

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії

ДИПЛОМНА РОБОТА

ОС «Магістр»

Тема „Зносостійкість полімерів та полімерних покриттів при їх мікроударних навантаженнях в середовищах харчових виробництв”

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
Спеціалізація Машини і апарати харчових виробництв

Шифр ДПМАХВ 24.23.00.00.000 ПЗ

Студент гр. МАХВм-23-1



Перейма А.Р.

Керівник роботи

к.т.н., доц. Мартинюк А.В.

До захисту допускаю:

к.т.н., доц. Мартинюк А.В.

Завідувач кафедри ГМА



_____ 2024 р.

Хмельницький, 2024р.

АНОТАЦІЯ

В магістерській роботі Перейми А.Р. «Зносостійкість полімерів та полімерних покриттів при їх мікроударних навантаженнях в середовищах харчових виробництв» на основі аналізу літературних джерел показана актуальність теми роботи, сформульовані мета, об'єкт, предмет і задачі дослідження.

В роботі розглянуто питання кавітаційно-ерозійної стійкості поліпропіленів низького і середнього тисків, а також фторопластів Ф3 і Ф4 у водопровідній воді і 3%-му розчині кухонної солі.

Для виключення температурного фактору руйнування дослідження проводили в ємності в якій температура робочого середовища стабілізувалася за допомогою двох охолоджувальних контурів з різнонаправленими витками спіралей контурів і експериментально підібраним кроком між витками. В результаті поверхнева температура зразка стабілізувалася в межах $\pm 1,5$ °С протягом усього часу проведення випробувань.

Встановлено, що інтенсивність кавітаційно-ерозійного зношування поліпропіленів та фторопластів описується залежністю $I = e^{a\tau}$ де $a = tg\alpha$ - кут нахилу прямих до осі абсцис і τ - час дії мікроударного навантаження.

Аналіз кривих руйнування поверхонь досліджуваних полімерів у водопровідній воді і 3%-му розчині NaCl ($I=f(\tau)$, $\Delta G= f(\tau)$, $lgG= f(\tau)$) дозволив виявити на поліпропілені три ділянки, а на фторопласті дві ділянки руйнування, які відрізняються швидкістю руйнування. Разом з тим, встановлено лише два механізми руйнування поверхонь полімерів.

Показано, що кавітаційно-ерозійна зносостійкість поліпропілену і фторопласту дещо вища аніж зносостійкість покриттів на їх основі, що нанесені на сталь 45. Однак, покриття на основі поліпропілену та фторопласту більше як в два рази підвищують кавітаційно-ерозійну зносостійкість сталі 45. Таким чином, покриття на основі поліпропілену є ефективним методом підвищення кавітаційно-ерозійної зносостійкості

металевих поверхонь в умовах незначних і середніх мікроударних навантажень та зовнішніх механічних напружень, а з фторопласту, навпаки – високих мікроударних та механічних навантаженнях.

Матеріали роботи опубліковані:

1. Федорів В., Стечишин М., Мартинюк А., Курской В., Перейма А. Обґрунтування конструктивних параметрів віброзмішувачів для борошняних компонентів / *Modern Engineering and Innovative Technologies*. – 2024.– № (32-01). – С. 11-19.

Магістерська робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів. Викладена на 72 сторінках машинописного тексту. Містить 26 рисунків і 9 таблиць і список літератури із 53 найменувань.

ВСТУП

Удосконалення конструкцій машин і механізмів, що працюють у потоці рідини приводить до прискорення швидкості їхнього руху і, як наслідок, до посилення руйнування в результаті кавітації. Кавітаційна довговічність деталей може бути істотно підвищена за рахунок застосування матеріалів, стійких до кавітації [1]. Оскільки кавітаційне руйнування розвивається на поверхні деталі, альтернативою об'ємному легуванню може є створення кавітаційно-корозійно стійких покриттів на дешевих вуглецевих сталях. Незважаючи на успіхи у світовий науці по розробці кавітаційно-стійких легованих сплавів, практично відсутня комплексна система вибору матеріалу як металевих так і полімерних покриттів, оптимізації їхньої структури й цілеспрямованого упрвління властивостями покриттів.

З іншої сторони, кавітаційно-ерозійна зносостійкість металевих сплавів так і покриттів на їх основі, у корозійно-активних середовищах визначається механічним і корозійним чинниками руйнування. Корозія, сама по собі, не викликає суттєвих втрат маси, але є каталізатором втомного руйнування металевих поверхонь при їх мікроударному навантаженні в

корозійному середовищі. Тому корозійна стійкість, а в багатьох випадках і повна хімічна інертність по відношенню до дії агресивних середовищ, обумовила інтерес дослідників і практиків до застосування деталей з пластмас, що контактують з корозійними середовищами, зокрема в умовах тертя [2] та кавітації [3]. Попри ряд суттєвих переваг пластмас, їх застосування обмежується також нижчими, порівняно з металами, фізико-механічними характеристиками і їх високою залежністю від температури. Поєднання переваг металевих сплавів і пластмас можна досягти шляхом нанесення на металеві поверхні полімерних покриттів [4;5].

Актуальність теми

При корозійно-механічному зношуванні, до якого відноситься і кавітаційно-ерозійне зношування (КЕЗ) металів в корозійно-активних середовищах, корозійна складова руйнування сама по собі є незначною, але будучи каталізатором інтенсифікації електрохімічних процесів суттєво впливає на загальні характеристики руйнування поверхонь. Інертність багатьох полімерів по відношенню до корозійно-активних середовищ і зумовила інтерес багатьох дослідників та практиків до полімерів, їх застосуванню в якості захисних покриттів. Це пов'язано з їх тепло- і електроізоляційними властивостями, значно меншою густиною (у 3 рази нижче за густину металевих сплавів), методами і ціною переробки полімерів у деталі так і легкістю нанесення захисних полімерних покриттів порівняно з металевими. Разом з тим, застосування полімерних матеріалів в якості захисних кавітаційно-стійких покриттів металів характеризується випадковим їх вибором без врахування виду середовища, інтенсивності мікроударного навантаження, тощо. Останнє обумовлено дуже обмеженою кількістю досліджень в цій області. В той же час, проведені дослідження вказують на високу перспективність застосування полімерів і полімерних покриттів на їх основі для підвищення зносостійкості пар тертя, які безпосередньо працюють в контакті з агресивним середовищем.

Тому актуальною задачею є систематизація даних про кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерів та покриттів з полімерних матеріалів на металічній основі, та дослідження їх зносостійкості при мікроударних навантаженнях в нейтральних, кислих та лужних середовищах. В роботі, в основному, досліджували кавітаційно-ерозійну стійкість полімерів та полімерних покриттів в нейтральних середовищах (прісна вода, 3%-вий розчин кухонної солі).

Мета дослідження

Дослідити кавітаційно-ерозійну зносостійкість різних класів полімерів та покриттів на їх основі в нейтральних середовищах.

Завдання дослідження:

- на основі літературних даних проаналізувати кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерних матеріалів;
- освоїти методику і лабораторне обладнання для проведення досліджень на кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерних матеріалів та обладнання для нанесення полімерних покриттів;
- знайти показники кавітаційно-ерозійної зносостійкості полімерів класу поліолефінів (поліпропілен середнього та низького тисів), фторопластів (Ф4 та Ф3) в нейтральних середовищах.
- знайти показники кавітаційно-ерозійної зносостійкості нанесених на сталь 45 полімерних покриттів;
- систематизувати отримані дані про зносостійкість різних видів покриттів на основі полімерних матеріалів;
- провести порівняльний аналіз кавітаційно-ерозійної зносостійкості полімерів та полімерних покриттів в нейтральних середовищах.

Об'єкт дослідження:

Процеси руйнування полімерів та полімерних покриттів нанесених на сталь 45.

Предмет дослідження: кавітаційно-ерозійна зносостійкість полімерів та полімерних покриттів на вуглецевій сталі 45.

Публікації:

1. Федорів В., Стечишин М., Мартинюк А., Курской В., Перейма А. Обґрунтування конструктивних параметрів віброзмішувачів для борошняних компонентів / *Modern Engineering and Innovative Technologies*. – 2024.– № (32-01). – С. 11-19.

Магістерська робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів. Викладена на 72 сторінках машинописного тексту. Містить 26 рисунків і 9 таблиць і список літератури із 53 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Класифікація високомолекулярних сполук

За походженням високомолекулярні сполуки розподіляються на природні та синтетичні. До найбільш типових природних полімерів відносяться полісахариди (крохмаль, клітковина), білки та натуральний каучук.

До синтетичних полімерів належать високомолекулярні сполуки, які одержують шляхом синтезу із простих низькомолекулярних сполук (мономерів). Представниками таких полімерів є: поліетилен, поліпропілен, полістирол, полівінілхлорид, полівінілацетат, фенолформальдегідні смоли, капрон, нейлон та деякі інші.

Залежно від хімічного складу високомолекулярні сполуки поділяють на органічні, елементоорганічні та неорганічні [6].

До органічних полімерів належать сполуки, які складаються не тільки з атомів вуглецю і водню, а із атомів кисню, азоту, сірки, галогенів.

Полімери, основний ланцюг яких побудований тільки з атомів вуглецю, називаються карболанцюгові (поліетилен, поліпропілен та ін.).

Полімери, основний ланцюг яких побудований не тільки з атомів вуглецю, а й містять кисень, азот, сірку, фосфор, називаються гетероланцюговими:



До групи гетероланцюгових полімерів, крім синтетичних (капрон, лавсан та ін.), належать природні полімери (клітковина, крохмаль, білки, нуклеїнові кислоти), які відіграють основну роль в життєдіяльності як рослинного так і тваринного організмів.

Елементоорганічні полімери — це сполуки, основний ланцюг яких побудований із вуглецю та кремнію, фосфору, алюмінію, магнію та інших

металів. Елементоорганічні полімери поділяються на неметалеві (фосфорорганічні, кремнієорганічні) та металеві (алюмінієорганічні, магнієорганічні, титаноорганічні та ін.).

До неорганічних полімерів належать карбід і нітрид бору, силікати, алюмосилікати (тальк, азбест, каолініти), сірка, фосфор, телур та інші прості і складні речовини. Відмінними особливостями неорганічних полімерів є їх високі термо- і радіаційна стійкість, незаймистість і довговічність.

Залежно від характеру розміщення макромолекул полімери можуть перебувати в аморфному і кристалічному стані [7, 8].

Залежно від структури полімери поділяють на лінійні, розгалужені і сітчасті. Лінійними називають полімери, які складаються з макромолекул, що не мають розгалужень або мають, але дуже малі. Розгалуженнями називають полімери, що складаються з макромолекул, в яких великі розгалуження, а група сітчастих полімерів (просторових, зшитих) містить полімери, які становлять гігантські тривимірні утворення молекул (гума, фенолформальдегідні, гліфталеві смоли та ін.) (рис.1.1).

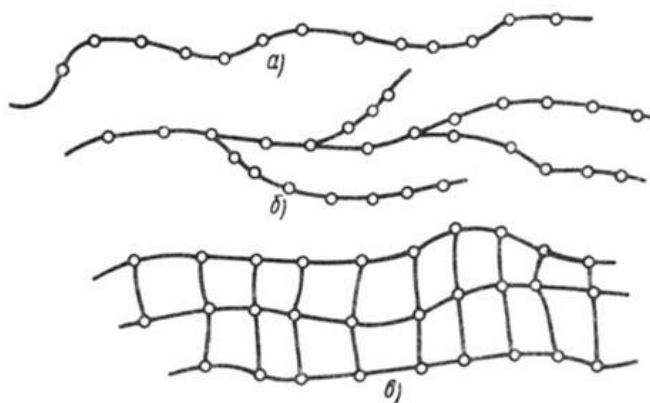
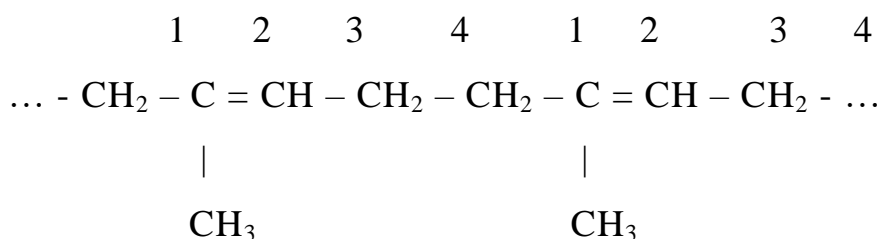


Рис.1.1. Структура полімерних матеріалів:

- а – лінійна;
- б – розгалужена;
- в – сітчаста.

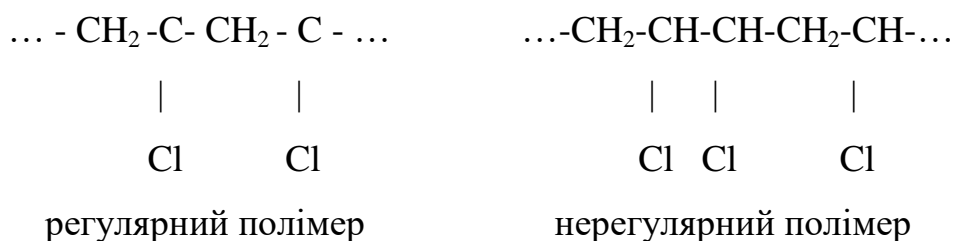
За розміщенням елементарних ланок у макромолекулі полімери поділяють на регулярні і нерегулярні [2, 3, 7]. Типовим прикладом регулярного полімеру є натуральний каучук, в макромолекулі якого всі

ізопренові елементарні ланки практично об'єднані поміж собою у положенні 1,4 («голова - хвіст»).



Регулярність будови проявляється в тому, що кожен четвертий зв'язок — подвійний (— C=C —), а бокові металні групи (CH₃) розміщені через п'ятий атом вуглецевого ланцюга.

Якщо розміщення елементарних ланцюгів у макромолекулі безладне (то «головою до хвоста», то «хвостом до голови»), або віддаль між боковими та функціональними групами неоднакова на різних ділянках полімерного ланцюга, то такий полімер буде нерегулярним:



Останнім часом отримано нову групу кристалічних полімерів, які називаються стереорегулярними [9]. У них полімерні ланцюги і функціональні групи розміщені в певному порядку не тільки в площині, а і в просторі.

1.2. Основні властивості високомолекулярних сполук

Властивості високомолекулярних сполук визначаються їх хімічним складом, структурою, фазовим складом, методами їх одержання і умовами переробки [10].

Всі полімери залежно від їх будови і зовнішніх умов можуть перебувати в аморфному або кристалічному стані [2, 5, 11]. Аморфні полімери (полівінілхлорид, етилацетат та ін.) не мають строгого порядку в розміщенні ланцюгів. Вони можуть існувати в трьох фізичних станах - склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому. Високоеластичний стан характеризується рухливістю мономерних ділянок макромолекул за підвищених температур. Чим вища молекулярна маса полімеру, тим більше виражено високоеластичний стан. Значний інтерес становить вивчення механічних властивостей. У зв'язку з цим стан полімеру часто оцінюють у результаті вивчення його деформації, яка розвивається протягом певного часу за певної температури і величини навантаження, що спричиняє деформацію. Графіки залежності деформації від температури називаються термомеханічними кривими [2, 12].

Температура переходу з високоеластичного стану в склоподібний і навпаки, називається температурою склування (T_c), а температура переходу із високоеластичного стану у в'язкотекучий називається температурою текучості ($T_{тек}$) [13].

Склоподібним називається твердий стан аморфних речовин. Він характеризується міцними зв'язками між молекулами, тому полімер у такому стані має значну механічну міцність. У склоподібному стані коливальний рух атомів і ланок які утворюють ланцюг полімеру незначний, внаслідок чого також спостерігається незначна деформація. Основним видом деформації полімерів у склоподібному стані є пружні деформації, які виникають внаслідок зміни кутів валентних зв'язків між атомами макромолекул. Якщо гнучкість ланцюгів обмежена, склоподібні полімери поведуться як крихкі тіла і за незначної деформації починають руйнуватися.

Із склоподібного стану у високоеластичний полімери переходять коли підвищується температура. Характерною особливістю полімерів у цьому стані є їх висока еластичність, тобто здатність під впливом незначних зовнішніх сил набувати початкової форми. У цьому стані вже спостерігається коливальний рух окремих ланок, внаслідок чого макромолекули можуть легко згинатись і випрямлятись, набувати різних конформацій. Здатність полімерів переходити у високоеластичний стан має важливе значення для експлуатації каучуків і гумових виробів, які виробляються на їх основі.

З підвищенням температури полімер може переходити у в'язкотекучий стан. У в'язкотекучому стані для полімеру характерна рухомість всього ланцюга макромолекул, що зумовлює необоротну деформацію полімерів, тобто здатність зберегти їм надану форму. Здатність полімерів переходити у в'язкотекучий стан особливо важлива для їх переробки, оскільки найчастіше полімери переробляються у вироби перебуваючи у в'язкотекучому стані. У в'язкотекучому стані макромолекули можуть переміщатися одна відносно одної, тому температура текучості залежить від молекулярної маси. Вона тим вища, чим більша молекулярна маса полімеру. На температуру склування і текучості впливає також гнучкість макромолекул, яка в свою чергу, залежить від наявності полярних груп і відгалужень. Температура склування для полімерів, що мають полярні групи, вища ніж для неполярних. Наприклад, у поліметилметакрилату вона дорівнює 373 °К, а для поліетилену – 294 °К. У всіх еластомерів температура склування і текучості підвищується при переході від лінійних полімерів до просторових. Зі збільшенням кількості поперечних зв'язків збільшується і жорсткість макромолекул, зменшується текучість і підвищується температура склування полімерів [14].

Знизити температуру склування полімерів можна змінюючи більш полярні групи менш полярними, або вводячи пластифікатори, які зменшують взаємодію з макромолекулами полімеру. Пластифікація полімеру робить його м'якшим ,більш здатним до розтягування, підвищує його міцність на

удар і збільшує видовження при розриві. Ефективність дії пластифікатора можна побачити на прикладі зміни деформації лінійного полімеру.

Кристалічний стан властивий полімерам завдяки високовпорядкованому (регулярному) розміщенню ланцюгів. До кристалічних полімерів належать: поліетилен, поліпропілен (ізотактичний), поліаміди, фторопласти та ін. За відповідних умов у кристалічному стані можуть бути одержані й інші полімери, наприклад полістирол, для яких типова аморфна структура.

Проте, в полімерах поряд з кристалічними утворюваннями (фазами) існують ділянки аморфних фаз. Відношення об'єму кристалічної частини полімеру до аморфної називають ступенем кристалічності (X_c) (Таблиця 1.1), який багато в чому визначає ділянку температур текучості та плавлення полімерів, а також механічні й експлуатаційні властивості виробів.

Лінійні полімери за підвищених температур пом'якшуються, а потім стають в'язкотекучими, при охолодженні розплаву затвердівають. Їх називають термопластичними (термопласти).

Полімери тривимірні (резит, вулканізований каучук та ін.) не розчиняються і не плавляться під час нагрівання. Дія на них підвищених температур призводить до подальшого твердіння або й до деструкції. Такі полімери називають термоактивними (ракетоласти). Основні властивості високомолекулярних сполук: густина, тепло- і температуропровідність, температура деструкцій, хімічні властивості, оптичні та діелектричні властивості.

Таблиця 1.1-

Температура плавлення та ступінь кристалічності полімерів

Полімер	$T_n, ^\circ\text{C}$	$X_c, \%$
ПЕНД	102-113	менше 60
ПЕВТ	120-128	70-80
ПП (ізотактичний)	165-172	63-75

ПЕТ	265-275	менше 50
ПА 6 блочний (капролон)	215-230	50
ПА 66 (нейлон)	268-275	70
ПВХ-С-6388-Ж (вініпласт)	264-270	10-35
ПВХ	165-170	до 10
Полістирол	85-110	аморфний

Густина. Полімери мають низьку густину, яка коливається в межах від 0,92 до 1,2 г/см³, за винятком фторопластів, густина яких близько 1,8—2,1 г/см³. Полімери в середньому в 2—3 рази легші за алюміній і в 5—6 разів легші від сталі, міді та свинцю.

Тепло- і температуропровідність у більшості полімерів в 100—400 разів менші від сталі і в 1000 разів від міді.

Температура деструкції - це температура умовно визначає верхню межу формування і використання виробів. Полімери по-різному поведуть себе під час нагрівання. Термоокиснювальна деструкція поліетилену перебігає з утворенням низькомолекулярних продуктів, здебільшого вуглекислого та чадного газів і води, а також органічних радикалів.

У процесі деструкції полівінілхлориду виділяється хлористий водень. Полістирол і поліметилметакрилат під час нагрівання не полімеризується, поліаміди розкладаються з утворенням мономера і численних інших низькомолекулярних продуктів.

Хімічні властивості. Ковалентна природа зв'язку атомів, що складають полімер, обумовлюють високу стійкість цих матеріалів проти вологи, розчинів солей, кислот і лугів. А такий полімер, як фторопласт Ф4, має виняткову стійкість, не розчиняється і не набрякає навіть у суміші концентрованих соляної і азотної кислот.

Висока стійкість полімерів дозволяє використовувати їх для виготовлення труб, крильчаток насосів та інших місткісних засобів для

транспортування агресивних рідин, а також застосовують в хімічному та харчовому машинобудуванні.

1.3 Фізико-хімічні властивості основних полімерних матеріалів

Полімерні матеріали – це синтетично отримані тверді матеріали, які внаслідок своєї пластичності здатні набувати надану їм форму під дією тепла і тиску і зберігають її після припинення дії останніх.

Пластичність характерна для багатьох високомолекулярних сполук, а тому їх використовують для виготовлення пластмас. Високомолекулярні сполуки з яких одержують пластмаси, називають смолами.

У більшості випадків пластмаси являють собою композиційні матеріали, основу яких складають високомолекулярні сполуки, а також наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, змащувальні речовини, каталізатори, антистатики, антипірени, барвники і газоутворювачі [15].

Наповнювачі вводять для підвищення механічної міцності, теплостійкості, поліпшення електроізоляційних, фрикційних і антифрикційних властивостей, зменшення усадки і зниження вартостей пластмас. Як наповнювачі використовують органічні матеріали (деревне борошно, бавовняні насоси, целюлоза, бавовняна тканина, папір, деревний шпон) і неорганічні (азбест, графіт, слюда, кварц, склотканини, скловолокно) [15].

Пластифікатори (дібутилфталат, трикрезолфосфат тощо) збільшують текучість, еластичність, гнучкість і морозостійкість пластмас, зменшують їх крихкість [12].

Стабілізатори (ароматичні аміни, феноли, газова сажа) підвищують стійкість пластмас проти старіння.

Змащувальні речовини знижують в'язкість композицій і запобігають прилипанню пластмас до устаткування в процесах виготовлення виробів.

Каталізатори (твердники) — речовини, що прискорюють процес твердіння пластмас.

Антистатики зменшують їх електризацію в процесі переробки і використання, антипірени знижують горючість.

Барвники застосовують для виготовлення кольорових пластмас, а газоутворювачі — газонаповнених пластмас.

Залежно від поведінки, зв'язки за різних температур пластмас, як і чисті полімери, поділяють на термопластичні та термореактивні.

Для більшості термопластичних пластмас характерна досить велика ударна в'язкість (за винятком плексигласу і полістиролу), хороші діелектричні властивості, висока водостійкість (окрім деяких поліамідів), низька теплостійкість, помітна холоднотекучість.

Для виготовлення пластмас використовують головним чином такі термопластичні полімери, які мають мінімальну холоднотекучість. Але полімери з низькою холоднотекучістю мають невисоку пластичність. Для полегшення переробки подібних полімерів у них вводять пластифікатори, які будучи рівномірно розподіленими між макромолекулами знижують взаємодію останніх і тим самим полегшують розвиток необоротних деформацій, особливо за підвищеної температури. Одночасно пластифікатор знижує температуру склування (підвищує морозостійкість), збільшує відносне подовження в умовах розтягування, але на жаль, зменшує міцність на розрив [16].

Термореактивні пластмаси на відміну від термопластичних мають в термостабільному стані невелику холоднотекучість, з підвищенням температури мало змінюють механічні властивості, працездатність термопластів в навантаженому стані знаходиться в широкому діапазоні температур і водночас, термопластичні пластмаси мають підвищену холоднотекучість та низьку ударну в'язкість. Термореактивні полімери до переробки у виробі являють собою порівняно низькомолекулярні сполуки, атому вони мають низьку температуру текучості і легко формуються в процесі виготовлення деталей. За цієї причини для такого роду полімерів за рідкісним винятком не застосовують пластифікатори, тим більше, що за їх

допомогою не можна збільшити еластичність, оскільки смола в термостабільному стані стає нерозчинною. В подібних випадках зниження крихкості виробів досягається попереднім сплавленням твердіючої смоли з каучуком або з іншими еластичними полімерами [17].

Для класифікації пластмас є й інші показники. За фізико-механічними властивостями за звичайної температури пластмаси поділяються на тверді, напівтверді, м'які та еластичні, за видом наповнювача — з порошковим, волокнистим, листовим, газоповітряним наповнювачами та без них.

За призначенням пластмаси поділяють на силові, удароміцні, антифрикційні і фрикційні, термо-, радіаційно-, тропіко-, вібро-, тепло-, звуко- і водохімістійкі, електроізоляційні, оптичні (прозорі) і декоративні.

Окрім того, пластмаси поділяють на сировинні і готові вироби — у вигляді листів, пластин, блоків, плівок і заготовок, а сировинні пластмаси випускають у вигляді гранул, кришки, прес-порошків, волокнітів, мас для литва.

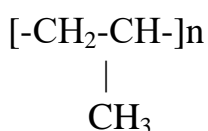
1.4. Фізико-механічні властивості основних термопластів

Поліетилен $[-CH_2-CH_2]_n$ - тверда рогоподібна речовина молочно-білого кольору. За зовнішнім виглядом і на дотик він нагадує парафін. У звичайних умовах він досить стійкий проти дії кислот (за винятком азотної кислоти), лугів і органічних розчинників. Коли нагрівати поліетилен до $80^{\circ}C$, він може розчинятися у чотирихлористому вуглеці, бензолі, толуолі, ксилолі і деяких інших органічних розчинниках. Поліетилен стійкий проти дії низьких температур (до $-70^{\circ}C$), газо- і водонепроникний, має добрі електроізоляційні властивості. Поліетилен під впливом тепла і сонячного проміння на повітрі поступово окиснюється (старіє), внаслідок чого погіршуються його фізико-механічні властивості. Стійкість поліетилену проти окиснення підвищують, або введенням антиокиснювачів, або радіоактивним опромінюванням, яке «зшиває» молекули, внаслідок чого

підвищується теплостійкість, але зменшується еластичність, розчинність. Опромінений поліетилен може витримати температуру до 200 - 250 °С [17].

Поліетилен використовують у гранулах (сировинний) і у вигляді плівок. Із сировинного поліетилену виготовляють вироби способом екструзії, штампування, пресування, лиття під тиском і дуттям. З поліетилену виготовляють вентилі, клапани, крани для хімічних апаратів, робочі органи насосів, хімічний посуд для зберігання мінеральних кислот і лугів. Особливо широко використовують поліетилен для виробництва водопровідних, каналізаційних та інших видів труб, які значно легші за металеві, стійкі проти корозії і не руйнуються, коли в ємності замерзає вода.

Поліпропілен - це тверда прозора або молочно-біла речовина, молекулярна маса якої становить 30—500 тисяч.



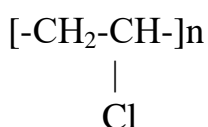
Поліпропілен характеризується високою стійкістю проти дії кислот, лугів, розчинів солей та інших агресивних середовищ. За кімнатної температури поліпропілен не розчиняється у більшості органічних розчинників. З підвищенням температури набухає або розчиняється, зокрема, в бензолі, чотирихлористому вуглеці, ефірі тощо.

Випускають поліпропілен у вигляді білого порошку, гранул різних кольорів. Переробляють поліпропілен у вироби і матеріали різними способами — литтям під тиском, безперервним видавлюванням (екструзією), пресуванням.

Поліпропілен використовують для виробництва труб, робочих органів насосів для хімічної промисловості, еластичної і міцної електроізоляції, клапанів, деталей для холодильників, захисних плівок, а також багатьох інших виробів широкого вжитку. Поліпропіленові труби витримують вищий тиск, ніж труби з поліетилену, хоч мають дещо гірші показники щодо

морозостійкості. Використовують поліпропілен і для виробництва волокон, які використовують як оббивні матеріали, фільтри, морські канати тощо [18,19].

Полівінілхлорид (ПВХ) одержують здебільшого у вигляді аморфного порошку, густина якого становить $1,4 \text{ г/см}^3$ і температура розм'якшення — близько $85 \text{ }^\circ\text{C}$.



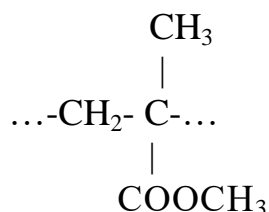
З полівінілхлориду виготовляють два види пластмас — вініпласт і пластикат. Вініпласт — це жорсткий і пружний матеріал. Він не горить і характеризується високою хімічною стійкістю та механічною міцністю. За температури до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ на нього не діють ні соляна, ні сірчана кислоти, а також концентровані розчини лугу. Випускають вініпласт у вигляді плівок, листів, а також у формі трубок і стрижнів. Плівки застосовують як антикорозійний і електроізоляційний матеріали, а також для упакування різних продуктів і матеріалів. Гарячим пресуванням плівкового вініпласту за допомогою гідравлічних пресів виготовляють листовий матеріал. Листовий вініпласт випускають трьох марок: ВН — непрозорий, ВП -прозорий натурального кольору або забарвлений, ВНТ — нетоксичний. Переробляти вініпласт на виробі можна гарячим пресуванням, литтям під тиском, обробкою на верстатах [20].

Завдяки комплексу цінних властивостей вініпласт широко використовують для виготовлення різних комунікацій, виробів, деталей, резервуарів електролізних і травильних ванн. З нього виготовляють труби для транспортування агресивних речовин за температури до $60 \text{ }^\circ\text{C}$, деталі робочих органів насосів, вентиляційних установок - циклони, адсорбційні колонки, дефлектори, особливо для вентиляції цехів тих виробництв, у яких виділяються агресивні гази. Вініпласт використовують для футерування механічних апаратів з метою захисту їх від корозії. Велика кількість

полівінілхлориду витрачається для виробництва пінопоропластів як тепло- і звукоізоляційних матеріалів (ПВХ-1, ПВХ-2), а також на виготовлення товарів широкого вжитку.

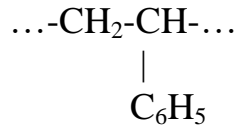
Фізико-механічні властивості полівінілхлориду можна замінювати введенням пластифікаторів. При цьому утворюється гнучкий і еластичний пластифікат. Його випускають у вигляді пластин, труб, листів, плівок і стрічок. Він характеризується високою хімічною стійкістю і високими діелектричними властивостями, водонепроникністю, він не набухає у воді, маслі, бензині. Внаслідок цього пластикат використовують для виготовлення тари та кабельної ізоляції [20].

Поліметилметакрилат (органічне скло) являє собою прозоре, гнучке скло, стійке проти дії кислот, лугів і не розчиняється в бензині та маслах. Густина його становить 1,18-1,30 г/см³. Коли нагріти до 453-473 К, то воно переходить в пластичний стан.



Органічне скло пропускає до 73 % ультрафіолетового проміння, а звичайне — тільки 1 %. Використовують його для скління вікон автомобілів, тролейбусів, літаків, лікарень, шкіл, житлових будинків тощо. Плексиглас використовують в оптиці, світлотехніці для виготовлення товарів широкого вжитку. Поліметилметакрилат розчиняється в ацетоні, дихлоретані, оцтовій кислоті, утворюючи клейкі розчини. Недоліком поліметилметакрилату є низька теплостійкість і мала поверхнева твердість [21].

Полістирол — тверда, прозора, склоподібна речовина з густиною 1,05-1,08 г/см³ і температурою плавлення 85— 110 °С. Полістирол стійкий проти дії кислот (за винятком азотної) і лугів, водостійкий. Він розчиняється в ефірах, кетонах і ароматичних вуглеводнях, але не розчиняється в спиртах і насичених вуглеводнях. Особливою цінністю полістиролу є його добрі діелектричні властивості.



З полістиролу виготовляють ізоляційну плівку для конденсаторів, ізоляції, спеціальних кабелів, а також для загальнопромислового призначення. Недоліком цих плівок є розчинність в ароматичних вуглеводнях (бензолі, ксилолі) і висока паропроникність. З полістиролу одержують пінопласт, який застосовують як легкий наповнювач в армованих конструкціях, а також як теплоізоляційний матеріал [11].

Політетрафторетилен (фторопласт-4, або тефлон) $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$ за звичайних умов - це пухкий волокнистий порошок. На холоді він спресовується в таблетки до 360—380 °С, вони перетворюються в масу білого або сірого кольору, густина фторопласту-4 становить 2,1—2,2 г/см³.

Для політетрафторетилену характерні досить цінні фізико-механічні і хімічні властивості. Цим він відрізняється від інших природних і синтетичних матеріалів. Висока хімічна інертність, теплостійкість та низький коефіцієнт тертя дають змогу використовувати тетрафторетилен для виготовлення прокладок, який заміняє азбест, бронзу, а також для виготовлення манжетів, деталей вентилів та кранів, насосів, мембран, підшипників, втулок та ін. Плівки товщиною 5,0—40,0 мкм використовують для обмотки кабелів, конденсаторів. Співполімери з гексафторпропіленом застосовуються у машинобудуванні та авіаційній промисловості для виготовлення деталей електронного устаткування як електроізолятор. Поліаміди характеризуються наявністю у макромолекулах амідних груп [22].



З групи поліамідів важливе практичне значення мають капрон, анід (найлон) і капролон.

Капрон - це твердий безбарвний рогоподібний полімер з густиною $1,4 \text{ г/см}^3$ і температурою плавлення $215 \text{ }^\circ\text{C}$. Капронове волокно за своєю міцністю, еластичністю і стійкістю до стирання перевищує значну кількість природних та синтетичних волокон. Воно стійке до дії лугів, мікроорганізмів, вологи. З нього виробляють товари широкого вжитку - різні трикотажні вироби. З капрону виготовляють також багато деталей для машин – це підшипники, зубчасті передачі, гайки, втулки, стійкі до дії масел. Анідне волокно має таке саме застосування, що й капронове волокно[11].

Капролон (поліамід 6 блочний) має значно вищу термостійкість і хімічну стійкість, стійкість до багаторазових деформацій і стирання, ніж капронове волокно. Тому із капролону виготовляють втулки, зубчасті передачі, ричаги, деталі насосів та турбін [11].

1.5. Вибір методу дослідження кавітаційно-ерозійного зношування полімерних матеріалів

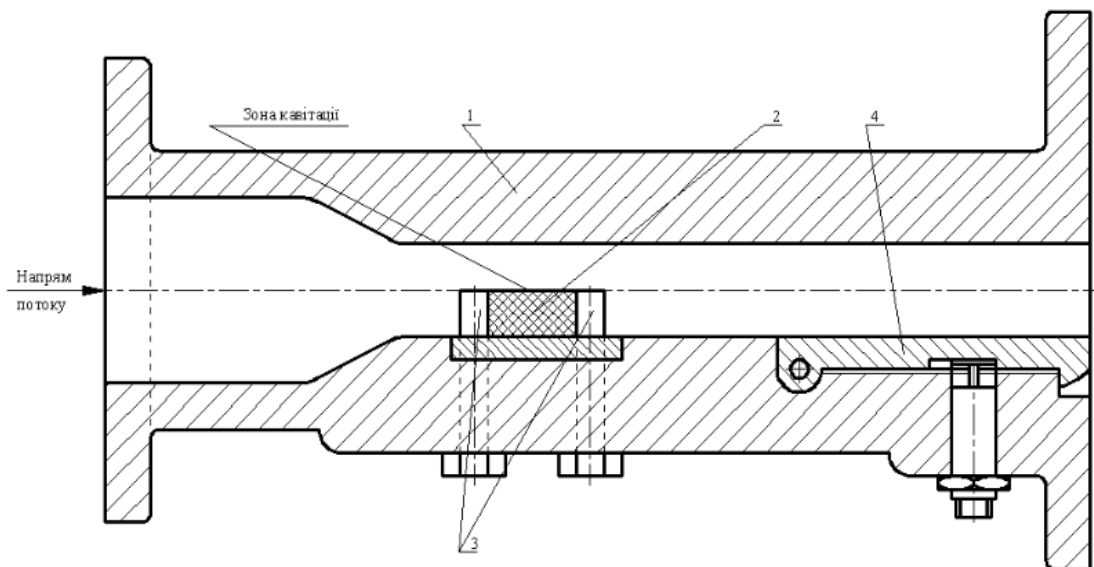
На сьогоднішній час відомо безліч методів дослідження кавітаційної стійкості матеріалів, але найбільшої популярності набули тільки чотири методи вивчення кавітації та наслідків її дії на матеріал:

- а) Дослідження в кавітаційних трубах або дифузорах;
- б) Удар струменя або краплі;
- в) Метод ударних хвиль;
- г) Метод Гейнеса;

Приведемо коротку характеристику цих методів.

а) Досліди в дифузорах з великою висотою напору (до 350 м) застосовувалися починаючи з 1932 р. Шретером. Шретер сконструював дифузор (Рис. 1.2), у якому за допомогою простого пристосування - висуванням гвинта можна було змінювати перетин потоку в самому дифузорі. Це давало можливість створювати численні кавітаційні бульбашки, які з потоком рідини протікали над закріпленим у трубі зразком з випробовуваного матеріалу. За зразком перебував дросель, що створював

протитиск, регулював випуск води із приладу. За допомогою такого дроселя можна було за бажанням змінювати розподіл тиску в трубі й тим самим переміщати усередині труби область конденсації кавітаційних бульбашок. Дослідження показали, що руйнування поверхні зразка завжди спостерігалось в зоні скупчення кавітаційних бульбашок, тобто там, де вони замикаються, а не в тім місці, де вони зароджуються (де тиск мінімальний). Гвинт, що викликав кавітацію й перебував увесь час у зоні знижених тисків, ніколи ніяких ушкоджень не зазнавав. Хансейкер, проводячи дослідження, у кавітаційній трубі при допомозі цейтлупи виявив періодичний характер кавітації. Він спостерігав виникнення, наростання й ослаблення кавітації, причому увесь цей цикл займав тисячні частки секунди. Що стосується зовнішнього вигляду зразків, ушкоджених у дифузорах або в кавітаційних трубах, то їх поверхня нагадувала мішень при неточній стрільбі: спочатку з'являються кілька розкиданих влучень, а потім поверхня була вкрита слідами від кавітаційних ударів. Значущість ушкоджень, що виникають від кавітаційних ударів, зручно оцінювати по втраті ваги зразка, який піддавався кавітаційному впливу.



1.2. Методика дослідження кавітаційно-ерозійної стійкості матеріалів в гідродинамічній трубі:

- 1 – корпус;
- 2 – зразок;

3 – регулюючі гвинти;

4 – дросель.

б) Такі ж висновки були отримані й у дослідах зі струменем води, спрямованої на метал. Зразок закріплювався у вигляді стрижня на ободі колеса, що приводилося у швидке обертання. Вузький струмінь води направлявся перпендикулярно площині колеса. При кожному обороті зразок перетинав струмінь. При відносній швидкості струменя й зразка в 200 м/сек і діаметрі струменя в 1,5 мм на найбільш твердих матеріалах було виявлено характерну ерозію, подібну з ушкодженнями при кавітації.

в) Аккерет і Галлер досліджували руйнування металів ударними хвилями. Прилад являв собою товстостінний сталевий циліндр, що сходиться внизу на конус і заповнений водою. У циліндрі перебував поршень, що щільно прилягав до поверхні води. Спеціальне пристосування вдаряло по поршні 16 разів у секунду. В основі конуса розташовувався досліджуваний зразок або п'єзокварц для виміру тиску. Вода в циліндрі перебувала під тиском в 7 МПа, що на думку авторів, усувало можливість виникнення кавітації. При кожному ударі по поршні ударна хвиля передавалася через рідину до зразка і через 10—12 год роботи, тобто після 60 000 ударів такого “гідравлічного молотка” виявлялися ушкодження подібні з кавітаційними.

П'єзокварц у цих дослідах зареєстрував порівняно невеликі тиски, саме такі, які повинні виникати при гідравлічному ударі.

Мікроскопічне дослідження чавунного зразка, випробуваного у цьому приладі, показало, що вкраплення графіту розміром 0,001 мм вибивалися з поверхні після декількох тисяч ударів. Але для вибивання зерен графіту не потрібні високі тиски - тиски, що розвиваються в приладі при гідравлічному ударі, але цілком достатні для вибивання зерен графіту. Імовірно, після того як утворяться мікроскопічні тріщини на “слабких місцях” поверхні, подальші ушкодження поверхні полегшуються: вода в поглибленнях працює як клин.

Досліди з іншими металами поставлені в цьому приладі, дають не настільки ясну картину як ушкодження чавуну.

г) Особливо зручний для вивчення чисто фізичних особливостей кавітації та руйнування матеріалів при мікроударному навантаженні, є метод Гейнеса. Тривалість досліду невелика. Прилад вимагає невеликої кількості води й незначної потужності, дозволяючи в той же час легко фотографувати весь процес у цілому і стежити за поведінкою кавітаційної хмарки. Перехід від однієї рідини до іншої здійснюється досить просто. Залежність процесу кавітаційного зношування від температури, тиску може бути вивчена без особливих труднощів.

Нарешті, він дозволяє порівнювати картину утворення кавітаційних бульбашок біля поверхні зразка з характером ушкоджень поверхні. Все це послужило причиною того, що останнім часом метод Гейнеса знайшов широке застосування для дослідження кавітаційних процесів.

За даним методом кавітація в рідині виникає під дією ультразвукової хвилі, хвиля в свою чергу синтезується за допомогою магнітострикційного вібратора та генератора (Рис.1.3.). Генератор 1 синтезує та збуджує коливання частотою 17 – 30 кГц в котушці 2, яка в свою чергу передає коливання з відповідною частотою на коливальний контур 3. За допомогою концентратора 4 коливання концентруються та передаються робочому середовищу, в якому і виникає кавітація. Досліджуваний зразок 5 розміщується в ємності 6, яка заповнюється рідиною. Змієвиковий охолоджуючий контур служить для відбору теплової енергії з розчину.

Виходячи з переваг методу Гейнеса, над іншими методами дослідження кавітаційної стійкості матеріалів, то даний метод і був застосований в даній роботі.

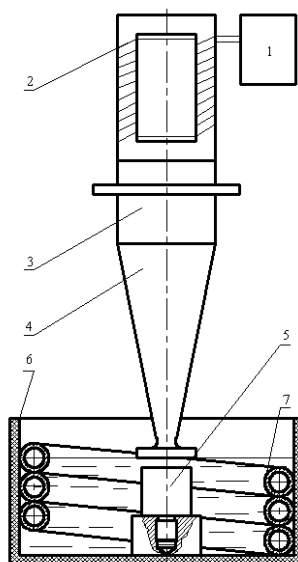


Рис.1.3. Принципіальна схема установки МСВ для дослідження матеріалів при кавітаційно-ерозійному зношуванні: 1 – генератор; 2 – котушка; 3 - коливальний контур; 4 – концентратор; 5 – зразок; 6 – ємність для розчину; 7 – охолоджувальний контур.

1.6. Висновки і задачі дослідження

В літературі майже відсутні дані про кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерів та покриттів на їх основі в середовищах харчових виробництв. Наявні дані про кавітаційну зносостійкість відносяться, в основному, до машинобудування, суднобудування, приладобудування тощо. Виходячи з цього в роботі поставлені наступні задачі:

- на основі літературних даних проаналізувати кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерних матеріалів;
- освоїти методику і лабораторне обладнання для проведення досліджень на кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерних матеріалів та обладнання для нанесення полімерних покриттів;
- знайти показники кавітаційно-ерозійної зносостійкості полімерів класу поліолефінів (поліпропілен середнього та низького тисів), фторопластів (Ф4 та Ф3) в нейтральних середовищах;
- знайти показники кавітаційно-ерозійної зносостійкості нанесених на сталь 45 полімерних покриттів;

- систематизувати отримані дані про зносостійкість різних видів покриттів на основі полімерних матеріалів;
- провести порівняльний аналіз кавітаційно-ерозійної зносостійкості полімерів та полімерних покриттів в нейтральних середовищах.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ СЕРЕДОВИЩА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Експериментальна установка і методика проведення досліджень полімерних матеріалів

Серед великої кількості установок, методів для дослідження матеріалів при їх кавітаційному руйнуванні, було вибрано метод Гейнеса (базуючись на його суттєвих перевагах перед іншими методами), а за лабораторну установку було прийнято установку на базі УЗДН, установка УЗДН-А характеризується низькою потужністю, що дає змогу якнайближче наблизити наші досліди до реальних умов. Характеристики установки приведені в таблиці 2.1, а загальний вигляд на рис.2.1.

Таблиця 2.1-

Характеристика установки УЗДН – А

Робоча частота генератора, кГц	Максимальна потужність генератора, Вт	Подвійна амплітуда коливання концентратора, мкм
22 ± 1,65	130	22...65



Рис.2.1. Загальний вигляд установки УЗДН-А для проведення кавітаційно-ерозійних випробувань

Будова та робота диспергатора УЗДН – А полягають в тому, що електричні коливання частотою 22кГц, які генеруються транзисторним генератором блоку живлення, перетворюються п'єзострикційним перетворювачем випромінювача в механічні пружні коливання з відповідною частотою, які діють на дисперговане середовище.

Диспергатор УЗДН – А виготовлений у вигляді настільної установки і конструктивно являє собою стійку, в якій розміщені блок живлення і шумозахисна камера, стінки і дверцята якої армовані звукоізоляційним матеріалом. На вертикальній стінці в середині камери закріплено штатив для установки і переміщення робочого випромінювача.

Концентратор випромінювача має вихід під різьбу, яка дозволяє встановлювати на нього насадки різної конструкції, якими комплектується диспергатор.

На диспергатор встановлено таймер, який дозволяє автоматично витримувати час диспергування.

Будова випромінювача. Диспергатор комплектується ультразвуковим випромінювачем, який використовується для перетворення електричних коливань генератора в механічні пружні коливання і передачі їх диспергованому середовищу.

Випромінювач складається з поляризованих п'єзоелектричних елементів 1 (двох кілець п'єзокераміки), встановлених додатними сторонами один відносно іншого, які і змінюють свої геометричні розміри з частотою прикладеного до них електричного поля; плоскої пластини – контакту 2, розташованої між п'єзоелектричними елементами; концентратора 3; масивного сталюого хвостовика 4. Всі ці елементи конструкції через пружинну шайбу 6 стягнуті болтом 5 і встановлено в корпус 7 з вертикальними вентиляційними отворами знизу і зверху. Корпус закріплено гвинтами на концентраторі. На корпусі за допомогою гвинтів 8 встановлюється захисна кришка 9. Кабель живлення 11, виведено через отвір в корпусі, закріплений накладкою 12 (для виключення його вільного переміщення в середині корпусу і обриву кінців в місцях пайки) і закінчується клемами 13 для з'єднання випромінювача та блоку живлення.

На задній стінці корпусу встановлено штир 10 для закріплення випромінювача в гнізді тримача штативу (Рис.2.2,а).

Концентратор випромінювача закінчується виходом під різьбу М6 14 для закріплення на ньому робочих насадок різної форми. Диспергатор комплектується двома видами насадок – конічної та трубчастої форми.

Для проведення дослідів по руйнуванню полімерних матеріалів при мікроударних навантаженнях використовуємо насадку конічної форми яка виготовлена із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т (рис.2.2,б).

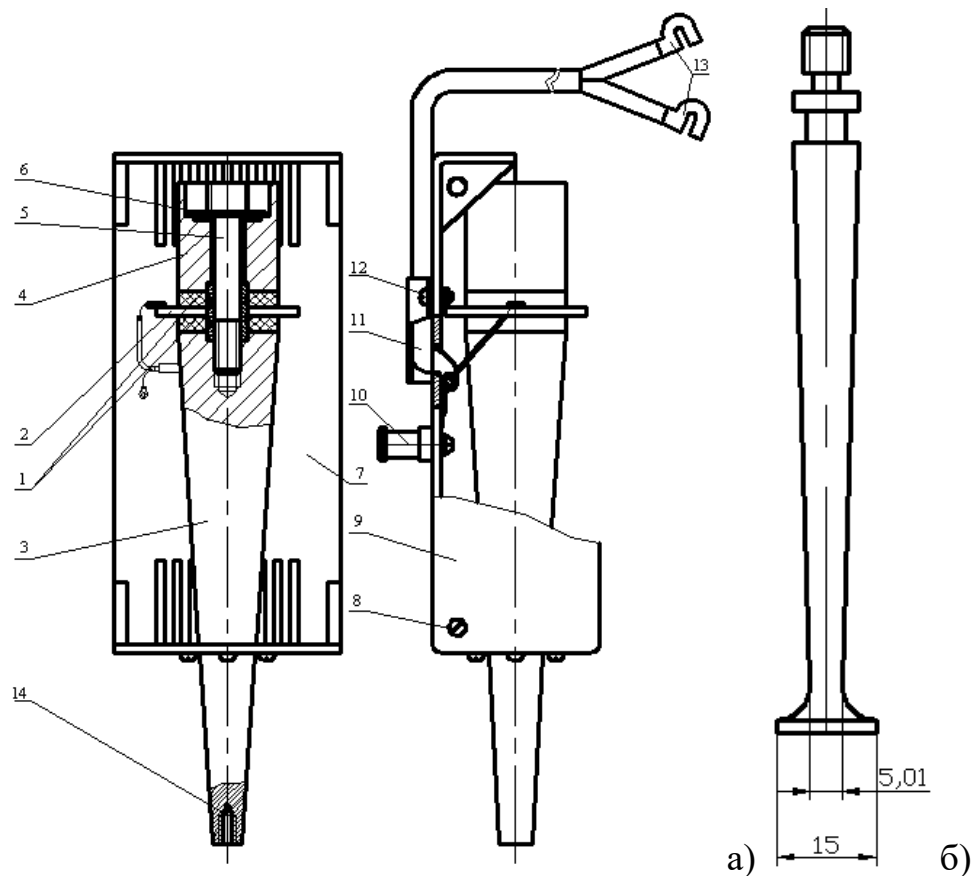


Рис. 2.2. Будова випромінювача установки УЗДН-А: а) конструкція концентратора: 1 – п'єзокерамічні кільця; 2 – пластина-контакт; 3 – концентратор; 4 – хвостовик; 5 – болт; 6 – шайба; 7 – корпус; 8 – гвинти; 9 – захисна кришка; 10 – штир; 11 – кабель живлення; 12 – накладка; 13 – клеми; 14 – різьба для закріплення робочих насадок; б) конічна насадка.

На базі установки УЗДН-А, та взявши за базову методику для проведення дослідження стійкості металів при мікроударних навантаженнях, було сконструйовано методику проведення досліджень полімерних матеріалів.

Для виключення температурного чинника руйнування сконструйована і виготовлена установка з магнітострикційним вібратором (МСВ). Ультразвукові коливання збуджуються ультразвуковим генератором УЗДН-А потужністю 150 Вт, частотою коливань 22кГц і амплітудою 48 – 53 мкм. Коливання підсилюються в осьовому напрямку (рис.2.2., а)

Для розширення можливостей установки ємність 1 для робочих середовищ і вузол кріплення зразків 2 виготовлено з фторопласту. У ємність

встановлено два спіральні охолоджувальні контури 3 і 4. Перший контур 3 забезпечує термостатування всього об'єму середовища, а другий 4 підтримує стабільність середньої температури робочого середовища безпосередньо в зоні кавітації. Для підвищення ефективності охолодження зони кавітації експериментальним шляхом підбрано віддаль між витками охолоджувального контура 4, який виявився в межах 4...5 мм. Такий крок витків забезпечує вільне переміщення різнонагрітих об'ємів робочого середовища між витками контура у різних фазах ударних і відбивних кавітаційних хвиль. Різнонаправленість витків охолоджувальних контурів забезпечує протік потоків охолоджувальної і нагрітої рідини і збільшує ефективність охолодження всього об'єму середовища. Крім того, при русі вібратора вниз робоче середовище внаслідок стискання витків контура 3, відтискується із зони кавітації, а стискання витків контура 4 забезпечує протилежний напрям руху середовища і таким чином здійснюється зустрічний рух потоків, збільшується коефіцієнт теплообміну і ефективність вирівнювання температури середовища.

Для перевірки ефективності роботи установки вимірювали приповерхневу температуру зразків 6 хром-копелевою термопарою 7, яка розміщувалася на віддалі 0,6...1 мм від робочої поверхні зразка (рис.2.3, б). Термопара фіксується і герметизується в отворі гумовою втулкою 8 і одночасно запобігає відриву контакту термопари 9 від поверхні зразка 6. Термопара під'єднується до приладу для вимірювання температури [23].

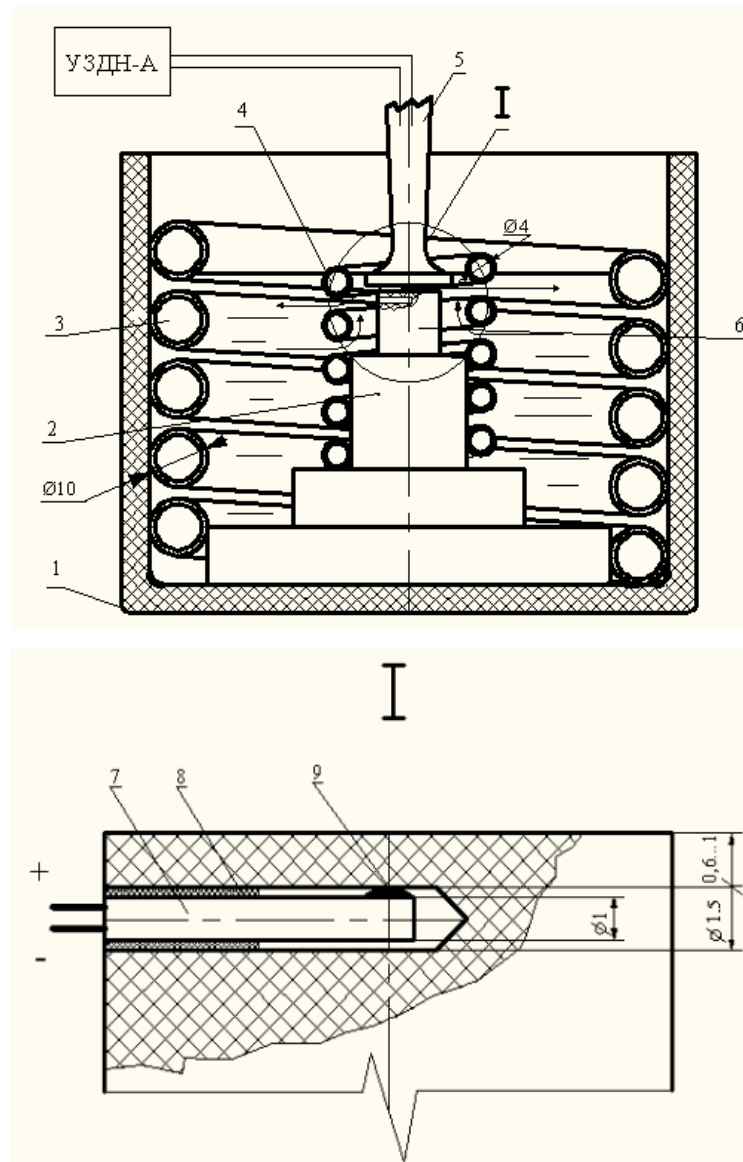


Рис.2.3. Установка для проведения досліджень полімерних матеріалів при мікроударних навантаженнях: 1 – ємність; 2 – вузол кріплення зразка; 3 – зовнішній охолоджуючий контур; 4 – внутрішній охолоджуючий контур; 5 – концентратор; 6 – зразок; 7 – термопара; 8 - гумова втулка; 9 – контакт термопари і зразка.

2.2. Зразки для нанесення і дослідження полімерних покриттів на металевій основі

Зразки для дослідів $\varnothing 11,3$ (робоча поверхня зразка) виготовлялися на токарному верстаті з одного прута окремого виду полімеру з отворами під хром – копелеву термопару, за допомогою якої контролювали температуру у приповерхневій зоні впродовж всього досліду (рис.2.4) [23]. Термопара

розміщувалась та фіксувалась у зразку за допомогою гумового фіксатора. Гумовий фіксатор в свою чергу виконував роль як і фіксатора, так і запобігав попаданню рідини у зону вимірювання. Термопара під'єднувалась до приладу контролю температури.

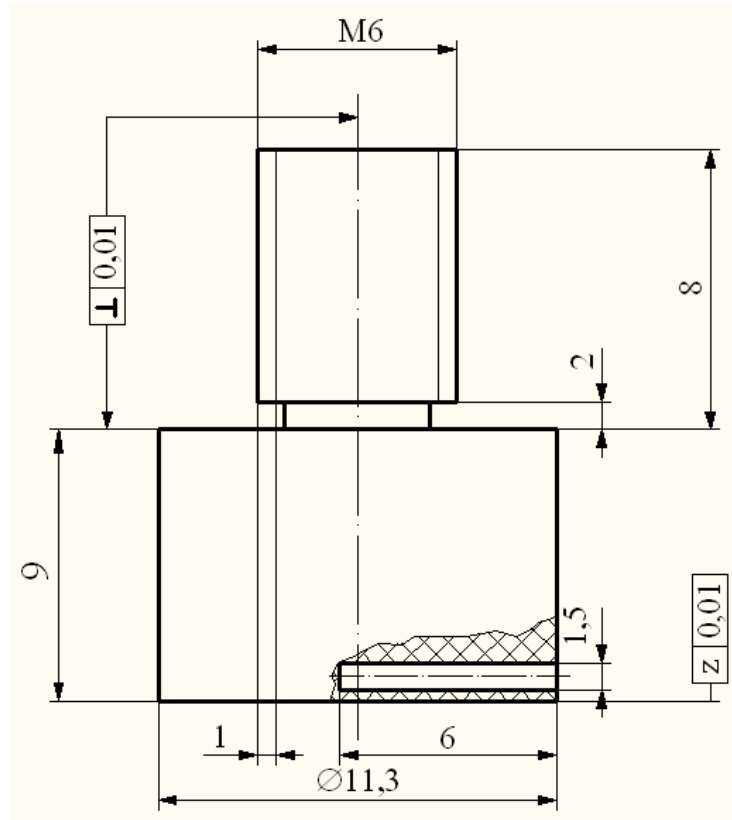


Рис.2.3. Зразок для проведення досліджень

2.3. Спосіб та установка для нанесення полімерних покриттів на металічні поверхні

Існує безліч способів нанесення полімерних покриттів, але всі вони засновані на здатності полімерних порошків перетворюватися в аерозолі. Осадження аерозолу на твердій поверхні здійснюється шляхом контактування з нагрітою поверхнею, конденсацією аерозолу на холодній поверхні, електризацією аерозольних часток шляхом надання їм протилежного за знаком заряду на відміну від поверхні.

Існують наступні способи нанесення: у псевдозрідженому киплячому шарі, в електростатичному полі високої напруги, струменеве напилювання. Кожний із цих способів має свої характерні риси й умови застосування.

З усіх вище перелічених способів нанесення полімерних покриттів найефективнішим, є спосіб нанесення порошкових полімерних покриттів в електричному полі високої напруги. Перевагами даного способу над іншими є можливість одержання рівномірних по товщині покриттів на об'єктах складної конфігурації й виключення їхнього попереднього нагрівання, а також висока продуктивність процесу. Принцип такого нанесення базується на електроаерозольній технології, сутність якої полягає в електризації часток порошку і їхній взаємодії з електричним полем високої напруги, у результаті якого вони рухаються по силових лініях поля й осаджуються на протилежно зарядженій оброблюваній поверхні.

Нанесення порошкових матеріалів в електростатичному полі високої напруги, у нашій роботі, здійснюється за допомогою іонізованого псевдорозрідженого шару, який закладено в нижче описану установку.

Особливість нанесення порошкових полімерних покриттів в іонізованому псевдозрідженому шарі полягає в наступному: у ванні (робочій камері) вібровихровим методом створюється киплячий шар, що знаходиться під впливом коронного розряду електричного поля високої напруги. У зоні корони відбувається іонізація повітря з передачею електричного заряду аерозольним часткам. При зануренні в киплячий шар заземленого холодного зразка на його поверхню під дією електростатичних сил рівномірно осідають негативно заряджені частки полімеру. Якщо ж об'єкт має складнішу конфігурацію чим зразок, то у ванні розміщують додаткові електроди. У всіх випадках відстань між електродами повинне бути не менш 50 мм, між об'єктом і найближчим електродом - не менш 200 мм.

Іонна абсорбція в полі коронного розряду - це найбільш ефективний спосіб зарядки полімерних часток.

На Рис. 2.3 показана схема установки для нанесення порошків в іонізованому псевдозрідженому шарі.

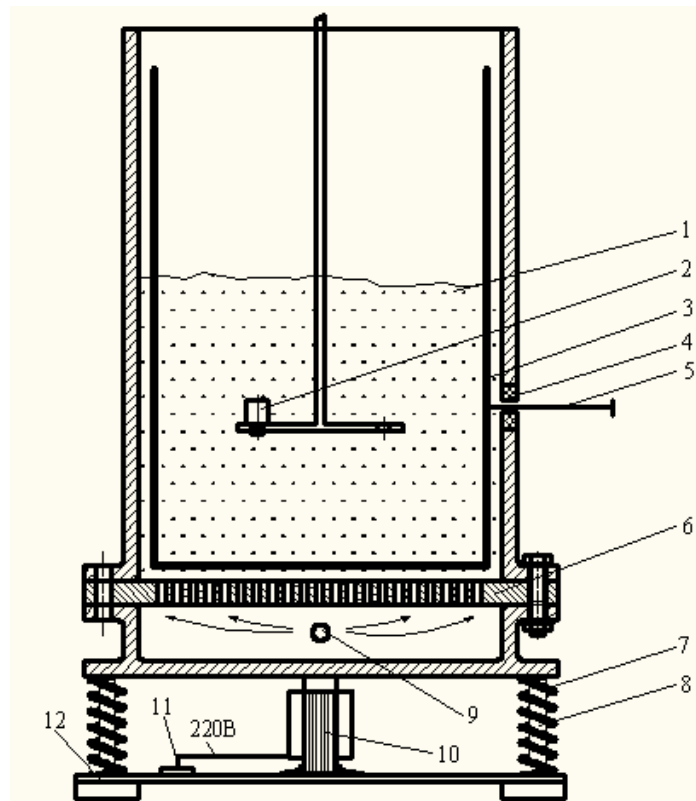


Рис.2.4. Установка для нанесення полімерних покриттів на металічні поверхні в іонізованому псевдо зрідженому стані: 1 – псевдозріджений шар; 2 – зразок; 3 – електрод; 4 – прохідний ізолятор; 5 – шина високої напруги; 6 – пориста перегородка; 7 – пружина; 8 – направляюча; 9 – отвір для подачі повітря; 10 – електровібратор; 11 – клемник; 12 – станина.

2. 4. Матеріали для проведення досліджень

Пластичні маси знаходять широке застосування в галузях машинобудування для виготовлення різноманітних деталей: підшипників, втулок, вкладишів, шківів, маточин, кожухів, кришок, гальмових колодок і т.д.

З розширенням масштабів науково-дослідних, конструкторських й експериментальних робіт, а також зі збільшенням обсягу випуску

існуючих й освоєння виробництва нових видів пластмас області застосування таких деталей будуть систематично розширюватися [11].

Вибір певної пластмаси залежить в остаточному підсумку від розмірів деталей, навантажень й інших умов її роботи. Тому вибір пластмаси треба здійснювати на основі ретельного аналізу конкретних умов роботи деталі.

У табл. 2.1 показані деталі й вузли машин, які виготовляються або можуть бути виготовлені з певних видів пластмас.

Номенклатура таких деталей досить велика і в одній таблиці неможливо дати докладно їхню класифікацію і охопити всі області застосування пластмас у машинобудуванні. У таблиці подано лише в збільшеному виді, поєднуючи часом в одній графі подібні тільки по окремих ознаках вузли й деталі, показані загальні для галузей машинобудування напрямки використання пластмас.

Вибір певної пластмаси залежить в остаточному підсумку від розмірів деталі, навантажень й інших умов її роботи. Тому вибір пластмаси треба здійснювати на основі ретельного аналізу конкретних умов роботи деталі, а таблицею користуватися тільки для первісного орієнтування [11].

У всіх випадках застосування пластмас зменшує вага конструкцій, заощаджує чорні й кольорові метали, скорочує трудомісткість і строки виготовлення деталей, технологічного оснащення та у більшості випадків знижує собівартість виготовлення машин і поліпшує експлуатаційні фактори (скорочує зношування деталей, збільшує к. п. буд. і міжремонтні терміни служби і т.д.). Трудомісткість виготовлення деталей із пластмас у порівнянні з металевими скорочується в середньому в 3-8 разів, а кількість технологічних операцій – в 5-10 разів.

Опираючись на дані розділу 1, а також на роботи [4, 5, 10] для дослідження були вибрані наступні матеріали:

- **Поліолефіни:** поліпропілен низького (ПНТ) і середнього (ПСТ) тисків;
- **Фторопласти:** фторопласти Ф3 та Ф4.

Таблиця 2.1-

Застосування деяких видів полімерних матеріалів для виготовлення деталей та вузлів технологічного обладнання

Деталі, вузли машин та технологічна оснастка	Термопласти						Реактопласти	
	Поліаміди	Поліолефіни	Фторопласти	Полівінілхлориди		Поліакрилати	Фенопласти	Ебоніт
				Жорсткі	Пластифіковані			
Робочі органи центр обіжних насосів, вентиляторів, гідротурбін	+	+		+			+	+
Труби, пробки, вентилі і другі деталі масляних і водяних систем	+	+	+		+	+		
Гідроциліндри, деталі гідросистем	+			+				
Антикорозійні покриття металічних поверхонь	+	+	+		+		+	
Зносостійкі покриття металічних поверхонь	+		+	+	+		+	

РОЗДІЛ 3

РУЙНУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В РІДКИХ СЕРЕДОВИЩАХ

3.1. Огляд існуючих теорій кавітаційно-ерозійного руйнування поверхонь металів і полімерів

Існуючі на сьогодні різні припущення про механізми руйнування поверхонь при мікроударному навантаженні в рідких корозійно–активних середовищах, зокрема і при кавітаційно–ерозійному мікроударному навантаженні, виходять з різних гіпотез, що базуються на одному із чисельних факторів руйнування. Усі, на сьогодні існуючі, гіпотези можуть бути розділені на чотири групи [24]: засновані на теорії гідродинамічного впливу [25], електрохімічної теорії кавітаційної ерозії [26,27], теорії миттєвих хімічних реакцій [28,29] і термодинамічної теорії кавітаційної ерозії [29].

Автори робіт розглядають процеси зношування поверхонь металів і їх сплавів з позиції фізико–хімічної механіки руйнування. Загальні втрати розглядаються як сума втрат від дії механічного і корозійного факторів руйнування ($V_{заг} = V_{мех} + V_{кор}$), але при цьому кавітаційне руйнування є складним процесом в якому електрохімічне (анодне) розчинення мікрооб'ємів металу понижує поверхневі бар'єри, які гальмують вихід дислокацій на поверхню. В місцях виходу дислокацій виникають активно діючі мікрогальванопари, що активно посилюють анодне розчинення металу в цих місцях. Останнє сприяє полегшенню втомного руйнування поверхонь, які в цих місцях і є центрами початку зародження і розширення процесів руйнування. Таким чином, електрохімічне розчинення служить каталізатором втомного руйнування. Кавітація, в свою чергу, активізує протікання електрохімічних процесів. Вклад корозії в загальні втрати маси або об'єму металу поверхні при кавітації в корозійно–активних середовищах за даними різних авторів дуже відрізняються між собою. Так, за даними роботи [30], доля корозійних втрат маси сталі 12X18H10T в 1N розчині

сірчаної кислоти доходила до 65% при амплітуді коливань вібратора 7мкм і до 60% при амплітуді 20 мкм. В наших дослідах [31] при кавітації зразків із сталі 45 в жорсткій воді і 3% - му розчині натрій хлориду при амплітудах коливання вібратора від 5 до 40 мкм з частотою 22 кГц корозійні втрати становили від 15 до 4% в жорсткій воді і від 34 до 6,7% в розчині натрій хлориду.

Власне значний вплив корозійної складової середовища на інтенсивність загального руйнування при корозійно–механічному зношуванні металів і зумовив інтерес дослідників та практиків до заміни металів полімерними матеріалами і пластмасами, які є інертними по відношенню до більшості корозійно–активних середовищ [32]. Крім того, створюються пластмаси зі спеціальними властивостями: кислотостійкі, лужностійкі, термостійкі, жароміцні тощо.

Величезна кількість видів, типів пластмас, що мають різноманітні, часто взаємопротилежні властивості, затрудняє процес вибору виду пластмаси залежно від умов їх експлуатації. На сьогоднішній день встановилася єдина точка зору, що визначальним фактором при виборі термопластичних полімерів є їх теплове навантаження, зокрема, при терті і кавітації. Аналіз досліджень і публікацій показав, що відома значна кількість робіт [33] в яких показано, що під впливом температури, яка розвивається на фрикційному контакті змінюються фізико– механічні властивості полімерів [33,34], що приводить до зміни механохімії протікання процесів і, як наслідок, інтенсивності зношування. Крім того, полімери мають значно нижчі теплофізичні характеристики порівняно з металами і тепла енергія не розсіюється в навколишнє середовище, а концентрується в приповерхових шарах. Тому навіть незначне підвищення температури може привести до катастрофічного зношування [33,34]. Аналогічних робіт направлених на вивчення впливу на інтенсивність кавітаційно-ерозійного руйнування поверхонь полімерних матеріалів від температури в зоні кавітації нами не виявлено. Є невелика кількість досліджень [32,33,34], де вивчався вплив

температури середовищ на інтенсивність руйнування. Між тим стверджується [29], що при детонації кавітаційних бульбашок розвиваються температури до 3000 °С.

3.2. Вплив механічних та теплофізичних характеристик полімерів на інтенсивність їх кавітаційно-ерозійного зношування в нейтральних середовищах

Отримані результати інтенсивності зношування (рис.3.1), механічні та деякі теплофізичні характеристики досліджених полімерів приведені в табл.3.1.

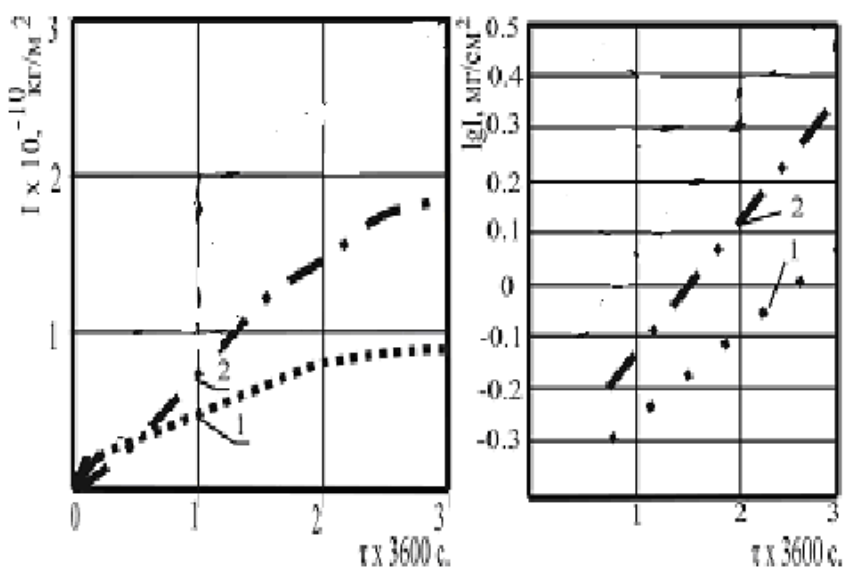


Рис.3.1. Кінетика руйнування полімерів в 3% - му розчині натрій хлориду: 1 – поліпропілен (ПНТ); 2 – фторопласт Ф3

Як видно з (рис.3.1) найнижчу інтенсивність руйнування показали зразки з поліпропілену. Так, за 3 год мікроударного навантаження в 3% - му розчині натрій хлориду, інтенсивність руйнування поліпропілену (по масі) становила $0,86 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2$, а фторопласту $1,7 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2$, що приблизно в 2 рази менше. Крім того, для фторопласту спостерігається зміна їх кривизни,

приблизно після 1,5 год, а для поліпропілену через 2 год, швидкість втрати маси зменшується і стабілізується в часі.

Очевидно, що в першому наближенні, такі дані можна пояснити різницею механічних і теплофізичних характеристик досліджуваних полімерних матеріалів. Фторопласт порівняно з поліпропіленом має значно вищі показники питомої ударної в'язкості α_H , модуля пружності E , границі витривалості при симетричному циклі навантажень σ_{-1} (табл.3.1). Разом з тим, незважаючи на значно вищі механічні показники міцності σ_{-1}, σ_T, E фторопласту Ф3 порівняно з поліпропіленом, останній має вищу зносостійкість (криві 1 і 2 на рис.3.1).

Таблиця 3.1

Інтенсивність зношування, механічні та теплофізичні характеристики полімерів

Полімер	Втрати маси за час. мг/см ²			Густина, ρ , кг/см ³ x10 ³	Питома ударна в'язкість α_H , н·м/м ² x 10 ³	σ_T , МПа	σ_{-1} , МПа	E , МПа	λ_t , Вт/м·год	C , Дж/кг·год	Теплостійкість Віка, °C
	1 год	2 год	3 год								
Фторопласт Ф3	0,6	1,5	1,7	2,2	100	220	180	660	0,7	1,05	210
Поліпропілен (ПНТ)	0,5	0,8	0,9	0,9	200	30	38	930	0,55	1,88	160

Деякі автори [34,35] вказують на можливість втомного механізму руйнування полімерних матеріалів, але порівняння значень σ_{-1} для фторопласту і поліпропілену (180 і 38 МПа) та показників інтенсивності їх

руйнування (рис.3.1) вказують на протилежні результати. Таким чином, механічні характеристики полімерних матеріалів ($a_H, \sigma_T, \sigma_{-1}, E$), отриманих без врахування впливу середовища, характеру і виду навантаження, не можуть однозначно визначати зносостійкість полімерних матеріалів при кавітації.

Механічні характеристики полімерних матеріалів, як відомо, у великій мірі визначаються впливом середовища і особливо впливом температури робочої поверхні [32,34]. Перебування полімерів у різних середовищах супроводжується їх поглинанням, а в деяких випадках і вимиванням окремих наповнювачів або компонентів матеріалу, що приводить до виникнення в ньому внутрішніх напружень. При сумісній дії температури, середовища і зовнішнього навантаження процеси набухання, розтріскування, падіння механічних характеристик різко інтенсифікуються [33,35]. Разом з тим, аналіз теплофізичних характеристик полімерів (табл.3.1) і їх зносостійкості (рис.3.1, а) також не дає однозначної відповіді на причини різної інтенсивності кавітаційно – ерозійного руйнування полімерів. Для більшої наочності результати досліджень представлені на (рис. 3.1,б) в напівлогарифмічній шкалі координат $\lg I - \tau$.

Аналіз отриманих графічних залежностей вказує на те, що при прийнятих нами режимах проведення досліджень на протязі від 1 до 3год, механізм руйнування поверхонь не змінюється (прямі лінії на рис.3.1,б). Найбільше відхилення від прямолінійної залежності має фторопласт, а руйнування поліпропілену (пряма 1 на рис.3.1, б) чітко описуються прямою лінією. На ділянці $\tau = 1-3$ год їх можна описати загальною формулою $I = e^{a\tau}$, де I - інтенсивність зношування, $a = \operatorname{tg} \alpha$ - кут нахилу прямих до осі абсцис і τ - час дії мікроударного навантаження. В результаті обробки експериментальних даних отримали: $I = e^{0,11\tau}$; $I = e^{0,07\tau}$ відповідно для фторопласту та поліпропілену.

Тангенс кута нахилу прямих до осі абсцис характеризує швидкість руйнування поверхні матеріалу. За швидкістю зношування досліджені

матеріали в порядку зростання розміщуються в ряд: поліпропілен, фторопласт. За втратами маси, відповідно: поліпропілен, фторопласт.

Дослідження кінетики зміни температури приповерхневих шарів в процесі кавітації (рис.3.1) показали, що вже через 60 с температура поверхні фторопласту досягає 47°C, через 900 с випробувань - 70°C, а для сталі 45, відповідно, 24 і 38°C. Температура поверхні сталі 45 стабілізується в часі, а для полімерних матеріалів вона невпинно зростає. Останнє пояснюється тим, що теплопровідність λ_T і теплоємність C сталі 45 на порядок вищі за відповідні показники досліджених полімерних матеріалів (табл.3.1). Таким чином, енергія ультразвукових коливань вібратора накопичується в поверхневих шарах полімерів і розсіюється в об'ємі рідини для сталі і сірого чавуну.

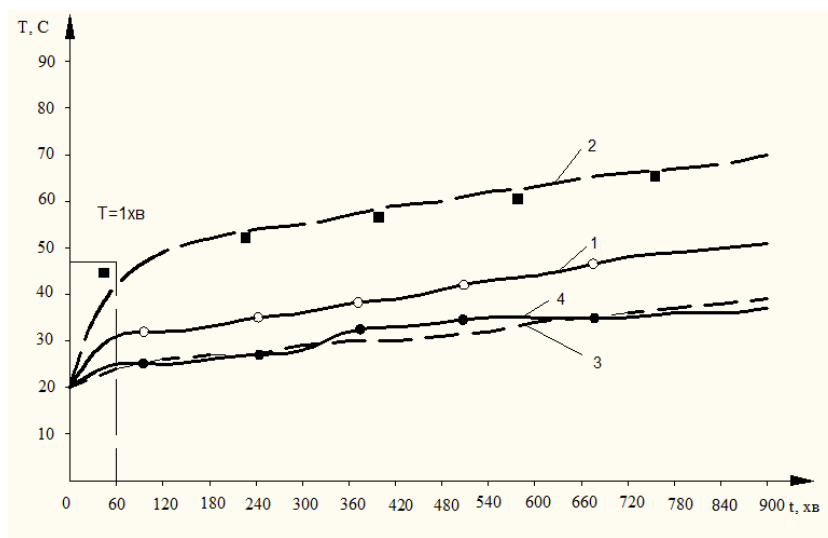


Рис. 3.2. Кінетика зміни температури поверхнь зразків при кавітаційно-ерозійному навантаженні: 1 – поліпропілен; 2 – фторопласт; 3 – сірий чавун; 4 – сталь 45

В загальному випадку, фторопласт має значно вищі механічні характеристики за відповідні характеристики поліпропілену, але пружність і еластичність поліпропілену вищі (табл.3.1). Фторопласт та поліпропілен характеризуються переважним вмістом кристалічної фази. Так для

фторопласту кристалічність досягає 93- 97% [34]. Разом з тим, інтервал переходу з твердого у в'язко - текучий стан у поліпропілену становить 150 – 170°C, а для фторопласту - до 250°C . Крім того, теплофізичні характеристики поліпропілену приводять до розсіювання більшої частини енергії мікроударів в середовище, ніж для фторопласту. Тому на протязі більшого часу мікроударного навантаження фторопласт знаходиться в умовах крихкого руйнування, а поліпропілен в умовах в'язко–текучої пластичної деформації. На сьогодні, такий підхід до оцінки зносостійкості полімерних матеріалів є надто спрощеним і більше відповідає поведінці металічних сплавів. Більше того, деформації кристалічних полімерів поділяють на два типи: зсувні і кавітаційні [34]. Процеси зсуву включають як дифузійні напруження, так і утворення локальних смуг зсуву. Те і інше не супроводжується зменшенням міжмолекулярної когезії і приводить лише до незначного зменшення густини. Процеси кавітації включають утворення крейз, пустот, осередків руйнувань і характеризуються локальним зменшенням міжмолекулярної когезії і, отже, значним локальним зменшенням густини. На робочих поверхнях зразків поліпропілену після 3 год кавітації в 3% - му розчині натрій хлориду виявлено наявність крейз, критична ширина яких знайдена за моделлю Дагдейла, знаходиться у межах $\delta_{кр} = 0,277 \dots 0,373$ мкм.

Процеси утворення смуг зсуву, швидкість їх поширення зростають з підвищенням температури та напружень [34] і описуються рівнянням текучості Ейрінга, яке зв'язує швидкість деформації, напруження, температуру і енергію активації деформаційних об'єктів. Очевидно, що і при кавітації має місце утворення смуг зсуву, але процеси крейзоутворення мають значно більший вплив на процес руйнування полімерних матеріалів, а ніж смуги зсуву.

Згідно кінетичної теорії міцності твердих тіл елементарні факти руйнування – розриву міжатомних зв'язків у твердому тілі, є наслідком теплового руху атомів, які викликають їх енергетичні флуктуації. При цьому

залежність довговічності τ (часу до розриву твердого тіла на частини) залежно від величини діючих напружень і температури визначається формулою С.М.Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{k_T}, \quad (3.1)$$

де k_T - постійна Больцмана; τ_0, U_0, γ - параметри, що визначаються дослідним шляхом.

Ця залежність підтверджена експериментально при випробуваннях на довготривалу міцність і повзучість металів і неметалів [36,37], а також металів при кавітації [28].

Очевидно, що дану залежність можна використати для прогнозування довговічності полімерних матеріалів при їх кавітації в різних середовищах, але при цьому U_0 потрібно замінити на U' - енергію, необхідну для утворення крейзи, або множини крейз у вершині тріщини. Структурно - чутливий коефіцієнт γ очевидно буде визначатися концентрацією напружень, тобто відношенням середнього напруження в полімері до напружень у вершинах крейз $\gamma = \sigma / \sigma_T$, (з врахуванням дії середовища) [37]. В роботі [38] вказується на можливість знаходження γ' на основі аналізу кривих повзучості. Для удароміцного полістиролу $\gamma' = 2,5$, а об'єм активації $V = 8 \text{ нм}^3$ [34]. Дані отримані на повітрі при температурі 20°C в умовах одноосного розтягу. Аналогічні дані $\gamma = \sigma / \sigma_T$ необхідно мати в умовах мікроударного навантаження в різних середовищах.

3.3 Руйнування поліолефінів при мікроударних навантаженнях

Випробування на кавітацію поліпропілену ПНТ в 3%-му розчині хлориду натрію і водопровідній воді показують, що їх зносостійкість в обох середовищах приблизно однакова і становить 1,1 і 1,17 г/см² за 3 години випробувань (рис.3.1).

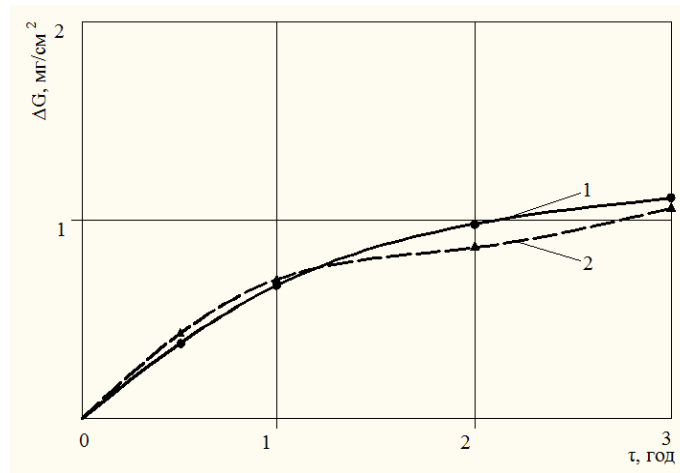


Рис.3.1. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість поліпропілену середнього тиску: 1- 3%-вий NaCl; 2 – водопровідна вода

Кавітаційно-ерозійна зносостійкість поліпропілену низького тиску також практично однакова, але дещо вища за зносостійкість поліпропілену ПСТ. Втрати маси тут знаходяться в межах 0,7...0,85 мг/см². Тобто за втратами маси поліпропілен ПСТ в 1,4 в 1,6 разів має меншу зносостійкість порівняно з поліпропіленом низького тиску. Останнє можна пояснити лише більшим опором кавітаційному руйнуванню кристалічної фази, кількість якої більша в поліпропілені низького тиску.

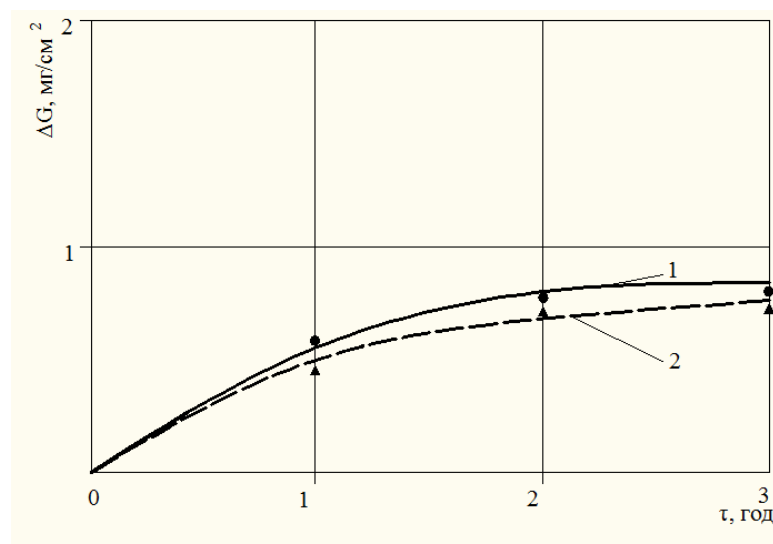


Рис.3.2. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість поліпропілену низького тиску: 1- 3%-вий NaCl; 2 – водопровідна вода

Аналіз кінетики інтенсивності кавітаційного зношування поліпропілену ПСТ (рис.3.3) показав, що вже на початку випробувань ($\tau=0,5$ год.) інтенсивність зношування у водопровідній воді сягає максимуму ($I \approx 0,8$ мг/(см² год)), але в подальшому знижується набагато швидше за інтенсивність зношування поліпропілену в 3%-му розчині NaCl (рис.3.3).

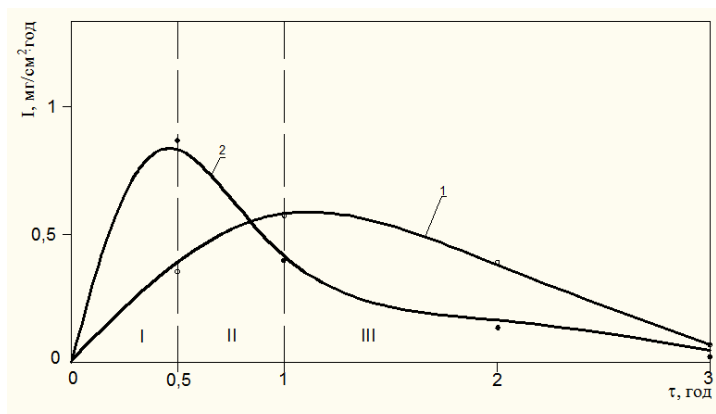


Рис.3.3. Кінетика зміни інтенсивності кавітаційно-ерозійного зношування поліпропілену середнього тиску: 1 3%-вий NaCl; 2 – водопровідна вода

Натомість максимум інтенсивності зношування поліпропілену ПСТ в 3%-му розчині NaCl досягається при $\tau=1 - 1,25$ год і величина максимуму зношування дещо менша ($I \approx 0,6 \dots 0,65$ мг/(см² год)). Така різниця кінетики інтенсивності кавітаційного зношування очевидно зумовлена співвідношенням кристалічної і аморфної структури поліпропілену.

Аналіз кінетики зміни інтенсивності кавітаційно-ерозійного зношування поліпропілену ПНТ в обох середовищах показує ідентичність характеру зміни кривих $I - \tau$ (рис.3.4). Максимум інтенсивності зношування в обох середовищах при $\tau=0,5$ год, але амплітуда максимуму в розчині NaCl приблизно в 2 рази більша за амплітуду зношування у водопровідній воді. Очевидно, що іони хлору мають більш руйнуючий вплив на кристалічну складову поліпропілену, аніж на аморфну структуру поліпропілену середнього тиску.

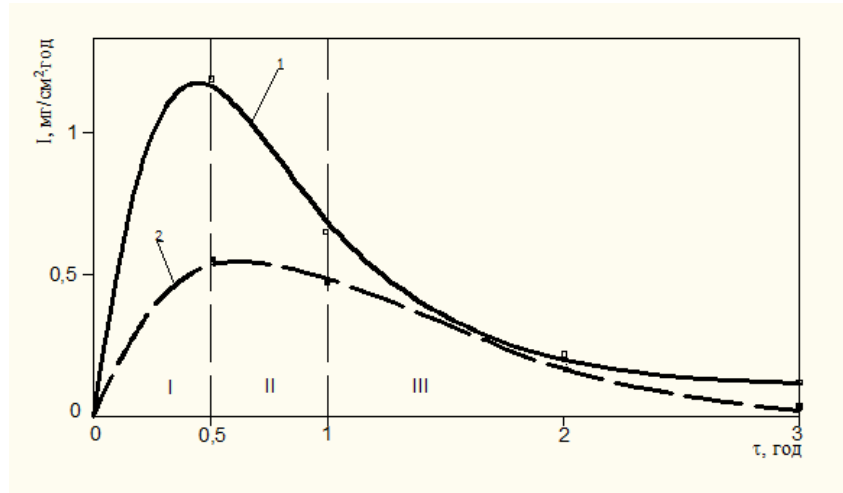


Рис.3.4. Кінетика зміни інтенсивності кавітаційно-ерозійного зношування поліпропілену низького тиску: 1 - 3%-вий NaCl; 2 – водопровідна вода

Аналіз залежності $IgG-\tau$ для поліпропілену середнього тиску (рис.3.5) показує наявність точки перелому прямих при $\tau=2$ год, що дозволяє виділити дві ділянки (I і II), які відрізняються механізмами руйнування. В той же час на кривих $I - \tau$ (рис.3.3, рис.3.4) можна виділити три ділянки, що відрізняються за величиною і інтенсивністю руйнування (I, II і III). На ділянці I інтенсивність руйнування швидко зростає з часом проведення випробування і досягнувши максимуму починає спадати (ділянка II). На ділянці III інтенсивність руйнування найменша і має тенденцію до стабілізації.

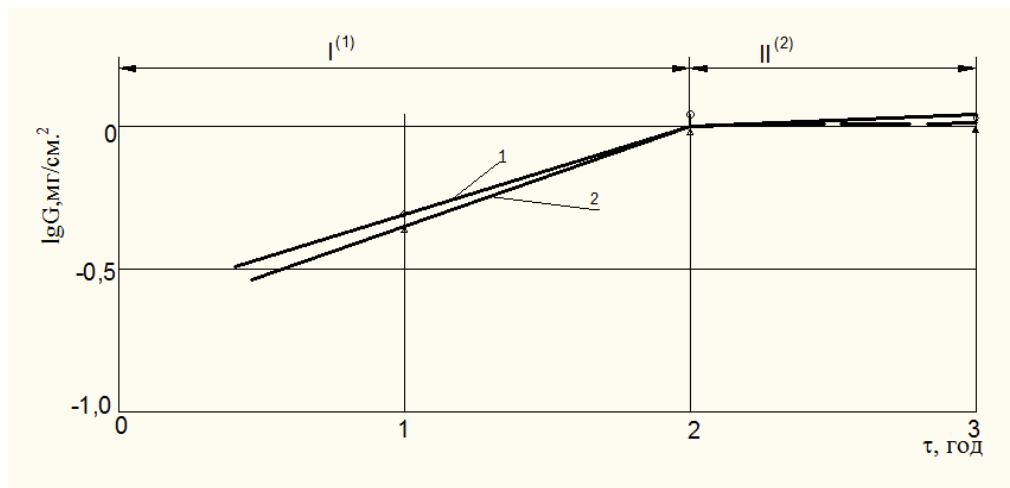


Рис.3.5. Напів'логарифмічні залежності ($\lg G - \tau$) втрат маси від часу кавітації: 1 - 3%-вий розчин NaCl, 2- жорстка вода (поліпропілен середнього тиску)

На відміну від термічної деструкції полімерів у вакуумі [40], де єдиним визначальним чинником є температура, при кавітаційному руйнування полімерів визначальними є спільна дія температури, тиску, механічних навантажень і відповідних напружень (σ, τ), хімічних реакцій структурних складових полімеру і середовища. Знайти вклад кожного з перелічених чинників в загальні втрати маси на даному стані досліджень неможливо. Однак за час I періоду кавітації втрати маси поліпропілену становлять 45...50%, за II – 21-30% і за III – 20-30% від загальної втрати маси. Таким чином, втрати маси поліпропілену за I і II періоди кавітаційного руйнування складають 70...80% від загальних втрат, що відповідає результатам наших досліджень [41] та даним роботи [42].

Механізм руйнування на ділянці I характеризується розривом найбільш слабких хімічних зв'язків зародженням і накопиченням крез, інтенсифікацією проникнення робочого середовища в середину полімеру та хімічних реакцій найбільш слабких ланок структури з середовища. У II періоді руйнування відбувається розрив перенапружених тяжів, а відтік розкриття створом тріщин і їх ріст, а також вимивання розміщених і відокремлених між собою мікрооб'ємів термодеструктизованого матеріалу. Втрати маси в цей період руйнування становлять 21...30%. У III періоді руйнування остаточно розриваються тяжі, а поверхневий шар який відповідає глибині залягання крез майже повністю вимивається ударними кавітаційними хвилями (біля 80%) і навантаження вже починає сприймати наступний шар поверхні. Швидкість втрати маси наближається до нуля [41].

Таким чином, співставивши залежності $I - \tau$ (рис.3.3) і $\lg G - \tau$ (рис.3.5) можна прийти до висновку, що на ділянках I і II діє перший механізм

руйнування поліпропілену середнього тиску. А на ділянці III – другий механізм руйнування поверхні.

Для поліпропілену низького тиску залежності $\lg G - \tau$ (рис.3.6) також вказують на наявність двох механізмів зношування його поверхні за повний цикл руйнування. Крім того наявність іонів хлору в розчині збільшує втрати маси і знижує час дії першого механізму руйнування поверхні полімеру.

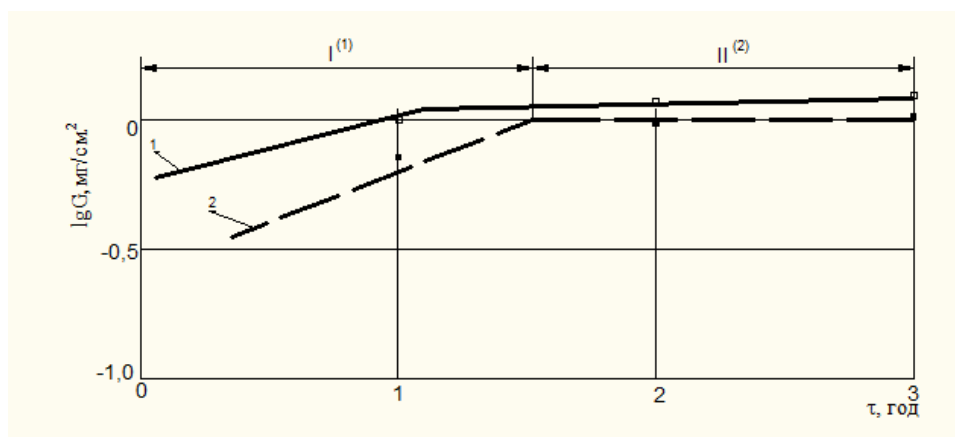


Рис.3.6. Напів'логарифмічні залежності ($\lg G - \tau$) втрат маси від часу кавітації: 1 - 3%-вий розчин NaCl, 2- жорстка вода (поліпропілен низького тиску)

Аналіз залежностей $\lg G - \tau$ (Рис.3.5) показує ідентичність характеру їх зміни по відношенню до кривих $I - \tau$. Наявність такого ж перелому, є також ознакою зміни механізму руйнування приповерхневих шарів полімерів. Останнє може бути свідченням можливості застосування для аналізу кінетики руйнування полімерів, кінетичної теорії руйнування полімерів С.М.Журкова. Основним чинником, що визначає процес руйнування, є тепловий рух, який приводить до теплових флуктуацій кінетичної енергії атомів, а відтак і до розриву хімічних зв'язків макромолекул полімеру. Отримані нами в роботі [43] експоненціальні залежності виду $G = e^{a\tau}$, в тому числі і для поліпропілену, також підтверджують можливість використання теорії руйнування С.М.Журкова [44].

На сьогодні сформульовано два уявлення про процеси руйнування полімерів. Згідно першого, розрив полімерних ланцюгів проходить одночасно у всьому об'ємі зразка, згідно другого, він проходить послідовно по мірі розділення зразка на частини осередком руйнування. За Дагдейлом такими осередками є «тріщини срібла», або крейзи [7]. Натомість Бартенев Г.М. вважає, що накопичення крейз (розтріскування) не є власне руйнуванням полімеру, повністю руйнуючим цілісність матеріалу.

В умовах мікроударного навантаження у рідких середовищах визначальним чинником руйнування є не об'ємна, а поверхнева міцність. Крейзи – це клиновидні тріщини в областях підвищеної деформації з наступним її розтріскуванням при одночасній витяжці і зміцненні волокон (тяжів), які скріплюють створи тріщин. Приймаючи на себе навантаження, вони запобігають значній перенапрузі в вершинах клина крейз. Між мікротріщинами утворюються мікропустоти. «Тріщини срібла» мають особливості: 1) розміри їх не змінюються при розвантаженні зразка [45]; 2) модуль пружності і міцність змінюються мало, так як створи тріщини міцно скріплені мікротяжами орієнтованого і тому зміцненого матеріалу [7]; 3) руйнування, як правило, проходить не по «тріщинам срібла», а між ними [7]. Разом з тим, в моделях Дагдейла та Леонова-Панасюка стверджується, що тріщини починають рости, коли їй розкриття досягає критичного значення δ_k . Тобто, при $\delta < \delta_k$ тріщина не росте. В роботі [43] нами експериментально виявлено області скупчення крейз на поліпропілені після 3 год кавітації в 3%-му розчині натрій хлориду при температурі 293°К. Критичне значення δ_k пораховане за Дагдейлом становило 2,73...3,73 мкм. Наближений розрахунок, проведений Г.М.Бартеневим [43] дає для полістирола значення $\delta_k \approx 10$ мкм. Таке значення критичної ширини розкриття «тріщини срібла» отримано без врахування дії середовища. Проте відомо [7,45], що при одночасній дії середовища та зовнішнього навантаження збільшується дифузія робочого середовища в полімер і при збільшенні концентрації середовища в об'ємі матеріалу зменшується його модуль пружності, границя

міцності та характеристики циклічної витривалості [45]. Очевидно, що при кавітації ударні хвилі, які виникають при детонації кавітаційних бульбашок, зумовлюють появу середнього статичного тиску в межах 50...1000МПа, а місцеві, локальні тиски можуть перевищувати статичні тиски в 150000 разів [45] і високі температури здатні ініціювати хімічні реакції між структурними складовими полімеру і робочим середовищем. Отже, сумісна дія механічних напружень і хімічних реакцій приводить до так званих механохімічних явищ [42]. Механічні напруження приводять до появи мікротріщин, «тріщин срібла» і, спочатку, в наслідок витяжки і орієнтації макромолекул тяжів крейз до їх зміцнення, а в подальшому до розриву зв'язків макромолекул, розрихленню структури, тобто до деструкції полімеру при дії середовища. В свою чергу, процес деструкції полімеру при дії хімічно-активних середовищ приводить до зміни механічних властивостей полімеру.

3.4. Руйнування фторопластів при мікроударних навантаженнях

Фторопласти – обширна група фторомістких полімерів вінільного типу, з яких в машинобудуванні найбільш широко застосовують полімери тетрафторетилену (фторопласт Ф4) і трифторхлоретилену (фторопласт Ф3) та їх модифікації. Особливістю даних полімерів є те, що вони відрізняються високою кристалічністю, яка досягає 93...97% [11]. Вироби з фторопласту рекомендовано експлуатувати при температурах не більше 250°C для виключення можливості зміни їх структури і тим самим механічних властивостей. Механічні властивості фторопластів різко змінюються залежно від температури: з її підвищенням модуль пружності, границя міцності на розтяг знижуються, а відносне видовження збільшується.

За хімічною стійкістю фторопласти перевищують усі відомі пластмаси. Фторопласти не розчиняються ні в одному з відомих розчинників, стійкі до кислот і лугів, не набухають у воді і не горять. Фторопласт Ф3 хімічно менш стійкий, аніж фторопласт Ф4. При підвищенні температури, під тиском він розчиняється в бензолі, толуолі, ксилолі і в деяких інших розчинниках [2,11].

Для фторопласту Ф4 максимальна температура експлуатації становить $+260^{\circ}\text{C}$, а мінімальна -269°C , для фторопласту Ф3, відповідно, $+125$ і -195°C [11].

Найвищі, порівняно з іншими пластмасами, хіміко-механічні властивості фторопластів і їх модифікацій зумовило їх широке застосування в машинобудуванні в якості конструкційних матеріалів для деталей, які працюють в агресивних середовищах (антифрикційні, електроізоляційні, ущільнюючі і хімічностійкі елементи конструкцій). Разом з тим, дані про кавітаційно-ерозійну зносостійкість фторопластів фрагментарні, безсистемні, носять розрізнений характер. Саме тому в даному підрозділі роботи досліджується кавітаційна зносостійкість фторопласту Ф4 та фторопласту Ф3 в нейтральних середовищах.

Проведені дослідження показали (Рис.3.7), що в усіх середовищах фторопласт Ф4 має вищу зносостійкість порівняно з фторопластом Ф3. Найвищу зносостійкість обидва полімери показали у водопровідній воді, а найменшу – фторопласт Ф3 в розчині NaCl (криві 3 і 1 на Рис.3.7). Попри те, що фторопласти Ф4 і Ф3 показали найвищу кавітаційну стійкість у водопровідній воді (криві 2 і 4 на Рис.3.7), втрати маси для них зі збільшенням часу випробувань мають тенденцію до збільшення і описуються майже прямолінійними залежностями. У розчині NaCl, навпаки, до зниження. Особливо це характерно для удароміцного фторопласту Ф4, де на початку випробувань і впродовж 2год кавітації втрати маси найбільші, а далі різко зменшуються (крива 1 на рис.3.7). За зростанням втрат маси обидва матеріали залежно від виду середовища розміщуються в ряд: водопровідна вода, 3%-вий розчин NaCl [44].

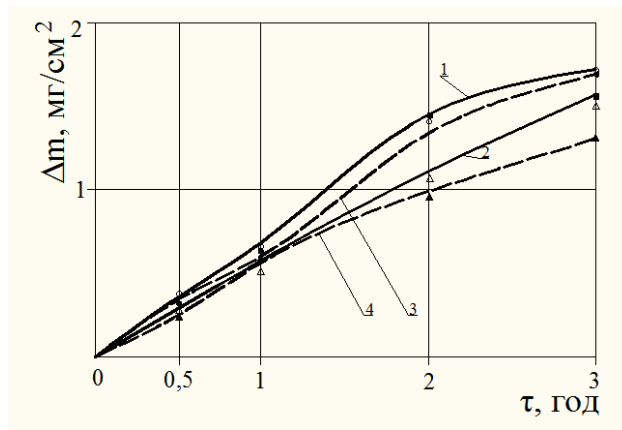


Рис.3.7. Кінетика втрат маси при кавітаційно-ерозійному руйнуванні:
 1,2 – фторопласт Ф3 і 3,4 – фторопласт Ф4 у 3%-му розчині кухонної солі та
 жорсткій воді, відповідно

Залежності інтенсивності зношування фторопласту Ф3 (рис.3.8) описуються більш плавними кривими, а максимум інтенсивності зношування зміщується і знаходиться в межах 1...1,5 год і, відповідно, зменшується прямолінійна ділянка зношування. За 3 год кавітації інтенсивність втрат маси фторопласту у водопровідній воді і 3%-му розчині NaCl (0,27 мг/(см²/год)). Теж стосується і фторопласту Ф4, інтенсивність руйнування якого у відповідних середовищах практично однакова.

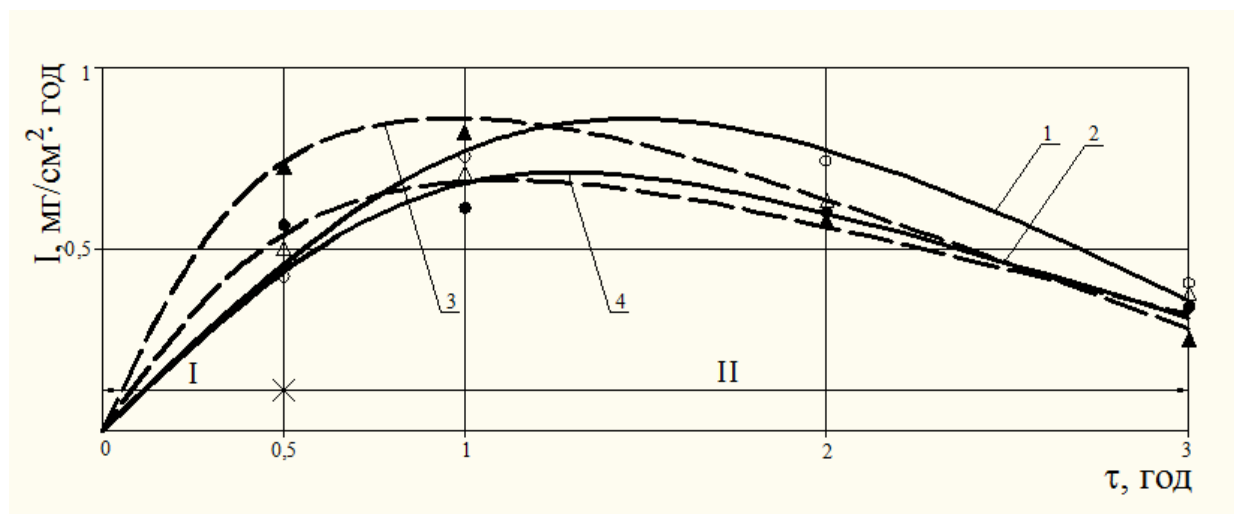


Рис.3.8. Кінетика інтенсивності кавітаційно-ерозійного руйнування фторопласту Ф3 1-в 3%-му розчині NaCl, 2 – у водопровідній воді та фторопласту Ф4 3 - в 3%-му розчині NaCl ,4 - у водопровідній воді

Хімічна стійкість фторопластів до більшості агресивних середовищ пов'язана з високою міцністю зв'язку C-F, яка є найбільшою з усіх відомих в органічній хімії зв'язків вуглецю з елементами. Великий розмір атомів фтору і їх спіральне розміщення навколо вуглецевого ланцюга роблять недоступними для атаки хімічними реагентами зв'язків макромолекули C-C. Симетричне розміщення атомів фтору між собою, їх спіральне розміщення відносно вуглецевого ланцюга, визначають малі міжмолекулярні сили і нерозчинність в усіх розчинниках [44]. Разом з тим, в умовах кавітаційного навантаження при можливості локальних спалахів температур 1000 °C і більше, тисків 1000Па, складно-напруженому стані поверхні, можуть ініціюватися хімічні реакції між полімером і середовищем. Так, вище вказувалося на можливість розчинення фторопластів при високій температурі і тисках в деяких розчинниках. Також вони набухають у певних середовищах при температурах вище 300 °C [44]. Фторопласти не витримують дію розплавлених і розчинених лужно-земельних металів, трифтористого хлору, газоподібного фтору при 150°C і вище при підвищеному тискові [44]. Крім того, наявність атомів H і Cl і наступного їх попадання в основний ланцюг полімеру понижує його термостійкість. Наявність, наприклад, атомів гідрогену в полімерному ланцюгу при 370...390 °C приводить до відщеплення HF і до наступного розриву ланцюга, що веде до зниження фізико-механічних характеристик полімеру [44]. Тому саме можливістю проходження вище вказаних хімічних перетворень в умовах мікроударного навантаження в середовищах, де є можливість утворення атомів хлору і водню [44] і можна пояснити кавітаційно-ерозійну зносостійкість фторопластів, зокрема, у кислих і нейтральних середовищах.

Аналіз залежностей $I-\tau$ (Рис.3.9) дозволяє виділити дві зони інтенсивності руйнування (I і II), що відрізняються швидкістю руйнування. Зона I для фторопласту Ф4 займає приблизно 0,5год, а для фторопласту Ф3 біля 1год (Рис 3.9,б). Відповідно втрати маси на ділянках I і II розподіляються у співвідношенні 25 і 75%. Очевидно, що така оцінка ділянок руйнування за часом і втратою маси при кавітаційно-ерозійному руйнуванні фторопластів є орієнтовною величиною, але разом з тим, наявність цих ділянок незаперечна.

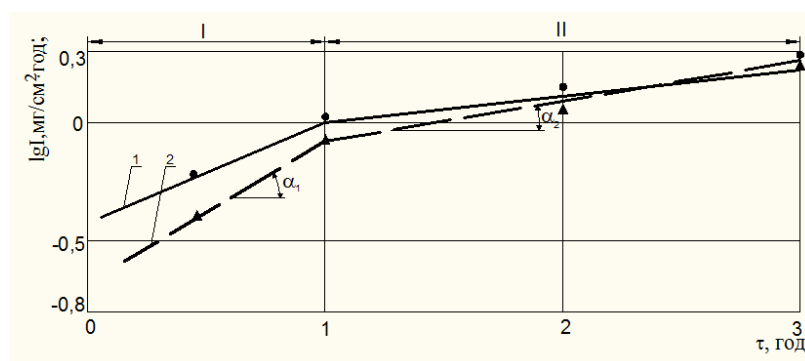


Рис.3.9. Кінетика втрати маси та інтенсивності кавітаційно-ерозійного руйнування: в координатах $lgI-\tau$ 1- фторопласт Ф3 і 2- фторопласт Ф4, в 3%-му розчині NaCl

Згідно [32] в основі процесу руйнування полімерів лежать механо-хімічні процеси. Руйнування полімерних поверхонь слід розглядати як процес термічної деструкції, який пришвидшується механічними напруженнями. При наявності середовища процес термічної деструкції супроводжується протіканням хімічних реакцій, а термічна деструкція обумовлена накопиченням локальними мікрооб'ємами структурних складових полімеру температур, здатних ініціювати протікання термічної деструкції і хімічних перетворень.

3.5. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість полімерних покриттів на металічних поверхнях в корозійно-активних середовищах

Дослідження на кавітаційно-ерозійну зносостійкість поліпропілену та покриття на його основі показали (рис.3.10), що покриття на основі поліпропілену ПНТ мають дещо нижчу зносостійкість порівняно з поліпропіленом ПНТ в усіх досліджених середовищах. Так, за 2 год випробувань різниця зносостійкості становила 1,35; 1,38 разів, відповідно, 3%-му розчині NaCl та водопровідній воді. З продовженням часу кавітаційних випробувань різниця в зносостійкості збільшується і за 3 год мікроударного навантаження становить 1,7; 1,68 разів. Очевидно, що причиною цього є різниця швидкостей проходження звукових хвиль в поліпропілені і в сталій матриці, що викликає появу відбивних хвиль, які інтенсифікують процес руйнування покриття. Крім того, швидкість руйнування поліпропілену зменшується, а покриття на його основі, навпаки, збільшується при продовженні часу мікроударного навантаження. Останнє пояснюється, як зменшенням товщини покриття так і структурними його змінами, що обумовлюють зменшення його пружних властивостей, а відтак приводять до збільшення енергії відбивних звукових хвиль (рис.3.10, а; криві 1¹,2¹).

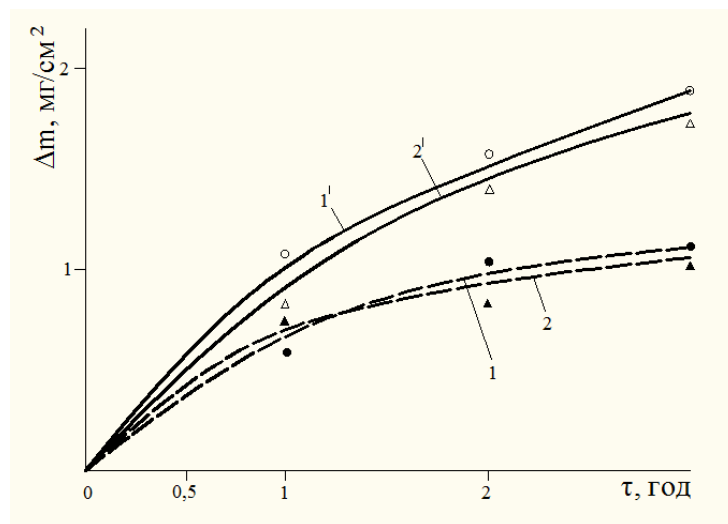


Рис.3.10. Кавітаційно-ерозійна стійкість: а) поліпропілену ПНТ 1 в 3%-му розчині NaCl, 2 у водопровідній воді; покриття на основі поліпропілену ПНТ на сталі 45 1¹,2¹ у відповідних розчинах;

Для покриттів на основі фторопласту різниця в зносостійкості незначна, порівняно зі зразками чистого фторопласту Ф4 (рис.3.11) і

становить за 3 год кавітації від 6 до 11% в усіх досліджених середовищах. Фторопласт Ф4 є абсолютно нейтральним по відношенню до досліджених середовищ і різниця в зносостійкості пояснюється лише фізичними параметрами середовищ, які обумовлюють енергетичні параметри ударних і відбивних хвиль при ультразвуковій кавітації і, отже, інтенсивність руйнування поверхонь.

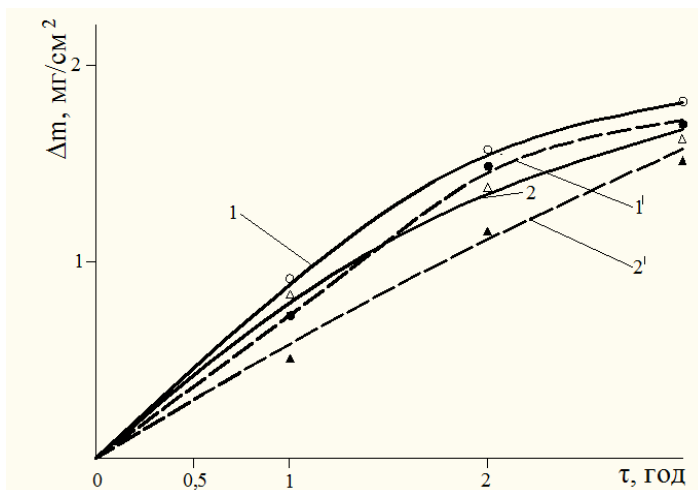


Рис.3.11. Кавітаційно-ерозійна стійкість фторопласту Ф4 – 1 в 3%-му розчині NaCl, 2 у водопровідній воді; покриття на основі фторопласту Ф4 на сталі 45 - 1', 2' у відповідних розчинах

Аналіз даних (табл.3.2) показує, що застосування полімерних покриттів для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості металевих сплавів є досить ефективним способом. Так, в нейтральному середовищі покриття на основі поліпропілену ПП2 та фторопласту Ф4 дозволяють приблизно в 2 рази збільшити кавітаційну зносостійкість сталі 45 нормалізованої.

Таблиця(3.2)-

Втрати маси (мг/см²) при кавітаційно-ерозійному зношуванні за 3 год кавітації

Вид середовища	Матеріал				
	Сталь45 нормалізов	Сталь 45 + ПП2	Поліпропілен	Сталь 45 + Ф4	Фторопласт Ф4

	ана		ПП2		
3%-вий розчин NaCl	3,62	1,89	1,11	1,82	1,72
Водопровідна вода	59,25*	1,78/1,23*	1,06/0,89*	1,67/1,34*	1,57/1,1*

*- втрати маси за 2 год кавітації

Особливо ефективним є застосування полімерних покриттів у водопровідній воді, де збільшення кавітаційної стійкості становить більше ніж 40 разів. При цьому застосування фторопласту для виготовлення кавітаційностійких деталей збільшує їх зносостійкість більш як у 50, а з поліпропілену у 60 разів.

Для оцінки довговічності деталей важливе значення має кінетика зношування робочих поверхонь деталей. Аналіз кривих втрат маси у водопровідній воді (рис.3.12) показує катастрофічне руйнування сталі 45 у водопровідній воді (крива 1 на рис.3.12) і збільшення стійкості при застосуванні полімерних покриттів на основі поліпропілену і фторопласту (криві 2 і 3 на рис.3.12). Покриття з поліпропілену і фторопласту показують практично однакову зносостійкість у водопровідній воді, а найбільш зносостійкими є деталі з поліпропілену (крива 4 на рис.3.12). Важливим є також те, що крива кінетики зношування поліпропілену має затухаючий характер, що вказує на зменшення інтенсивності руйнування зі збільшенням часу мікроударного навантаження.

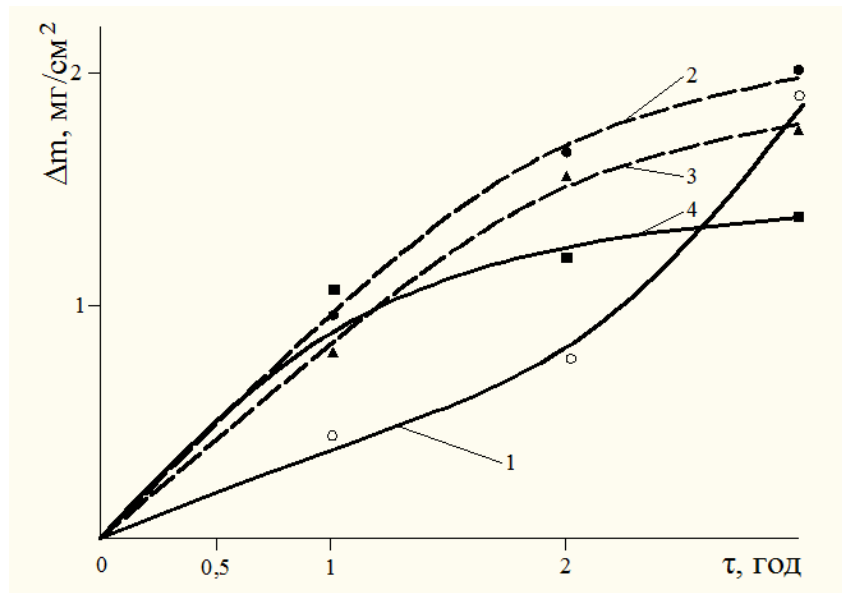


Рис.3.12. Кавітаційно-ерозійна стійкість: а) 1-сталь45 нормалізована; 2-сталь 45 норм. + покриття з поліпропілену ПНТ; 3-сталь 45 + покриття з фторопласту Ф4; 4-поліпропілен у водопровідній воді

Отже, Покриття на основі поліпропілену та фторопласту дещо поступаються по кавітаційно-ерозійній стійкості поліпропілену та фторопласту, але є ефективним захистом металевих поверхонь від руйнування в 3%-му розчині кухонної солі та у водопровідній воді. Досліджені покриття в 2 рази збільшують кавітаційно-ерозійну стійкість металевих поверхонь в 3%-му розчині NaCl і більш як в 40 разів у водопровідній воді [47].

Найбільш ефективним для експлуатації у вказаних середовищах є кавітаційно-стійкі деталі із поліпропілену, а при великих механічних навантаженнях із фторопласту.

3.6 Висновки

1. Серед досліджених полімерних матеріалів термопласти (фторопласт, поліпропілен) показали вищу зносостійкість при мікроударному

навантаженні ніж реактопласти (ебоніт і текстоліт). Останнє пояснюється їх структурною будовою і механізмами руйнування.

2. Отримані дані кавітаційно-ерзійної стійкості фторопласту Ф4 і його удароміцних аналогів фторопластів Ф4С15 та Ф4С20 в нейтральних середовищах.

3. На базі отриманих експериментальних даних проаналізована кінетика і можливі механізми руйнування поверхонь на різних його етапах.

4. Аналіз сучасних моделей руйнування полімерів (Гріффіта, Вестергаарда, Дагдейла та Журкова) вказують на необхідність врахування процесів крейзоутворення та фізико-механічних параметрів крейз. Серед розглянутих моделей найбільш прийнятною для прогнозування довговічності полімерів при кавітації, на думку авторів, є кінетична теорія міцності твердих тіл С.М. Журкова доповнена та уточнена згідно існуючих теоретичних і експериментальних даних про процеси крейзоутворення та властивості крейз.

РОЗДІЛ 4

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті аналізу літературних джерел та проведених досліджень отримані наступні результати та висновки:

1. Полімерні матеріали і покриття на їх основі широко застосовується в різних галузях машинобудування, літакобудування, суднобудування і т.д для підвищення корозійної стійкості, зносостійкості, корозійно-механічної зносостійкості.

2. Поширення застосування полімерних матеріалів пояснюється насамперед їх все зростаючим фізико-механічними характеристиками, винятково корозійною стійкістю в багатьох агресивних середовищах, технологічністю виготовлення деталей складної конфігурації, низькою собівартістю тощо.

3. Аналіз літературних джерел також показав майже повну відсутність публікацій про кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерів і полімерних покриттів в середовищах харчових виробництв.

4. На теперішній час актуальною задачею залишається систематизація даних про кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерів в нейтральних, кислих та лужних середовищах харчової промисловості.

5. Незначне поширення кавітаційно-стійких деталей з полімерів в машинобудуванні пояснюється не лише їх нижчими порівняно з металами, механічними характеристиками, але і браком експериментальних і теоретичних досліджень направлених на вивчення механізмів кавітаційно-ерозійного руйнування, розробки методів прогнозування довговічності кавітаційно-ерозійного руйнування, розробки методів прогнозування довговічності кавітаційно-ерозійної зносостійкості полімерів залежно від характеристики середовища та умов експлуатації деталей.

6. Поєднання механічних характеристик металів і полімерних матеріалів особливо ефективно при застосуванні полімерних покриттів на металевих сплавах, що засвідчує все більша кількість публікацій на цю тематику в науковій літературі.

7. В роботі розглянуто основні класи полімерних матеріалів, їх структурна будова основні фізико-хімічні і механічні характеристики найбільш поширених в машинобудуванні полімерів.

8. У літературному огляді проаналізовані основні існуючі методи дослідження кавітаційно-ерозійного зношування полімерних матеріалів і вибрано для проведення досліджень метод Гейнеса, який реалізується за

допомогою установки з ультразвуковим генератором та магніострикційного вібратора.

9. Установка для проведення досліджень на кавітаційно-ерозійну зносостійкість полімерів складається з ультразвукового генератора УЗДН-А з робочою частотою 22 кГц, потужністю 130 Вт і амплітудою коливань магніострикційного вібратора (МСВ) 22...65 мкм.

10. Для виключення температурного чинника на інтенсивність корозійно-ерозійного руйнування полімерних матеріалів застосували двоконтурну схему охолодження робочих середовищ з різнонаправленими витками спіралей охолоджувальних змішувачів.

11. Дослідження кінетики зміни приповерхневих шарів полімерів і металів показали, що при поверхнева енергія ультразвукових коливань накопичується в поверхневих шарах і розсіюється в об'ємі середовища для металів і чавунів. Останнє пояснюється значно нижчими характеристиками теплопровідності полімерів порівняно з металами.

12. Виміри поверхневої температури показали, що температура поверхні фторопласту і поліпропілену підвищується (з 20°C до 47°C для фторопласту і з 20°C до 47°C і 20°C до 23°C для сталі 45 за 60 с).

13. Застосування двоконтурної системи охолодження дозволило стабілізувати поверхневу температуру полімерних зразків протягом часу проведення випробувань в межах $20 \pm 1,5$.

14. Встановлено, що підвищення температури середовища інтенсивність кавітаційно-ерозійного руйнування полімерів значно підвищується.

15. Залежність інтенсивності руйнування полімерів від їх поверхневої температури є одним із експериментальних підтверджень можливості застосування для аналізу кавітаційно-ерозійної зносостійкості полімерів кінетичної теорії руйнування твердих тіл С.М. Журкова. З врахуванням процесів крейзоутворення та фізико-механічних характеристик крез.

16. Попередньо проведені дослідження і порівняння отриманих результатів з літературними даними показало, що термопласти мають значно вищу кавітаційно-ерозійну зносостійкість аніж реактопласти. Крім того фторопласт і поліпропілен допускаються санітарно-гігієнічними нормами з багатьма середовищами харчових виробництв і саме тому вони були вибрані для проведення досліджень.

17. Кавітаційно-ерозійне руйнування полімерних матеріалів в даній роботі розглядається з позиції фізико-хімічної механіки руйнування.

18. механічні і теплофізичні характеристики знайдені в статичних умовах (без навантаження, при кімнатній температурі і без врахування дії середовища) не дають однозначної відповіді на отримані експериментом результати кавітаційно-ерозійної зносостійкості полімерів.

19. Інтенсивність зношування фторопласту та поліпропілену у водопровідній воді і у 3%-му розчин NaCl описується залежностями: $I = e^{a\tau}$, де I - інтенсивність зношування, $a = \operatorname{tg}\alpha$ - кут нахилу прямих до осі абсцис і τ - час дії мікроударного навантаження.

20. Поліпропілен низького тиску ПМТ порівняно з поліпропіленом ПСТ має дещо вищу кавітаційну стійкість у водопровідній воді і 3№%-му розчині NaCl, що пояснюється більшим вмістом кристалічної фази в структурі поліпропілену ПМТ.

21. Амплітудне значення максимальної інтенсивності руйнування поверхні ПНТ в 2 рази більше в 3%-му розчині кухонної солі ніж у водопровідній воді. Очевидно, що іони хлору мають більшу руйнівну силу (хімічну) на кристалічну складову полімеру в умовах мікроударного навантаження.

22. На кривих інтенсивність кавітаційного зношування – час поліпропілену виділяються три ділянки (I,II,III) з різними швидкостями руйнування поверхонь. Разом з тим на кривих $\lg G - \tau$ є лише дві ділянки (I і II), що вказує лише на 2 різних механізми руйнування поверхневого шару поліпропілену.

23. У водопровідній воді і в 3%-му розчині кухонної солі фторопласт Ф4 має вищу кавітаційну стійкість порівняно з фторопластом Ф3.

24. Втрати маси фторопластів у водопровідній воді менші ніж в 3%-му розчині кухонної солі.

25. Максимальні значення інтенсивності зношування (криві $I-\tau$) для фторопласту Ф3 в обох середовищах досягаються при $\tau=1,5$ год, а для Ф4 при $\tau=0,75$ год.

26. Інтенсивність руйнування фторопластів Ф3, Ф4 після 3 год кавітації в усіх середовищах майже однакова, а в межах одного середовища однакова, що пояснюється їх високою хімічною стійкістю.

27. На кривих $I-\tau$ для фторопластів можна виділити дві зони інтенсивності руйнування (I і II), що відрізняються швидкістю руйнування поверхні. Зона I для фторопласту Ф4 займає 0,5 год, а для фторопласту Ф3 біля 1 год. Відповідно втрати маси на ділянках I і II розподіляються у співвідношенні 25 і 75%.

28. На залежностях $\lg I-\tau$ також можна виділити дві ділянки інтенсивності руйнування поверхонь, що свідчить про різні механізми зношування полімерів до і після досягнення максимуму інтенсивності руйнування.

29. Експериментально показано, що покриття на основі поліпропілену та фторопласту дещо поступаються кавітаційно-ерозійній зносостійкості поліпропілену та фторопласту, але є ефективним захистом металевих поверхонь від руйнування в нейтральних середовищах (водопровідна вода і 3%-вий розчин кухонної солі).

30. Дослідженні покриття більше ніж в два рази збільшують кавітаційно-ерозійну зносостійкість металевих поверхонь.

31. Найбільш ефективними при незначних і середніх механічних навантаженнях є покриття з поліпропілену, а при значних навантаженнях перевагу слід надавати покриттям із фторопласту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. К.М Прис. Эрозия. Москва: Мир 1982.-360с.
2. Трение и износ материалов на основе полимеров / [В.А. Белый, А.И. Свиреденок, М.И. Петраковец и др.] – Минск: Наука и техника, 1976. – 430с.
3. Стечишин М.С., Мартинюк А.В. Кавітаційно-ерозійна стійкість полімерних матеріалів в корозійно-активних середовищах // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2009. - №2. – С.69 – 74.
4. Белый В.А., Довгяло В.А., Юркевич О.Р. Полимерные покрытия. – Минск: Наука и техника. – 1976. – 414с.
5. Металлополимерные материалы и изделия / Под ред. В.А. Белого. – М.: Химия. – 1979. – 312с.
6. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 192с.
7. Белый В.И. Повышение надежности и долговечности деталей оборудования пищевой промышленности, подверженных кавитационно-эрозионному изнашиванию: Автореферат дис. канд. техн. наук.: 05.02.14. – К., 1978. – 24с.
8. Богачев И.Н., Вайнштейн А.А., Волков С.Д. Введение в статистическое металловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 216 с.
9. Бакнэл К.Б. Ударопрочные пластики: Пер. с англ. /Под ред. И.С. Лишанского. – Л.: Химия, 1981. – 382с.
10. Канцельсон М.Ю. Полимерные материалы: справочник / М.Ю. Канцельсон, Г.А. Балаев. – Л.: Химия, 1982. – 317с.

11. Машиностроительные материалы: краткий справочник / В.М. Раскатов, В.С. Чуенков, Н.Ф. Бессонова, Д.А. Вейс. – М.: Машиностроение, 1980.- 511с.
12. Барштейн Р.С. Пластификаторы для полимеров / Р.С. Барштейн, В.И. Кирилович, Ю.С. Носовский. – М.: Химия, 1982. – 200с.
13. Годовский Ю.К. Теплофизические методы исследования полимеров / Ю.К. Годовский. – М.: Химия, 1976. – 216с.
14. Лялин А.О. Исследования развития трещин в полипропилене и дифлоне под действием агрессивных сред / А.О. Лялин, В.А. Муров, Р.Д. Степанов // Химическое и нефтяное машиностроение, 1978. - №7. – С.23 – 24.
15. Металлополимерные материалы и изделия / [под ред. В.А. Белого]. – М.: Химия. – 1979. – 312с.
16. Свиридов П.А. Ультразвуковая обработка радиотехнических деталей / П.А. Свиридов, В.А. Волосатов. – Л.: Химия, 1969. – 120с.
17. Степанов Р.Д. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах / Р.Д. Степанов, О.Ф. Шлёнский - М.: Машиностроение, 1981. – 136с.
18. Полипропилен: Пер. с словацкого / Егорова В.А. и др. / под ред. В. И.
19. Полиэтилен высокого давления: Научно-технические основы промышленного синтеза / А.В. Поляков, Ф.И. Дунтов, А.Э. Софиев [и др]. – Л.: Химия, 1988. – 200с.
20. Поливинилхлорид / В.М. Ульянов, Э.П. Рыбкин, А.Д. Гуткович, Г.А. Пишин. – М.: Химия, 1992. – 288с.
21. Смирнова О.В. Поликарбонаты / О.В. Смирнова, С.Б. Ерофеева. - М.: Химия, 1975. – 288с
22. Шур А.М. Высокомолекулярные соединения / А.М. Шур. – М.: Высшая школа, 1981. – 656с.

23. Мартинюк А.В. Методика проведення досліджень на зносостійкість полімерних матеріалів при мікроударних навантаженнях / А.В. Мартинюк // Проблеми трибології. - 2009. - №1. – С.35 – 38.
24. Карелин В.Я. Износ лопастных гидравлических машин от кавитации и наносов.-М.:Машиностроение ,1970.-184 с.
25. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно -стойкие сплавы.-М.:Металлургия,1972.-192 с.
26. Preiser H.S., Tutelt D.H. The electrochemical approach to cavitation damage and it's prevention // Corrosion. – 1981. – Vol. 17. – P. 513 – 517.
27. Tailor i. Diskussion of paper by W.H. Wheeler // Traus. ASME. – 1980, 82D.-P.184 – 192.
28. Эльпинер И.Е. Расчетные значения давлений при кавитации// Акустический журнал АН СССР. – 1972. - №5. – С.135 – 139.
29. Эрозия: Пер. с англ./Под ред. К.Прис. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
30. Карасюк Ю.А., Кочеров В.И., Бенино В.В. и др. О соотношении коррозионного и эрозионного факторов в кавитационном разрушении металлов// Физ. – хим. механика материалов. – 1976. - №5. – С.14 – 16.
31. Стечишин М.С. Методи оцінки та прогнозування довговічності при корозійно – механічному руйнуванні металів і сплавів//Вісник ТУП. - №3. – 2001. – С.61 – 69.
32. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и знос полимеров. – Л.: Химия, 1972. – 271с.
33. Трение износ материалов на основе полимеров/ В.А Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петраковец и др. – Минск: Наука и техника, 1976. – 430 с.
34. Холодилов О.В. Влияние скорости скольжения на особенности изнашивания термопластов // Трение и износ. – 1984. - №3. – С.431 – 441.

35. Стечишин М.С. Довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно – механічному зношуванні: Дисерт. докт. техн. наук, Хмельницький. – 1998. -320 с.
36. Материалы в машиностроении:Неметаллические материалы /Под.ред. В.А.Попова, С.И. Сильвестровича, И.Ю. Шелдмана. – М.: Машиностроение, 1969 – 544 с.
37. Бакнелл К.Б. Ударопрочные пластики: Пер. с англ. – Л.: Химия, 1981. – 328 с.
38. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560с.
39. Степанов Р.Д., Шленский О.Ф. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах. – М.: Машиностроение, 1981. – 136 с.
40. Бурлакова С.Н. Повреждаемость поверхности при кавитационной эрозии // Журнал технической физики. – Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 1998. - №3. – Т.68. – С.110 – 114.
41. Стечишин М.С. Вплив температури поверхні на руйнування полімерних матеріалів під дією мікроударних навантажень в рідких середовищах / М.С. Стечишин, А.В. Мартинюк, І.І. Сорока // Вісник ХНУ. – Технічні науки. – 2008. - №2. – С.157-161.
42. Стечишин М.С. Зносостійкість полімерних матеріалів при їх мікроударному навантаженні / М.С. Стечишин, А.В. Мартинюк // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Видавництво НАУ «НАУ-друк», 2008. – Вип.49. – С.104 – 113.
43. Стечишин М.С. Кавітаційно-ерозійне руйнування полімерних матеріалів при їх мікроударному навантаженні / М.С. Стечишин, А.В. Мартинюк // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування та прогнозування: міжнародна науково-техн. конф., 21-24 вер. 2009р.: тези доп. – Тернопіль, 2009. – С.233-239.

44. Стечишин М.С. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість фторопластів / М.С. Стечишин, А.В. Мартинюк // Проблеми трибології. – 2009. - №4. – С.62-64.
45. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. – М.: Высшая школа, 1983. – 391с.
46. Стечишин М.С. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість полімерних покриттів на металічних поверхнях в корозійно-активних середовищах / М.С. Стечишин, А.В. Мартинюк, О.О. Білецький // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Видавництво НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип.52. – С.92 – 100.
47. Трение и износ материалов на основе полимеров / [В.А. Белый, А.И. Свиреденок, М.И. Петраковец и др.] – Минск: Наука и техника, 1976. – 430с.
48. Стечишин М.С., Мартинюк А.В. Кавітаційно-ерозійна стійкість полімерних матеріалів в корозійно-активних середовищах // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2009. - №2. – С.69 – 74.
49. Белый В.А., Довгяло В.А., Юркевич О.Р. Полимерные покрытия. – Минск: Наука и техника. – 1976. – 414с.
50. Металлополимерные материалы и изделия / Под ред. В.А. Белого. – М.: Химия. – 1979. – 312с.
51. Сухарев Э.А. Технология и свойства защитных покрытий в машинах. – Ровно: УГУВХП. – 2004, - 182с.
52. Стечишин М.С., Мартинюк А.В. Зносостійкість полімерних матеріалів при їх мікроударному навантаженні // Проблеми тертя та зношування: Наук. – техн. зб. – К.: Видавництво НАУ «НАУ-друк», 2008. – Вип.49. – С.104 – 113.
53. Мартинюк А.В. Методика проведення досліджень на зносостійкість полімерних матеріалів при мікроударних навантаженнях // Проблеми трибології. – Хмельницький: ХНУ, 2009. - №1. – С.35 – 38.

