

Висновки

Зміни в економічних, соціальних та екологічних умовах вимагають адаптації виробничих процесів. Запровадження новітніх наукових і технічних розробок у виробництво дозволить збільшити ефективність та забезпечити інноваційний розвиток економіки, а також, що є досить актуально у сучасних умовах сьогодення, зменшити негативний вплив на довкілля.

Легка промисловість є одним з важливих сегментів промисловості та економіки в цілому, водночас людство стикається з серйозними екологічними проблемами, зумовленими забрудненням навколишнього середовища через відходи, що виникають під час виробництва та збуту виробів. Управління відходами є нагальною та першочерговою проблемою для забезпечення сталого екологічного виробництва. Переробка відходів легкої промисловості дозволить зменшити їх вплив на навколишнє середовище та підвищити стійкість промисловості в цілому.

Крім зменшення навантаження на екологію, запропоновані у роботі технології виготовлення полімерної суміші, на основі рециклатів полімерних відходів, та технології нанесення цієї суміші на елементи одягу та взуття, які у процесі їх експлуатації піддаються значним навантаженням та температурним і хімічним впливам, дозволяють покращити механічну і хімічну стійкість, зносостійкість одягу та взуття для працівників оборонної і медичної галузей, працівників МНС та людей, що ведуть активний спосіб життя.

У першому розділі монографії наведені результати дослідження стану проблеми виробничих відходів легкої промисловості; проаналізовано хімічний склад відходів швейної та взуттєвої промисловості, що дозволило визначити можливість розподілу їх на складові та технологічні характеристики вторинного використання; розглянуто етапи виробництва виробів легкої промисловості для визначення обсягів відходів, які генеруються. В результаті цього встановлено, що полімерні та полімермісткі матеріали мають високий потенціал для переробки та вторинного використання.

Огляд наукових праць, присвячених технологічному обладнанню для механічної та хімічної переробки полімерних відходів, обладнанню для виробництва наповнених полімерних виробів легкої промисловості та сучасним структурним моделям полімерних матеріалів, показав, що обладнання для механічної переробки полімерних відходів легкої промисловості сьогодні недостатньо. В основному на ринку пропонують обладнання виключно для переробки поліетилену або поліетилентерефталату, але в більшості випадків і це обладнання запозичене з інших галузей промисловості. Ефективність роботи обладнання із закріпленими робочими органами характеризується потужністю приводу, формою та розмірами робочих органів, тому при проєктуванні обладнання із закріпленими робочими органами слід враховувати фізико-механічні властивості полімерного матеріалу, геометрію робочих органів та динаміку їх взаємодії з матеріалом. Обладнання для отримання полімерних виробів легкої промисловості литтям під тиском дозволяє використовувати перероблені полімерні відходи без суттєвих втрат експлуатаційних властивостей цих виробів.

Хімічна переробка виробничих відходів легкої промисловості є важливим елементом стійкої екологічної практики та забезпечує ефективне використання ресурсів. Розглянуто типові технології хімічної переробки полімермістких відходів разом з оцінкою рівня їх технологічної готовності: типові параметри процесу, вимоги до енергії та продукти. Встановлено, що хімічна переробка є додатковим етапом переробки відходів та дозволяє переробку більшої кількості пластикових відходів, які наразі непридатні для механічної переробки.

Доведено, що властивості полімерних матеріалів можуть змінюватися залежно від конкретного складу полімеру та його обробки. Також встановлено, що у виробничому середовищі, важливо розглядати їхню взаємодію з іншими компонентами та умовами експлуатації.

Отримано аналітичні залежності для фізико-механічних властивостей полімерного матеріалу при різних температурах і режимах навантаження – напружень розтягу, стиску і зсуву, у результаті чого запропоновано механічну та хімічну технології переробки полімерних та полімермістких відходів.

На основі отриманих моделей запропоновано методи проектування обладнання для переробки полімерних відходів, який передбачає визначення раціональних конструктивних параметрів та ефективних технологічних режимів роботи перероблювального обладнання, при яких забезпечуються такі значення граничних деформацій та відповідних напружень, при яких полімерні відходи перетворюються на частинки, подальша переробка яких хімічними методами модифікації рециклів, дозволяє отримати нові композиційні полімерні матеріали з підвищеними фізико-механічними властивостями, витрачаючи на процес утворення суміші значно менше енергії.

Розроблено технологію нанесення полімерних покриттів на вироби легкої промисловості. Мехатронна система управління та контролю для нанесення полімерного покриття має численні переваги. Зокрема, підвищує продуктивність і ефективність завдяки автоматизації процесу нанесення покриття, забезпечує рівномірну товщину покриття, покращуючи якість і консистенцію продукту, а також забезпечує можливості моніторингу та контролю в режимі реального часу, забезпечуючи швидке налаштування та мінімізуючи дефекти. Запропоноване обладнання, яке дозволяє швидко та зручно наносити полімерне покриття і поліпшити якість та властивості виробів.

Проведено аналіз та систематизацію інноваційних технологій дизайн-проекування спеціального одягу з підвищеними захисними властивостями за рахунок використання композиційних полімерних матеріалів на всіх стадіях створення і просування виробів на fashion-ринок.

У результаті дослідження узагальнено та структуровано види накладок для спеціального одягу за призначенням, асортиментом, зоною розміщення, способом з'єднання, матеріалами, формою, розміром, конфігурацією. Авторами запропоновано класифікатор накладок та кодову структуру накладок у спеціальному одязі.

Розроблено та запропоновано конструктивно-ергономічне рішення робочого спецодягу спеціального призначення. Конструкція спецодягу виконана в «Julivi» CAD, що забезпечує високу точність розробки конструкції і простоту виготовлення в умовах масового виробництва. Для візуалізації та оцінки точності та якості виконаних конструкцій розроблено тривимірну модель спецодягу.

Таким чином, наукове дослідження повною мірою охоплює весь процес комплексної переробки полімермістких відходів у виробі легкої промисловості, відкриває промислові можливості переробки відходів та сприяє розвитку екологічної стійкості виробництва підприємств легкої промисловості.

Перелік джерел посилання

1. Classification of Textile Fibres. – URL: <https://textileengineering.net/classification-of-textile-fibres/> (date of appeal: 01.05.2023).
2. Wojnowska-Baryła, Irena & Bernat, Katarzyna & Zaborowska, Magdalena. (2022). Strategies of Recovery and Organic Recycling Used in Textile Waste Management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19. 5859. 10.3390/ijerph19105859.
3. Порубенська Л. М. Визначення згинальних напружень в полімерних деталях низу взуття / Л. М. Порубенська, Т. І. Кулік, Б. М. Злотенко // *Технології та дизайн*. – 2016. – № 3. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2016_3_2.
4. Кравчук О. Формування ринку сировинних ресурсів для виробництва біопалив / О. Кравчук. – URL: http://archive.nbuv.gov.ua/Portal/soc_gum/znptdau/2012_4/20-25.pdf
5. Переробка відходів гуми та термопластичних матеріалів : монографія / [О. П. Бурмістенков, В. П. Місяць, І. В. Панасюк, Б. М. Злотенко]. – Київ : Кафедра, 2012. – 240 с. – ISBN 978-966-2071-20-2.
6. Carotenuto G. Polymer-based nanocomposites: New potentialities for polymers / G. Carotenuto // *Polym. News*. – 2000. – Vol. 25, № 6. – P. 190–199.
7. Berlinda Kwee Hong Lim, Eng San Thian, Biodegradation of polymers in managing plastic waste – A review, *Science of The Total Environment*. – Vol. 813, 2022, 151880, ISSN 0048-9697. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151880>.
8. Rahul Tiwari, Numanuddin Azad, Deblina Dutta, Bholu Ram Yadav, Sunil Kumar, A critical review and future perspective of plastic waste recycling, *Science of The Total Environment*, Volume 881, 2023, 163433. ISSN 0048-9697. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163433>.
9. Krystyna Wiczorek-Ciurowa K. F., Zenon Woźny M. K. Present and prospective leather industry waste disposal. *Polish Journal of Chemical Technology*. 2011. Vol. 13 (2011), Issue 3 (January 2011). P. 53–55.
10. Dixit S., Yadav A., Dwivedi P. D., Das M. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review *Journal of Cleaner Production*, 87 (2015), pp. 39–49.
11. Легка промисловість України: реалії та перспективи розвитку. Експертно-аналітична доповідь / Кол. авторів під наук. ред. І. М. Грищенко. – Київ : КНУТД, 2015. – 82 с.
12. Hertwing K. Production and Application Kollagen of Leather / K. Hertwing // *Bonded Leather*. – 2008. – № 9. – P. 181–186.
13. Erickson Paul R. Wet blue staving the green solution / Paul R. Erickson // *World Leather*. – 2007. – № 7. – P. 57–69.
14. Light industry polymeric waste recycling in the conditions of urbanistic environment development / M. E. Skyba, O. M. Synyuk, B. M. Zlotenko, T. I. Kulik, J. Musiaf, R. Polasik. – Bydgoszcz : Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego Bydgoszcz, 2020. – 96 p.
15. Технологія виробництва та переробки полімерів медико-біологічного призначення : навч. посіб. / В. Л. Авраменко, Л. П. Підгорна, Г. М. Черкашина, О. В. Близнюк. – Харків : Видавництво та друкарня «Технологічний Центр», 2018. – 356 с.
16. Textile-apparel manufacturing and material waste management in the circular economy: A conceptual model to achieve sustainable development goal (SDG) 12 for Bangladesh / Maeen Md. Khairul Akter a, Upama Nasrin Haq b, Md. Mazedul Islam b c, Mohammad Abbas Uddin // *Cleaner Environmental Systems*. – 2022. – Vol. 4. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666789422000010> (date of appeal: 01.05.2023).

17. Nayak, R. Recent sustainable trends in Vietnam's fashion supply chain. / R. Nayak, M. Akbari, S. Maleki // *J. Clean. Prod.* – 2019. – Vol. 225. – P. 291–303. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.239>
18. Khan A. M. Chitosan incorporation for antibacterial property improvement of jute-cotton blended denim fabric. / A. M. Khan, M. M. Islam, M. M. R. Khan // *The Journal of The Textile Institute.* – 2019. – Vol. 111. – P. 1–9.
19. Textile waste management and environmental concerns / Md. Nahid Pervez, Md. Ibrahim H. Mondal, Yingjie Cai, Yaping Zhao // *The Textile Institute Book Series.* – 2021. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128214831000024> (date of appeal: 01.05.2023).
20. Textile wastewater: characterization, environmental impact and treatment / Karishma Maheshwari, Madhu Agarwal, Akhilendra Bhushan Gupta та ін.] // *Scholars' Press.* – 2020. – Access mode: URL: https://www.researchgate.net/publication/343713889_Textile_wastewater_characterization_environmental_impact_and_treatment (date of appeal: 04.05.2023).
21. Textiles and the environment // European Union. – 2022. – URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729405/EPRS_BRI\(2022\)729405_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/729405/EPRS_BRI(2022)729405_EN.pdf) (date of appeal: 02.05.2023).
22. A Comprehensive Review on the Sustainable Treatment of Textile Wastewater: Zero Liquid Discharge and Resource Recovery Perspectives / Nusrat Jahan, Mohammed Tahmid, Afrina Zaman Shoronika та ін.] // *Licensee MDPI.* – 2022. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/15398>. (date of appeal: 02.05.2023).
23. Asim Kumar Roy Chowdhury. Environmental Impacts of the Textile Industry and Its Assessment Through Life Cycle Assessment / Asim Kumar Roy Chowdhury // Springer. – 2014. – URL: https://www.researchgate.net/publication/300446312_Environmental_Impacts_of_the_Textile_Industry_and_Its_Assessment_Through_Life_Cycle_Assessment (date of appeal: 14.05.2023).
24. Тканини і технології. – 2016. – URL: <https://patriotshop.com.ua/ua/blog/2016/04/20/tkanini-i-tehnologiyi/>.
25. Тарасенко І. О. Сталій розвиток підприємств легкої промисловості: теорія, методологія, практика : монографія / І. О. Тарасенко. – Київ : КНУТД, 2010. – 390 с.
26. Girfanova, L & Abdyrasulova, R. (2021). Improvement of Textile Waste Sorting Processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 666. 022027. 10.1088/1755-1315/666/2/022027.
27. Коновал В. П. Універсальний довідник взуттєвика : навч. посіб. / В. П. Коновал, С. С. Гаркавенко, Л. Т. Свістунова. – Київ : Лібра, 2005. – 720 с.
28. Омельченко Н. М. Основи проектування та виробництва виробів із шкіри. Ч. 1 / Н. М. Омельченко, В. П. Кернеш, В. П. Коновал. – Київ : КНУТД, 2009. – 194 с.
29. Razumeev, K.E. & Anis'kova, V. & Fedorova, N. & Bratchenya, L.. (2022). Producing Nonwoven Materials for the Shoe Industry. *Fibre Chemistry.* 54. 10.1007/s10692-022-10373-8.
30. Kahsay, Tesfay & Haile, GUESH NEGASH (Dr.) & Hagos, Yohannes & Birhanu, Hadush. (2015). Pre-slaughter, slaughter and post-slaughter defects of skins and hides at the Sheba Tannery and Leather Industry, Tigray region, northern Ethiopia. *The Onderstepoort journal of veterinary research.* 82. E1-7. 10.4102/ojvr.v82i1.93
31. Fidaleo, M., Moresi, M., Electrodialysis applications in the food industry, *Advances in Food and Nutrition Research,* 2006, 51, 265–360. doi:10.1016/S1043-4526(06)51005-8
32. Касьян Е. С. Основи технології шкіри та хутра : навч. посіб. / Е. С. Касьян. – Київ : КДУТД, 2001. – 224 с.
33. Матеріали та виробництво текстильних і шкіряних побутових призначення. Основні гігієнічні вимоги: ДСТУ 4239-2003 – [Чин. від 01-10-2004]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с.
34. Головка М. П. Товарознавство одягово-взуттєвих товарів : навч. посіб. / М. П. Головка [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Харків, 2015. – 459 с.
35. Roh EK. Mechanical properties and preferences of natural and artificial leathers, and their classification with a focus on leather for bags. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics.* 2020;15. doi:10.1177/1558925020968825
36. Врона І. Т. Вдосконалення процесу проектування формованих підошов : дис. ...канд. техн. наук : 05.19.06 / Врона Інна Тадеушівна. – Хмельницький, 2005. – 127 с.
37. Бабич А. І. Технологія виготовлення виробів з різних матеріалів : навч. посіб. / А. І. Бабич. – Київ : КНУТД, 2021. – 248 с.

38. Гурін В. А. Основи промислових технологій і матеріалознавства : навч. посіб. / В. А. Гурін, В. П. Востріков, Л. В. Кузьмич. – Рівне : НУВГП, 2019. – 310 с.
39. Домбровський А. Б. Основи технології виробів. Технологічні процеси : навч. посіб. / А. Б. Домбровський, Г. Є. Лобанова, О. А. Михайловська, І. Т. Солтик. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 122 с.
40. Єжова О. В. Технологія оброблення швейних виробів / О. В. Єжова, О. В. Абрамова. – Київ : Вид-во Центр навч. л-ри, 2020. – 256 с.
41. Коновал В. П. Технологія взуттєвого виробництва : підручник / В. П. Коновал, Л. Т. Свістунова, В. В. Олійникова. – Київ : Либідь, 2003. – 366 с.
42. Олійникова В. В. Основи технології виробів зі шкіри / В. В. Олійникова. – Київ : КНУТД, 2006. – 121 с.
43. Андрєєва О. А. Особливості шкіряно-хутрової сировини : монографія / О. А. Андрєєва, І. М. Грищенко, І. Т. Зварич. – Київ : Світ успіху, 2018. – 451 с.
44. Ebabu, Wendwosen & Hossain, Md & El-Naggar, Mehrez & Kabish, Abera & Hailemariam, Shalemu & Ahmed, Fitsum Etefa. (2022). Exploration of Functional Polymers for Cleaner Leather Industry. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 32. 10.1007/s10904-021-02129-4.
45. Tian, Saiqi. (2020). Recent Advances in Functional Polyurethane and Its Application in Leather Manufacture: A Review. *Polymers*. 12. 10.3390/polym12091996.
46. Розвиток наукових основ технологій рециклінгу полімерних відходів у матеріали і деталі взуття та інші вироби легкої промисловості : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.18 «Технологія взуття, шкіряних виробів і хутра» : захищена 19.04.2012 / І. А. Мандзюк ; наук. консультант М. Є. Скиба. – Хмельницький : КНУТД; ХНУ, 2012.
47. Олійникова В. В. Довідник-каталог взуттєвика / В. В. Олійникова, Н. Я. Біленко, Л. Т. Свістунова. – Київ : КНУТД, 2000. – 369 с.
48. Орловський Б. В. Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво) : навч. посіб. / Б. В. Орловський, Н. С. Абрінова. – Київ : КНУТД, 2013. – 285 с.
49. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. / І. О. Мікульонюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 324 с.
50. Кузьменко М. Я. Технологія виробництва та перероблення високомолекулярних сполук : підручник / М. Я. Кузьменко, М. В. Бурмістр, Ю. М. Кобельчук. Кн. 1. – Дніпропетровськ : ДВНЗ «Укр. держ. хім.-технол. унт», 2015. – 545 с.
51. Al-Salem S. M., Lettieri P., Baeyens J., Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review, *Waste Management*, Vol. 29, Issue 10, 2009, P. 2625–2643. ISSN 0956-053X. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X/09002190>)
52. Achilias D. S., Roupakias C., Megalokonomos P., Lappas A. A., Antonakou E. V. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, Volume 149, Issue 3, 2007, P. 536–542, ISSN 0304-3894, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.076>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389407009478>)
53. Скиба М. Є. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій переробки відходів натуральних шкір у матеріали та вироби взуттєвого виробництва : дис... д-ра техн. наук : 05.19.06 «Технологія взуттєвих та шкіряних виробів» / М. Є. Скиба. – Київ : КНУТД, 2004. – 417 с.
54. Михайловський Ю. Б. Розробка голкофрезових подрібнювачів для переробки текстильних відходів легкої промисловості : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.10 «Машини легкої промисловості» / Ю. Б. Михайловський. – Київ : Держ. академія легкої промисловості, 1999. – 114 с.
55. Мікульонюк І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія / І. О. Мікульонюк. – Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2009. – 265 с.
56. Місяць В. П. Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.10 «Машини легкої промисловості» / В. П. Місяць. – Київ : КНУТД, 2008. – 403 с.
57. Мікульонюк І. О. Процеси та обладнання перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / І. О. Мікульонюк. – Київ : НГУУ «КПІ», 2009. – 388 с.

58. Волчко А. І., Юхно М. І., Пермякова Ю. В. Пристрій для подрібнення матеріалів. Патент України на корисну модель, № 62349, 25.08.2011 р.
59. Малишевська О. С., Роп'як Л. Я. Пристрій для подрібнення пластикових пляшок на фрагменти заданих розмірів. Патент України на корисну модель, № 121910, 10.08.2020 р.
60. Хозін В. В. Пристрій для подрібнення матеріалу. Патент України на корисну модель, № 86361, 25.12.2013 р.
61. Волчко А. І., Юхно М. І., Ковальов О. І., Семко П. П., Волчко А. А., Токарчук С. В. Пристрій для подрібнення полімерних матеріалів. Патент України на корисну модель, № 109364, 10.08.2015 р.
62. Іванова Л. І., Горчаков О. І., Якимчук М. В., Журибеда О. М. Ножова дробарка для подрібнення полімерних виробів. Патент України на корисну модель, № 94592, 25.11.2014 р.
63. Мікульонок І. О., Рябцев Г. Л., Сезонов М. В. Пристрій для подрібнення. Патент України на корисну модель, № 1076, 15.10.2001 р.
64. Філіпченко Е. О., Скиба М. Є., Михайловський Ю. Б., Головка Г. С. Роторний ножовий подрібнювач полімерних пляшок. Патент України на корисну модель, № 16320, 15.08.2006 р.
65. Пат. 99499 U Україна, МПК В02С 4/02. Валковий подрібнювач / Мікульонок І. О. ; заявник і патентовласник Нац. тех-ніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – № u201413251 ; заявл. 10.12.2014 ; опубл. 10.06.2015.
66. Жевель П. П., Михайловський Ю. Б., Золотенко Е. О., Заєць В. В. Дисковий подрібнювач. Патент України на корисну модель, № 84691, 25.10.2013 р.
67. Ковальчук А. В., Михайловський Ю. Б., Заєць В. В., Скиба М. Є. Дисковий подрібнювач. Патент України на корисну модель, № 84689, 25.10.2013 р.
68. Моделювання технологічних процесів і обладнання переробних підприємств «АВК» : монографія / В. Ю. Сухенко, Ю. Г. Сухенко, В. В. Сарана та ін. / за ред. Сухенко В.Ю. – Київ : ЦП «КОПРИНТ», 2017. – 520 с.
69. Мікульонок І. О. Інноваційне обладнання для приготування та перероблення полімерних матеріалів і гумових сумішей : монографія / І. О. Мікульонок, О. М. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна. – Київ: Національний університет харчових технологій, 2022. – 139 с. : іл. – Бібліогр.: С. 126–135. – URL: (https://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/38700/1/2022_%20Polymer_Processing_.pdf).
70. Мікульонок І. О. Моделювання дискових екструдерів для перероблення полімерних матеріалів : монографія / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 103 с.
71. Золотенко Е. О., Михайловський Ю. Б., Заєць В. В., Михайловський А. Ю. Голкофрезовий подрібнювач текстильних відходів. Патент України на корисну модель, № 107663, 24.06.2016 р.
72. Деклараційний патент України на винахід № 45636. Пристрій для переробки зношених автомобільних покришок / О. П. Курманський, Ю. Б. Михайловський, 2002.
73. Деклараційний патент України № 71531. Валковий подрібнювач автомобільних покришок / М. Є. Скиба, Ю. Б. Михайловський, Г. С. Головка, Е. О. Філіпченко, В. П. Місяць, 2004.
74. Деклараційний патент України № 70163. Пристрій для подрібнення відходів полімерів / В. П. Місяць, Ю. Б. Михайловський, 2004.
75. Патент України на корисну модель № 85997. Валкова дробарка / Д. Г. Войтюк, В. О. Дубровін, О. О. Котречко, В. В. Іщенко, 10.12.2013 р.
76. Патент України на корисну модель № 116204. Пристрій для подрібнення твердих матеріалів / Л. І. Іванова, М. В. Якимчук, І. Л. Черпак, 10.05.2017 р.
77. Патент України на корисну модель № 106393. Валкова зубчаста дробарка для шматкових матеріалів / В. І. Риндяєв, 25.04.2016 р.
78. Патент України № 13389. Валкова дробарка з валково-зубчастим механізмом ламання / М. Ф. Круць, Б. Й. Заяць, П. С. Ліщинський, 2006.
79. Пат. № 90402 U Україна, МПК В02С 2/00 (2014.01) Конусна дробарка / І. О. Мікульонок, В. М. Витвицький, Н. С. Малащук. – Бюл. № 10.
80. Скиба М. Є. Моделювання процесу подрібнення та послаблення структури композиційного матеріалу у валковому механізмі з профілем трикутника Рьоло / М. Є. Скиба, Ю. Б. Михайловський, Г. С. Головка // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004.

81. Liu J., Luo L., Hu Y., Wang F., Zheng X., Tang K. Kinetics and mechanism of thermal degradation of vegetable-tanned leather fiber, *J Leather Sci Eng* 1, 9. 2019.
82. Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives / Official Journal of the European Union/-. 2008 – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN> (date of appeal: 23.05.2023).
83. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications / N. Singh // *Composites*. – 2017. – Part B, Is. 115. – P. 409–422.
84. Інноваційні хімічні технології переробки вторинних матеріалів. Ч. 1 : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / О. І. Янушевська, Г. В. Кримець, М. І. Літинська ; КІП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,3 Мбайт). – Київ : КІП ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 99 с.
85. Chemical recycling explained: an overview. – URL: <https://pryme-cleantech.com/chemical-recycling> (date of appeal: 02.05.2023).
86. End-of-waste life: Inventory of alternative end-of-use recirculation routes of bio-based plastics in the European Union context / D. Briassoulis, A. Pikasi, M. Hiskakis // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2019. – Vol. 49 (20). – P. 1835–1892.
87. Tertiary recycling of plastics waste: an analysis of feedstock, chemical and biological degradation methods / A. Lee, M. S.Liew // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. – 2020. – Vol. 2. – P. 1–12.
88. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment / M. Solis, S. Silveira // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 105. – P. 128–138.
89. Sethi, B. Methods of recycling. In *Recycling of polymers: methods, characterization and applications*. Edited by Raju Francis. John Wiley & Sons, 2016.
90. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review / M. G. Davidson, R. A. Furlong, M. C. McManus // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 12. P. 61–63.
91. Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste / I. Vollmer, M. J. Jenks, M. C. Roelands, R. J. White, T. van Harmelen, P. de Wild, G. P. van Der Laan, F. Meirer, J. T. Keurentjes, B. M. Weckhuysen, // *Angewandte Chemie International Edition*, 2020. – Vol. 59 (36). – P. 15402–15423.
92. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste / K. Ragaert, L. Delva, K. Van Geem // *Waste Management*. – 2017. – Vol. 69. – P. 24–58.
93. From polymer waste to potential main industrial products: Actual state of recycling and recovering / J. Datta, P. Koczyńska // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2016. – Vol. 46 (10). – P. 905–946.
94. Crippa, M., De Wilde, B., Koopmans, R., Leyssens, J., Muncke, J., Ritschkoff A-C., Van Doorselaer, K., Velis, C. & Wagner, M. A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions. (M. De Smet & M. Linder, Eds.). European Commission, Brussels, Belgium. – 2019.
95. Hann S. Chemical Recycling: State of Play / S. Hann, T. Connock. – URL: <https://chemtrust.org/wp-content/uploads/Chemical-Recycling-Eunomia.pdf> (date of appeal: 16.04.2023).
96. Patel D. All Talk and No Recycling: An Investigation of the U.S. “Chemical Recycling” Industry / D. Patel, D. Moon, N. Tangri, M. Wilson // *Global Alliance for Incinerator Alternatives*. URL: <https://www.no-burn.org/chemical-recycling-us/>. (date of appeal: 16.03.2023).
97. Cefic. Introducing chemical recycling: Plastic waste becoming a resource. URL: <https://cefic.org/app/uploads/2020/03/Cefic-Position-Paper-on-Chemical-Recycling.pdf>. (date of appeal: 18.03.2023).
98. Manžuch Z., Akelytė R., Camboni M., Carlander D. Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in the Circular Economy Final Report prepared for The European Chemicals Agency August. – 2021.
99. Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review. / G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 73. – P. 346–368.
100. A review on pyrolysis of plastic wastes / S. D. A. Sharuddin, F. Abnisa, W. M. Daud, M. K. Aroua // *Energy Conversion and Management*, 2016. – Vol. 115. – P. 308–326.
101. Fluid catalytic cracking: Recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis / E. Vogt, B. Weckhuysen // *Chemical Society Reviews*. – 2015. – Vol. 44 (20). – P. 7342–7370.

102. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review / U. Arena // *Waste Management*. – 2012. – Vol. 32 (4). – P. 625–639.
103. Willis K. Plasma gasification: Lessons learned at Ecovalley WTE facility / K. Willis, S. Osada, K. L. Willerton // 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference American Society of Mechanical Engineers. – 2010. – P. 133–140.
104. Chemical Recycling. URL: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/chemical-recycling-101.aspx> (date of appeal: 16.04.2023).
105. Solis M. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment / M. Solis, S. Silveira // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 105. – P. 128–138.
106. Hess K. Kenntnis der Feinstruktur der poll fasern / K. Hess, H. Kissing // *Naturwiss.* – 1993. – Bd. 31. – S. 171–178.
107. Prevorsek D. C. Nylon 6 fibers: Changes in structure between moderate and high draw ratios / D. C. Prevorsek, P. V. Harget, A. C. Reimschuessel, R. K. Sharta // *J. Macromol. Sci.* – 1988. – Vol. B8. – № 12. – P. 127–156.
108. Kulik T. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts / T. Kulik, O. Synyuk, B. Zlotenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – № 5/1 (89). – P. 70–77.
109. Синюк О. М. Числове моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми складної конфігурації / О. М. Синюк, М. Є. Скиба, Б. М. Злотенко // *Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки*, 2004. – № 5. – С. 49–52.
110. Synyuk O. Improvement of Footwear Moulding Machines for the Production of the Advanced Reliability Items / O. Synyuk, M. Skyba // *The eleventh world congress in Mechanism and Machine Science (1–4 April 2004)*. – Tianjin (China) : Editor Tian Huang School of Mechanical Engineering Tianjin University, 2004. – V. 5. – P. 2212–2216.
111. Skyba M. Improvement of press-forms for polymeric items moulding / M. Skyba, O. Synyuk // *Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission, Katowice (Poland)*, 2004. – V. 4. – № 12. – P. 235–248.
112. Кострицкий В. В. Структурно-механическая модель аморфно-кристаллических полимеров / В. В. Кострицкий // *Механика композитных материалов*. – Рига : Зинатне, 1990. – № 4. – С. 585–593.
113. Synyuk O. Formation of the model of the polymer material structure during orientational drawig / O. Synyuk, M. Skyba, T. Romanets // *Actual problems of modern science [collective monograph]*, UTP University of Sciences and Technology in Bydgoszcz, Poland, 2017. – P. 395–413.
114. Скиба М. Є. Структурно-механічна модель полімерних виробів, отриманих литтям під тиском / М. Є. Скиба, О. М. Синюк // *Вісник Хмельницького національного університету*, 2014. – № 6 (219). – С. 27–33.
115. Stoclet G. WAXS study of the structural reorganization of semi-crystalline polylactide under tensile drawing / G. Stoclet, R. Seguela, C. Vanmansart, C. Rochas, J.-M. Lefebvre // *Polymer Journal*. – 2012. – Vol. 53. – Issue 2. – P. 519–528.
116. Bondi A. On the Predictability of the High-Frequency Elastic Modulus of Crystalline Polymers as Function of Crystallinity / A. Bondi // *J. Polymer Sci.* – 1997. – Pt. A-2. – V.5. – № 1. – P. 83–87.
117. Разумова М. А. Основы векторного і тензорного аналізу : навч. посіб. / М. А. Разумова, В. М. Хотяїнцев. – Київ : ВПЦ «Київський університет», 2011. – 216 с.
118. Синюк О. М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2016. – № 3 (237). – С. 181–188.
119. Ванін Г. А. Мікромеханіка композиційних матеріалів / Г. А. Ванін. – Київ : Наукова думка, 1985. – 304 с.
120. Argon A. S. *The Physics of Deformation and Fracture of Polymers* / A. S. Argon – New York : Cambridge University Pres, 2013. – 511 p.
121. James E. Compositional gradients surrounding spherulites in obsidian and their relationship to spherulite growth and lava cooling / E. James, S. Kenneth, B. Watkins, J. Watkins, M. Hesse, N. Miller // *Springer* – 2012. – № 4. – P. 229–243.

122. Stoclet G. WAXS study of the structural reorganization of semi-crystalline polylactide under tensile drawing / G. Stoclet, R. Seguela, C. Vanmansart, C. Rochas, J.-M. Lefebvre // *Polymer Journal*. – 2012. – Vol. 53. – Issue 2. – P. 519–528.
123. Grub D. T. A structural model for high-modulus polyethylene derived from entanglement concepts / D. T. Grub // *Polymer Physics*. – 1983. – Vol. 21. – Issue 2. – P. 165–188.
124. Koseki Yu. Crystalline structure and molecular mobility of PVDF chains in PVDF/PMMA blend films analyzed by solid-state F MAS NMR spectroscopy / Yu Koseki, Keitaro Aimi, Shinji Ando // *Polymer Journal*. – 2012. – № 44. – P. 757–763.
125. Синюк О. М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2016. – № 6. – С. 77–86.
126. Kanamoto T., Tsuruta A., Tanaka K., Takeda M., Porter R. S. On ultra-high tensile modulus by drawing single crystal mats of high molecular weight polyethylene. *Polym J.* 1983 ; 15 (4) : 327–329. URL: <https://doi.org/10.1295/polymj.15.327>
127. Синюк О. М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О. М. Синюк // *Технічні науки і технології: науковий журнал Чернігівського національного технологічного університету*. – 2016. – № 4. – С. 16–25.
128. Синюк О. М. Моделювання зміни надмолекулярної структури полімерних матеріалів при орієнтаційній витяжці / О. М. Синюк // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2016. – № 6. – С. 45–50.
129. Подільчук Ю. М. Тривимірні завдання теорії пружності / Ю. М. Подільчук // *АН УРСР, Інститут механіки*. – Київ : *Наук. думка.*, 1979. – 240 с.
130. Starkweather H. W. The heat of fusion of polytetrafluoroethylene / H. W. Starkweather, P. Zoller, G. A. Jones // *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*. – 1982. – V. 20. – P. 751–762.
131. Thompson A. B. The transitions of polyethylene terephthalate / A. B. Thompson, D. W. Woods // *Trans Faraday Society Journal*. – 1995. – № 52. – P. 1383–1397.
132. Mehta A. Heat capacities of linear macromolecules / A. Mehta, R. C. Bopp, U. Gaur, B. Wunderlich // *Journal of thermal analysis*. – 1978. – Vol. 13. – Issue 2. – P. 197–203.
133. Heffelfinger C. J. *The Science and Technology of Polymer Films* / C. J. Heffelfinger, K. L. Knox ; Ed. O. J. Sweeting. – New York : Wiley-Interscience, 1971. – 587 p.
134. Hawthorne J. M. *Encyclopedia of Polymer Science* / J. M. Hawthorne, C. J. Heffelfinger, K. L. Knox ; Eds. F. Mark, N. G. Gaylord. – New York : Wiley-Interscience, 1969. – 1142 p.
135. Rodriguez F. *Principles of Polymer Systems* / F. Rodriguez, C. Cohen, Ch. K. Ober, L. Archer. – Washington : CRC Press, 2014. – 810 p.
136. Reneker D. H. Effect of Polymeric Structure on the Permeation Rate in Standard Reference Material Sulfur Dioxide Permeation Tubes / D. H. Reneker, G. M. Martin, R. J. Rubin, J. P. Colson // *Polym. Eng. Sci.* – 1975. – V. 15. – № 1. – P. 11–15.
137. Kokurov, Andrey & Odintsev, Igor & Chichigin, Boris & Subbotin, Dmitry. (2019). Identification of structural defects in composite materials by the thermal imaging non-destructive testing method. *MATEC Web of Conferences*. 298. 00119. 10.1051/mateconf/201929800119.
138. Samuels R. J. *Polymer Structure: The Key to Process-Property Control* / R. J. Samuels // *Polymer Engineering and Science*. – 1985. – № 25. – P. 862–874.
139. Синюк О. М. Визначення ефективних пружних властивостей орієнтованих полімерів в поперечному напрямку / О. М. Синюк, А. Ю. Михайловський // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, 2017. – № 6 (116). – С. 139–148.
140. Синюк О. М. Визначення пружних властивостей полімерного матеріалу під час впливу на нього напружень зсуву / О. М. Синюк, Н. К. Медведчук // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2017. – № 4. – С. 73–81.
141. Синюк О. М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів / О. М. Синюк // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2015. – № 1. – С. 12–18.
142. Paul J. Flory. *Principles of Polymer Chemistry*. – 2007. – 688 p.
143. Тарутина Л. И. *Спектральный анализ полимеров* / Л. И. Тарутина, Ф. О. Позднякова. – Л. : *Химия*, 1986. – 248 с.
144. Пахаренко В. О. ПЕТ-пляшки (технологічні аспекти вторинної переробки) / В. О. Пахаренко, Б. М. Савченко // *Упаковка*. – 2002. – № 2. – С. 53–55.

145. Мандзюк І. А. Дослідження хімічного рециклінгу – гліколізу поліетилентерефталату / І. А. Мандзюк, Т. В. Іванішена // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – № 5. – С. 186–188.
146. Ivanishena T. Chemical recycling of polyethyleneterephthalate trashes / Т. Ivanishena, I. Mandzyuk // International conference «Polymers in XXI century». – Kiev, 2003. – С. 98.
147. Спосіб переробки відходів поліетилентерефталату: Деклараційний патент на винахід № 60710 А. Україна. МКИ 7С08 J11/22 / І. А. Мандзюк, В. М. Голоджко, Т. В. Іванішена. – № 2003021112 ; заявл. 07.02.2003 ; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10. – С. 8–9.
148. Korshak, V. V., Vinogradova, S. V. & Papava, G. S. Heterochain polyesters. Russ Chem Bull 13, 113–119 (1964). URL: <https://doi.org/10.1007/BF01179578>
149. Vinogradova S. V., Korshak V. V., Kolesnikov H. S., Zhubanov B. A. Heterochain polyesters – XVII. Polyesters of phosphorus-containing dicarboxylic acids, Polymer Science U.S.S.R., Vol. 1, Issue 1, 1960, p/ 125–129, ISSN 0032-3950. URL: [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(60\)90241-0](https://doi.org/10.1016/0032-3950(60)90241-0).
150. Levi M., Turri S. Equilibrium and non-equilibrium polycondensation process of segmented poly-perfluoro (oxymethylene-ran-oxoethylene)-carbonates. Journal of Fluorine Chemistry. Vol. 125, Issue 2, 2004, pp. 339–344, ISSN 0022-1139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2003.07.016>.
151. Dyeing of m-Aramid Fibers in Ionic Liquids / Klaus Opwis, Bilal Celik, Rainer Benken, Dierk Knittel and Jochen Stefan Gutmann // Polymers 2020, 12 (8), 1824; URL: <https://doi.org/10.3390/polym12081824>
152. Reitz, R. D. and Bracco, F. V. Mechanism of Atomization of Liquid Jets, The Physics of Fluids, Vol. 25, p. 1730, 1982. URL: <https://doi.org/10.1063/1.863650>
153. Golinka, I. E. Problems of applying protective coatings on rolled textile materials / I. E. Golinka // Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. – 2017. – № 6. – С. 267–271.
154. Horiashchenko S. Research Spray and Device for Polymer Coatings on Fabric / Mechanika 2015 Proceedings Of The 20th International Scientific Conference, Kaunas. – 2015, p. 101–104.
155. Simulation and Research of the Nozzle with an Ultrasonic Resonator for Spraying Polymeric Materials / S. Horiashchenko, I. Golinka, A. Bubulis, V. Jurenas // Mechanika. – 2018. – Vol. 24, No 1. – P. 61–64.
156. Машина для фарбування текстильних виробів. Патент України № 4109 (D06B 5/00) / О. І. Внуков, Г. Ф. Неведрова, О. Є. Федота // Публікація відомостей про видачу патенту: 27.12.1994, бюл. № 6.
157. Пристрій для розпилення рідин, Патент України № 152129 / Д. М. Жиленко // Публікація відомостей про видачу патенту: 02.11.2022, бюл. № 44.
158. Пневматичний пристрій для розпилення. Патент України № 1470 / М. В. Мошовець, М. І. Азаров, А. А. Невечеря, В. К. Кіянко, В. О. Носач, Л. А. Балакін // Публікація відомостей про видачу патенту: 5.10.2002, бюл. № 10.
159. Форсунка для розпилення рідини. Патент України № 2310 / В. Я. Іванченко, А. В. Іванченко // Публікація відомостей про видачу патенту: 16.02.2004, бюл. № 2.
160. Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays" Atomisation and Spray Technology, Vol. 3, pp. 309–337, 1988.
161. Saleem, A., Medina, L., Skrifvars, M. Influence of Fiber Coating and Polymer Modification on Mechanical and Thermal Properties of Bast / Basalt Reinforced Polypropylene Hybrid Composites. J. Compos. Sci. 2020, 4, 119.
162. Xiang, C., Etrick, N. R., Frey, M. W., Norris, E. J., Coats, J. R. Structure and Properties of Polyamide Fabrics with Insect-Repellent Functionality by Electrospinning and Oxygen Plasma-Treated Surface Coating. Polymers 2020, 12, 2196.
163. Kaynak, A. and Foitzik, R. (2011), "Methods of Coating Textiles with Soluble Conducting Polymers", Research Journal of Textile and Apparel, Vol. 15 No. 2, pp. 107–113. URL: <https://doi.org/10.1108/RJTA-15-02-2011-B012>
164. Tekin, E., de Gans, B. J. and Schubert, U. S. (2004). Ink-jet printing of polymers from single dots to thin film libraries. Journal of Materials Chemistry, 14, 262732.
165. Meacham, J. M., Ejimofor, C., Kumar, S., Degertekin, F. L. and Fedorov, A. G. (2004). Micromachined ultrasonic droplet generator based on a liquid horn structure. Review of Scientific Instruments, 75 (5).

166. Synyuk O. M., Skyba M. Ye., Zlotenko B. M. Model of changing the stressed-deformed state of a polymer sheet during stretching / *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019. – № 1. – P. 83–89.
167. Hiroyasu, H. and Kadota, T., *Trans. of SAE*, 83 (1974), 2615.
168. Naber, J. and Reitz, R., *Modeling Engine Spray / Wall Impingement*, SAE Technical Paper 880107, 1988.
169. Mucha, M., Krzyzak, A., Kosicka, E., Coy, E., Kościński, M., Sterzyński, T., Sałaciński, M. Effect of MWCNTs on Wear Behavior of Epoxy Resin for Aircraft Applications. *Materials* 2020, 13, 2696.
170. Buhl, K. B., Agergaard, A. H., Lillethorup, M., Nikolajsen, J. P., Pedersen, S. U. Daasbjerg, K. Polymer Brush Coating and Adhesion Technology at Scale. *Polymers* 2020, 12, 1475.
171. Матеріали та виробництво текстильних і шкіряних побутових призначення. Основні гігієнічні вимоги: ДСТУ 4239-2003 – [Чин. від 01-10-2004]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с.
172. Основы технологии виробів. Ч. 4: Технологічні процеси виготовлення одягу зі шкіри та хутра : лаборатор. практикум для здобувачів першого (бакалавр.) рівня вищої освіти спец. 182 «Технології легкої промисловості» (спеціалізація «Конструювання та технології швейних виробів») / уклад.: Ю. В. Кошевка. О. В. Захаркевич. – Хмельницький : ХНУ, 2022. – 75 с.
173. Kovavich L. *Bonding of metals and plastics*. – М. : Chemistry, 1985. – 240 с.
174. Braslavsky V. A. *Capillary processes in textile materials*. – М. : Lightcombytizdat, 1987. – 112 с.
175. Astrita J., Marruchi J. *Fundamentals of hydromechanics of non-Newtonian fluids*. Y. Kazenin. – М. : Publishing house. "World", 1978. – 310 p.
176. Synyuk O., Kulik T., Zlotenko B. Modeling a process of filling the mold during injection molding of polymeric parts / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, № 5/1 (89). – P. 70–77.
177. De Falco F. Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics / M. P. Gullo, G. Gentile, E. Di Pace, M. Cocca, L. Gelabert, M. Brouta-Agnésa, A. Rovira, R. Escudero, R. Villalba et al. // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 236. – P. 916–925.
178. Petegerich S., Paraska G., Misyac V., Berezenko. – М. : Simulation of polymer coating on the fabric, *Visnik KhNU*, Vol. (2011) No 4., pp. 168–177.
179. Study of the influence of antimicrobial agents on the operational and hygienic properties of cellulose materials / Olga Paraska, Hrystyna Kovtun, Lubos Hes, Serhiy Horiashchenko // *Vlakna a Textil*, Vol. 29, Issue 2, 2022. – P. 73–78.
180. Finite element modeling of porous polymer pipeline coating using X-ray micro computed tomography / Ole Vestrum Magnus Langseth Tore Børvik // *Composites Part B: Engineering*. Vol. 172, 1 September 2019. P. 406–415. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.028>
181. Opwis K., Celik B., Benken R., Knittel D., Gutmann J.S. Dyeing of m-Aramid fibers in ionic liquids. *Polymers*. 2020;12:1824. doi: 10.3390/polym12081824. [PMC free article] [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]
182. Musiał J., Horiashchenko S., Polasik R., Musiał J., Kałaczyński T., Matuszewski M., Śrutek M. Abrasion wear resistance of polymer constructional materials for rapid prototyping and tool-making industry. *Polymers*. 2020;12:873. doi: 10.3390/polym12040873.
183. Horiashchenko S., Horiashchenko K., Musiał J. Methodology of measuring spraying the droplet flow of polymers from nozzle. *Mechanika*. 2020; 26: 82–86
184. Xiao B., Wang S., Wang Y., Jiang G., Zhang Y., Chen H., Liang M., Long G., Chen X. Effective thermal conductivity of porous media with roughened surfaces by fractal-monte carlo simulations. *Fractals*. 2020; 28 doi: 10.1142/S0218348X20500292.
185. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2018; 1:3–39. doi: 10.1016/j.aiepr.2018.05.001.
186. Тараскін, Н. Ю. Особливості методики дослідження властивостей полімерних композиційних матеріалів методом динамомеханічного аналізу / Н. Ю. Тараскін, Є. К. Філіна, Г. В. Малишева // *Усі матеріали. Енциклопедичний довідник*. – 2014. – № 7. – С. 9–13.
187. Lan P., Nunez E.E., Polycarpou A.A. Advanced polymeric coatings and their applications: Green tribology. *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng. Encycl. Renew. Sustain. Mater.* 2020; 4: 345–358. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11466-3.

188. Баженов С. Л. Полімерні композиційні матеріали: міцність і технологія / С. Л. Баженов, А. А. Берлін, А. А. Кульків, В. Г. Ошмяни. – Долгопрудний : ВД «Інтелект», 2010. – 352 с.
189. Potocić Matković V.M., Skenderi Z. Mechanical properties of polyurethane coated knitted fabrics. *Fibres Text. East. Eur.* 2013; 100: 86–91.
190. Горященко С. Л. Дослідження якості розпилення полімеру з форсунки / С. Л. Горященко, В. В. Стрельбицький // Вісник ВОТТП, Одеса. – 2015. – Т. 2. – С. 58–60.
191. Zimon A. D. *Adhesion of Films and Coatings* : 1977. 352 p [Google Scholar].
192. Дослідження попереднього склеювання деталей легкої промисловості полімерними матеріалами / С. Горященко, С. Голінка, Г. Драпак, К. Горященко, О. Поліщук // Вісник Хмельницького національного університету. – № 5. – 2022. – (313). – С. 274–278.
193. Горященко С. Л. Дослідження якості розпилення полімеру з форсунки / С. Л. Горященко, В. В. Стрельбицький // Вісник ВОТТП. – Одеса, 2015. – Т. 2. – С. 58–60.
194. Grand View Research. *Coated Fabrics Market Analysis by Product (Polymer, Rubber, Fabric Backed Wall Coverings) by Application (Transportation, Protective Clothing, Industrial, Furniture) and Segment Forecasts to 2020*. Grand View Research, Inc.; San Francisco, CA, USA: 2014.
195. Темників В. Н., Застосування полімерних матеріалів при технічному обслуговуванні та ремонті машин: монографія / В. М. Темників, В. І. Башкирцев, Ю. В. Башкирцев. – М. : ФГБОУ «РІАМА», 2011. – 229 с.
196. Голінка Є. О. Перспективи використання політетрафлуоретену у валкових машинах нанесення захисного покриття на тканину / Є. О. Голінка, С. Л. Горященко // Вісник ХНУ, 2016. – № 1. – С. 134–137.
197. Мобільний апарат для нанесення полімерних плівок. Патент № 117734 / С. Л. Горященко, С. А. Карван, Є. А. Голінка // Публікація відомостей про видачу патенту: 10.07.2017, Бюл. № 1.
198. Спосіб оцінки якості та економічної ефективності нанесення полімерного покриття на вироби. Патент № 150484 / Ю. В. Кравчик, С. Л. Горященко, К. Л. Горященко // опубл. 23.02.2022, Бюл. № 8/2022.
199. Горященко С. Л. Розробка способу нанесення полімеру на деталі взуття та пристрою для його здійснення / С. Л. Горященко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 1. – С. 238–240.
200. Гардабхадзе І. А. Особливості інноваційної діяльності у сегменті сучасного одягу індустрії моди / І. А. Гардабхадзе // Теорія та практика дизайну. – 2013. – Вип. 3. – С. 3–14. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tprd_2013_3_3.
201. Система стандартів безпеки праці засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація. ДСТУ 7239:2011. – [Чин. від 2011-02-02]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2011. – 6 с. – (Державний стандарт України).
202. Остапенко Н. В. Розробка спеціального термозахисного одягу для ведення аварійно-рятувальних робіт : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.04 / Наталія Василівна Остапенко. – Київ, 2007. – 203 с.
203. Міхеєнко Ю. В. Удосконалення технології виготовлення накладок для автослюсарів СТО / Ю. В. Міхеєнко, О. І. Христюк, Ю. А. Щерба // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 3. – С. 50–75.
204. Колосніченко О. В. Проектування спеціального одягу : навч. посіб. / Н. В. Остапенко, О. В. Колосніченко // Енциклопедія швейного виробництва. – Київ : «Самміт-книга», 2010. – 968 с.
205. Шаран Т. Г. Удосконалення виготовлення спецодягу з підвищеними захисними властивостями для робітників металообробних цехів : дис. ... канд. тех. наук : 05.18.19 / Шаран Тетяна Григорівна. – Хмельницький, 2012. – 153 с.
206. Kolosnichenko O. V. The development of new forms of special clothes by design projectsing methods / O. V. Kolosnichenko, N. V. Ostapenko, M. V. Kolosnichenko // *Vlákna a textil – Fibers and textiles*. – № 2. – 2016. – P. 3–8.
207. Tretiakova L. D. Designing of rational structure of range of insulating protective clothing on the basis of the principles of transformation / L. D. Tretiakova, N. V. Ostapenko, M. V. Kolosnichenko, K. L. Pashkevich, T. V. Avramenko // *Vlákna a textil (Fibres and Textiles)*. – № 23 (4). – 2016. – P. 27–35.

208. Третьякова Л. Д. Оцінювання ризику у використанні захисного одягу / Л. Д. Третьякова, Н. В. Остапенко // Проблеми охорони праці в Україні : зб. наук. пр. – Київ : ДУ «ННДПБООП», 2016. – Вип. 32. – С. 57–66. – URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/pop_2016_32_1
209. Колосніченко О. В. Формоутворення одягу спеціального призначення як об'єкта дизайн-діяльності : монографія / О. В. Колосніченко ; Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. – Київ : КНУТД, 2018. – 420 с. ISBN 978-617-7506-32-3
210. Колосніченко О. В. Художньо-образні особливості спецодягу в дизайні ХХ століття / О. В. Колосніченко, К. Л. Пашкевич, Ю. Я. Лозко // Art and Design Мистецтвознавство. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 87–104. – URL: <https://doi.org/10.30857/2617-0272.2019.1.8>.
211. Колосніченко О. В. Теоретичні основи художньо-композиційного формоутворення одягу спеціального призначення : автореф. дис. ... д-ра мистецтвознавства : 17.00.07 / Колосніченко Олена Володимирівна ; Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. – Київ, 2019. – 36 с.
212. Struminska T. V. Designing of special clothing based on experimental researches of material properties / T. V. Struminska, S. I. Prasol, E. V. Kolosnichenko, N. V. Chuprina and N. V. Ostapenko // Vlákná a textil. Fibres and Textiles. – № 4. – 2019. – P. 84–95. – URL: http://vat.ft.tul.cz/2019/4/VaT_2019_4_10.pdf
213. Остапенко Н. В. Принципи трансформації в дизайн-проектванні одягу / Н. В. Остапенко, Т. В. Луцкер, М. В. Колосніченко // Дизайн одягу в полікультурному просторі : монографія / М. В. Колосніченко, К. Л. Пашкевич, Т. Ф. Кротова та ін. – Київ : КНУТД, 2020. – С. 149–174. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/16297/1/DOvPP_2020_P149-174.pdf
214. Рубанка А. І. Технологія як фактор розвитку одягу спеціального призначення / А. І. Рубанка, Л. Д. Третьякова, М. М. Рубанка // Дизайн одягу в полікультурному просторі : монографія / М. В. Колосніченко, К. Л. Пашкевич, Т. Ф. Кротова та ін. – Київ : КНУТД, 2020. – С. 175–202. – URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/16298/1/DOvPP_2020_P175-202.pdf
215. Захаркевич О. В. Аналіз перспектив застосування полімерних матеріалів для виготовлення одягу спеціального призначення / О. В. Захаркевич, С. Г. Кулешова, С. В. Ткачук, С. В. Лук'яничук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3. – С. 240–248.
216. Колосніченко О. В. Експериментальні дослідження матеріалів для створення теплозахисного спецодягу / О. В. Колосніченко, Т. О. Полька, М. В. Колосніченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. – 2015. – № 1 (82). – С. 191–198.
217. Saribuyekova Yu. Development of styrene-acrylic polymeric compositions for the coating of textile materials used for packing / Yu. Saribuyekova, O. Kunik, T. Asulyuk, O. Semeshko, S. Myasnikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances. – 2017. – Vol. 5, № 6 (89) – P. 35–41.
218. ДСТУ EN ISO 13688:2016 Одяг захисний. Загальні вимоги (EN ISO 13688:2013, IDT; ISO 13688:2013, IDT). – [Чин. від 2017-01-10]. – Київ : Держпозживстандарт України, 2017. – 18 с. – (Національний стандарт України). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67538
219. Пат. 11866 України, МПК 02/02 Комплект спецодягу / Н. В. Прошина, О. П. Стоянова, Т. Г. Шаран ; заявник і патентовласник Хмельницький національний ун-тет. № 201102457 заявл. 08.11.2004 ; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4. – 3 с.
220. ПромСИЗ. – URL: <https://promsiz-tm.ua/ua/projects/poshiv-spetsodezhdy/kollektsiya-spetsodezhdy-karcher/>
221. OLTEKS. – URL: <https://olteks.com/products>
222. ТОВ «УКРІНТЕКС». – URL: http://ukrintex.com.ua/ua/palitra_koloriv.html
223. Колір у виробничому середовищі. – URL: <http://marjasja.multiply.com/journal>
224. Король С. М. Удосконалення процесів проектування чоловічого комбінезону спеціального призначення в художній системі «Сім'я» в умовах ТзОВ «УЛІНЕ» м. Виноградів : дипломна робота магістра : 182 «Технології легкої промисловості» / С. М. Король ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2022. – 77 с. URL: <http://elar.khmnmu.edu.ua/jspui/handle/123456789/13040>
225. Остапенко Н. В. Узагальнена систематизація виробів спеціального призначення / Н. В. Остапенко, Т. В. Луцкер, А. І. Рубанка, О. В. Колосніченко // Теорія та практика дизайну. Технічна естетика. – 2016. – № 10. – С.122–143.

226. PaintTool SAI – SYSTEMAX Software Development. – URL: <https://www.systemax.jp/en/sai/>
227. Kuleshova S. Prospects for the use of polymer materials for the design of special purpose clothing / S. Kuleshova, J. Koshevko, O. Ditkovska, S. Korol // ARTTE Vol. 10, No. 3, 2022 ISSN 1314-8788 (print), ISSN 1314-8796 (online), doi: 10.15547/artte.2022.03.007, P. 181–188. – URL: <https://sites.google.com/a/trakia-uni.bg/artte/articles/artte-vol-10-no-3>
228. Кулешова С. Г. Інновації в дизайн-проектуванні спеціального одягу / С. Г. Кулешова, С. С. Матвійчук, С. М. Король, О. П. Лебединська // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023. – № 2. – С. 374–381.
229. Пат. 40662 України, МПК D 05M 11/00. Спосіб підвищення захисних властивостей та експлуатаційної здатності спецкостюма / В. Й. Рокицька, Н. В. Прошина, Т. Г. Шаран ; заявник і патентовласник Хмельницький національний ун-тет. № 223107895 заявл. 06.10.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8. – 9 с.
230. <https://julivi.com/3d-%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C.html>
231. <https://www.xara.com/us/designer-pro/download/>
232. Sewingcenter. – URL: <https://sewingcenter.com.ua/uk/besshovnye-tehnologii/>
233. Компанія «Softorg». – URL: https://softorg.com.ua/product/jack_jk_6100
234. Shvejnik. – URL: <https://shvejnik.com.ua/ru/mashina-proklejki-shvov-vetron-5374-3025.html>
235. Захаркевич О. В. Аналіз перспектив застосування полімерних матеріалів для виготовлення одягу спеціального призначення / О. В. Захаркевич, С. Г. Кулешова, С. В. Ткачук, С. В. Лук'ячук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3. – С. 240–248.
236. Зайцева Л. О. Якість продукції – необхідна передумова конкурентоспроможності підприємства / Л. О. Зайцева // Актуальні проблеми економіки. – 2014. – № 9 (159). – С. 196–200.
237. Спецвзуття. – 2019. – URL: <https://www.sop.com.ua/article/385-qqq-16-m1-05-01-2016-spetsvzuttya>.
238. Олійникова В. В. Вимоги до матеріалів верху, низу, конструкції та технології виготовлення спеціального взуття / В. В. Олійникова, А. І. Бабич, Я. С. Луканюк, О. В. Марущенко // Легка пром-сть. – 2010. – № 3. – С. 14–15.
239. Грищенко І. М. Поліфункціональні шкіряні матеріали : монографія / І. М. Грищенко, А. Г. Данилкович, О. Р. Мокроусова. – Київ : Фенікс, 2013. – 295 с.
240. Михайловська О. А. Показники якості для спеціального взуття військового призначення / О. А. Михайловська, Т. А. Надопта // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2023. – № 3 (320). – С. 191–197.
241. Данилкович А. Г. Технологія і матеріали виробництва шкіри : навч. посіб. / А. Г. Данилкович, О. Р. Мокроусова, О. А. Охмат ; під ред. А. Г. Данилковича. – Київ : Фенікс, 2009. – 580 с.
242. Взуття. Терміни та визначення: ДСТУ 2157-93 [Чин. від 2002-09-01]. – Київ : Державний комітет стандартизації, метрології та сертифікації України, 1993. – 69 с. – (Національний стандарт України)
243. Взуття спеціальне. Номенклатура показників якості : ДСТУ 3242-95 – [Чин. від 1996-07-01]. – Київ : Державний комітет стандартизації, метрології та сертифікації України, 1995. – 22 с. – Національний стандарт України.
244. Матеріалознавство виробів легкої промисловості : підручник / В. В. Рибальченко, В. П. Коновал, М. Є. Хом'як, Г. І. Шевченко. – Київ : КНУТД, 2012.
245. Мамонов П. Д. Розробка комплексної методики товарознавчої експертизи спеціального взуття / П. Д. Мамонов, А. В. Вергелес. – 2019. – URL: <https://naukajournal.org/index.php/naukajournal/article/view/594/764>.

Зміст

Вступ.....	3
------------	---

Розділ 1.

Аналіз стану проблеми виробничих відходів легкої промисловості

1.1. Класифікація відходів легкої промисловості.....	5
1.2. Відходи текстильного виробництва	7
1.3. Відходи взуттєвого виробництва.....	17
1.4. Основні полімерні матеріали, що використовуються при виробництві товарів легкої промисловості	21

Розділ 2.

Технології та обладнання для переробки полімерних відходів

2.1. Класифікація технологій переробки полімермістких відходів	23
2.2. Обладнання для механічної переробки полімерних відходів легкої промисловості	25
2.2.1. Роторний ножовий подрібнювач	25
2.2.2. Дискові валкові пристрої для переробки відходів	27
2.2.3. Екструдерні пристрої для переробки відходів	30
2.2.4. Голкові дезінтегратори та дисмембратори	33
2.2.5. Валкові пристрої для переробки відходів	34
2.3. Хімічні технології переробки.....	41
2.3.1. Розчинення полімерів	44
2.3.2. Термічна деполімеризація відходів	44
2.3.3. Хімічна деполімеризація відходів.....	49

Розділ 3.

Механічна та хімічна переробка полімермістких відходів

3.1. Структурна модель недеформованих полімерів.....	63
3.2. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей недеформованих полімерів.....	72
3.3. Структурна модель орієнтованого полімеру	77
3.4. Метод розрахунку фізико-механічних властивостей полімерів з орієнтованою структурою ...	85
3.5. Визначення фізико-механічних властивостей орієнтованих полімерів (у напрямку, поперечному до орієнтації)	89
3.6. Визначення фізико-механічних властивостей полімеру при впливі напружень зсуву.....	100
3.6.1. Фізико-механічні властивості полімеру при поперечному зсуві.....	101
3.6.2. Фізико-механічні властивості полімеру при поздовжньому зсуві	107
3.7. Модель зміни фізико-механічних властивостей полімеру під впливом підвищених температур	111
3.8. Розробка хімічної моделі процесу переробки полімермістких відходів	116

**Розділ 4.
Розробка технології нанесення полімерів
для виробів легкої промисловості**

4.1. Аналіз обладнання для нанесення покриття	131
4.1.1. Машина для фарбування текстильних виробів.....	135
4.1.2. Пристрій для розпилення рідин	136
4.1.3. Пневматичний пристрій для розпилення	139
4.1.4. Форсунка для розпилення рідини	141
4.2. Аналіз полімерних композицій з можливістю розпилення.....	142
4.3. Основи нанесення полімерних покриттів методом розпилення.....	145
4.4. Моделювання нанесення полімеру при розпиленні з сопла на деталі легкої промисловості	150
4.5. Моделі взаємодії потоку з підкладкою	154
4.6. Дослідження нанесення полімерних покриттів на вироби легкої промисловості	162
4.7. Експериментальна установка для нанесення покриттів та методика проведення експериментів.....	165
4.8. Результати аналітичних та експериментальних досліджень нанесення полімеру на деталі легкої промисловості.....	168

**Розділ 5.
Застосування полімерів у виробах легкої промисловості**

5.1. Аналіз ринку одягу спеціального призначення та проблем їх використання	171
5.2. Встановлення значущості показників властивостей матеріалів одягу спеціального призначення.....	172
5.3. Визначення деталей одягу та взуття, що найбільш навантажені у процесі носіння.....	177
5.4. Особливості надання виробу захисних властивостей за рахунок додаткових конструктивних елементів.....	185
5.5. Проектно-конструкторська проробка спеціального одягу.....	191
5.5.1. Процес дизайн-проекування спеціального одягу у САПР «Julivi».....	191
5.5.2. Процес візуалізації віртуальної моделі спеціального одягу у САПР «Julivi»	194
5.6. Технологічне пророблення спеціального одягу.....	198
5.6.1. Вибір обладнання та оптимальних режимів технологічної обробки	198
5.6.2. Розробка раціональної технології обробки основних вузлів спеціального одягу.....	200
5.7. Передумови використання полімерних композицій у взуттєвій галузі	204
5.8. Технологічні особливості процесу виготовлення спеціального взуття із застосуванням полімерних композицій	205
Висновки	207
Перелік джерел посилання.....	209

Наукове видання

*Синюк Олег Миколайович,
Іванішена Тетяна Володимирівна,
Кулешова Світлана Геннадіївна.
та ін.*

**ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ
КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ
ПОЛІМЕРМІСТКИХ ВІДХОДІВ
У ВИРОБИ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Відповідальний за випуск: *В. С. Яремчук*

Технічне редагування, коректування і верстка: *О. В. Чопенко*

Оформлення обкладинки: *А. М. Басалюк*

Підписано до друку 31.10.2023.

Формат 30×42/2. Папір офс. Гарн. Times New Roman.

Друк різнографією. Ум. друк. арк. – 19,04. Обл.-вид. арк. – 14,63.

Тираж 50. Зам. № 95/23

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУ.

29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1.

Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.



Синюк
Олег Миколайович – доктор технічних наук, професор кафедри машин та апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету.

Сфера наукових інтересів: комплексна переробка відходів легкої промисловості; лиття під тиском полімерних виробів; моделювання динамічних процесів у суцільних середовищах.



Кулешова
Світлана Геннадіївна – доктор технічних наук, професор кафедри технології і конструювання швейних виробів Хмельницького національного університету.

Сфера наукових інтересів: інноваційні і комп'ютерні технології у дизайн-проектванні швейних виробів; психотехнології у fashion-бізнесі; адресне проектування швейних виробів з використанням експертних систем на засадах емоційного дизайну.



Іванішена Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та хімічної інженерії Хмельницького національного університету.

Сфера наукових інтересів: технології переробки полімермістких відходів; матеріали для проектування природоохоронних хімічних технологій; оцінка життєвого циклу речовин, матеріалів та технологій.



Горашченко Сергій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету.

Сфера наукових інтересів: автоматика та автоматизоване обладнання, моделювання машин легкої промисловості та електромеханічних систем; технології та обладнання для полімерних покриттів.



Надопта Тетяна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри індустрії моди в легкій промисловості Хмельницького національного університету.

Сфера наукових інтересів: якість та сталість виробництва виробів легкої промисловості; інновації та стратегії просування і збуту fashion-виробів; проектування взуття з заданими експлуатаційними властивостями.