

Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Львівська філія

На правах рукопису

МІЛЯНИЧ Андрій Романович

УДК: 629.463.3.083

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ КОТЛІВ ВАГОНІВ-
ЦИСТЕРН ПРИ ПІДГОТОВЦІ ЇХ ДО РЕМОНТУ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник –
доктор технічних наук
КУЛІЧЕНКО Анатолій Якович

Дніпропетровськ 2015

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	4
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПІДГОТОВКИ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН ДО РЕМОНТНИХ РОБІТ	10
1.1. Внесок вітчизняних та іноземних вчених в удосконалення підготовки вагонів-цистерн до ремонтних робіт	10
1.2. Аналіз технологічних процесів підготовки вагонів-цистерн у ремонт та в експлуатацію	19
1.3. Технічні характеристики вагонів-цистерн для перевезення вантажів, які тверднуть	23
1.4. Фізико-механічні та хімічні властивості речовин, які тверднуть.....	26
1.5. Аналіз існуючих на практиці процесів підготовки вагонів під завантаження вантажів, які тверднуть	34
1.6. Висновки до розділу 1.	38
2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРИНЦИПІВ РУЙНУВАННЯ ЗАСТИГЛИХ ЗАЛИШКІВ РЕЧОВИН.....	39
2.1. Теорія руйнування застиглих залишків речовин	39
2.2. Модель взаємодії робочих елементів інструменту із застиглими залишками вантажів	47
2.3. Моделі процесів руйнування застиглих залишків вантажів від динамічного удару та обертання робочих елементів	68
2.4. Дослідження процесу руйнування методом кінцевих елементів	76
2.5. Висновки до розділу 2.....	87
3. МЕХАНІЧНИЙ ПРИНЦИП РУЙНУВАННЯ ЗАЛИШКІВ РЕЧОВИН, ЯКІ ТВЕРДНУТЬ І МЕТОДИКА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	90
3.1. Обладнання, об'єкт дослідження, зразки та матеріали	90
3.2. Інструменти для проведення дослідів	97
3.3. Вибір факторів та планування експериментів	105

3.4. Методика дослідження комплексного впливу параметрів процесу та його характер	107
3.5. Висновки до розділу 3	116
4. ПОТУЖНОСТІ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ЗАСТИГЛОЇ РЕЧОВИНИ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНСТРУМЕНТІВ ОБРОБКИ	117
4.1. Енергетичні витрати на процеси руйнування та видалення залишків застиглих речовин	117
4.2. Довговічність ефективної експлуатації робочих елементів	119
4.3. Розрахунок економічної ефективності запропонованого механізму очистки цистерн	126
4.4. Висновки до розділу 4	133
5. ЯКІСНЕ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ КОТЛА ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ	134
5.1. Формування шорсткості поверхні металу	135
5.2. Встановлення степені внутрішніх залишкових напружень	151
5.3. Висновки до розділу 5	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	163
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	166
ДОДАТОК А Патент та опис на корисну модель	178
ДОДАТОК Б Акт та довідка про впровадження результатів роботи	18180

ВСТУП

Актуальність теми. Залізничний транспорт є основним складовим єдиного транспортного комплексу нашої держави і має особливе стратегічне значення для України. На його долю припадає 80% загальних об'ємів вантажних перевезень. Домінуючою задачею перевезень вантажів залізничним транспортом є підвищення його ефективності та безпека експлуатації вантажного рухомого складу, тому безперервно і цілеспрямовано здійснюються роботи по розвитку і технічному вдосконаленню технологічних процесів ремонтних робіт та технічного обслуговування вантажних вагонів.

Від чіткої і злагодженої роботи усіх підрозділів вагоноремонтних спеціалізованих підприємств залежить безперебійність і безпека руху поїздів та своєчасне забезпечення перевезень технічно справним рухомим складом. Зростання обсягу вантажних перевезень залізничним транспортом України різних за характером вантажів, таких як, наприклад, речовин, які тверднуть, є неможливим без постійного вдосконалення умов та підвищення ефективності технології проведення підготовчих робіт для вантажних вагонів, пов'язаних у першу чергу із вантажно-розвантажувальними процесами на транспорті.

Однією із основних проблем сьогодення у вантажних перевезеннях залізничним транспортом є технічне обслуговування засобів транспорту на етапах їх підготовчих робіт, пов'язаних із видаленням у процесі розвантаження з вагонів-цистерн залишків застиглих речовин, які тверднуть під час перевезень. Слід констатувати той факт, що на сьогоднішній час даний технологічний процес здійснюється у більшості ручним способом, що пов'язано із значними фізичними навантаженнями та шкідливими умовами для здоров'я робітників.

Складність у руйнуванні монолітності вантажів, які тверднуть полягає в специфічних особливостях матеріалу та труднощах порушення їх адгезійних взаємозв'язків із металом внутрішньої поверхні вантажного засобу, тому розробка та прийняття науково обґрунтованих рішень пов'язані із необхідністю підвищення ефективності нових технологічних процесів і обладнання відновлювального ремонту, що можливе лише на основі об'єктивних оцінок його технічного стану та залишкового ресурсу.

Одним із найбільш ефективних засобів підвищення ефективності підготовчих робіт є розробка та впровадження на вагоноремонтних підприємствах нових методик прогресивних, науково та економічно обґрунтованих технологічних процесів, здатних в раціональних режимах вирішувати поставлені задачі.

Актуальність проблеми полягає у вирішенні технологічної задачі ефективної, швидкої та економічно раціональної проблеми розвантажування залізничних вагонів-цистерн від застиглих залишків транспортованих вантажів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з пріоритетними напрямками розвитку залізничної галузі, які визначені у Транспортній стратегії України до 2020 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 № 2174-р), а також відповідає напрямкам досліджень та розробок, що проводяться на кафедрі «Вагони та вагонне господарство» ДНУЗТу. За темою дисертації виконана науково-дослідна робота «Технічне діагностування вантажних вагонів, що знаходиться на балансі ДП «Одеська залізниця» та які вислужили призначений термін служби з метою визначення їх технічного стану і можливості подальшої експлуатації» номер державної реєстрації 0115U004579. Автор брав участь у виконанні цієї науково-дослідної роботи як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності підготовчих робіт до ремонту вагонів-цистерн шляхом вдосконалення технології очищення внутрішніх поверхонь їхніх котлів.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих методів очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн на етапі підготовчих робіт для виконання ремонту;
- 2) розробити математичну модель руйнівного та очищувального технологічних процесів якісного очищення внутрішньої поверхні котла вагона-цистерни;
- 3) розробити загальні технічні вимоги до процесів та засобів руйнування та видалення із внутрішніх поверхонь котлів вагонів-цистерн застиглих залишків речовин;

4) розробити методику оптимальних та ефективних технологічних режимів очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн від застиглих залишків речовин, які тверднуть із формуванням якісних показників поверхні;

5) визначити економічну ефективність впровадження нового методу очищення внутрішніх поверхонь котлів цистерн;

6) розробити практичні рекомендації із технології очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн для проведення ремонту.

Об'єктом дослідження є технологічний процес очищення внутрішніх поверхонь котлів вагонів-цистерн.

Предмет дослідження – взаємодія робочих частин інструмента з залишками вантажів, що тверднуть та внутрішньою поверхнею котла вагонів-цистерн.

Методи дослідження. Основні положення технології металообробки, теорії математичного аналізу та числових методів вирішення диференціальних рівнянь, теорії моделювання, методи ітераційного та варіаційного числення, статистична обробка результатів експериментів.

Достовірність теоретичних положень, висновків і рекомендацій роботи підтверджено результатами експериментальних досліджень та практикою впровадження нової технології, установки та інструменту.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних у дисертаційному дослідженні результатів полягає в наступному:

- вперше на основі дослідження процесів зчеплення між внутрішньою поверхнею котла цистерни та застиглих залишків речовин встановлено зусилля для їх руйнування та відокремлення;

- вперше розроблено теоретичну модель руйнування та очищення із вагонів-цистерн накопичення вантажів, які тверднуть шляхом динамічного впливу робочих елементів інструменту;

- вперше розроблено технологічний процес вибору ефективних технологічних режимів механічного руйнування та видалення із внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн застиглих залишків вантажів, які тверднуть;

– удосконалено теоретичну модель формування шорсткості металу та внутрішніх залишкових напружень поверхонь котлів вагонів-цистерн методом комплексного впливу елементів інструменту.

– одержали подальшого розвитку практичні рекомендації із забезпеченням ефективності технології очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн перед постановкою їх у ремонт.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати можуть бути використані у ремонтному виробництві на етапі проведення механізованих підготовчих робіт перед ремонтом залізничних вагонів-цистерн. Також вони можуть бути використані в різних засобах транспортних перевезень.

Одержали подальшого розвитку практичні рекомендації із забезпеченням ефективності технології очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн перед постановкою їх у ремонт.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у вагонному депо ВЧДР-2 Дрогобич Львівської залізниці для очистки внутрішньої поверхні котлів залізничних цистерн від залишків вантажів, що тверднуть та якісної підготовки очищеної поверхні для подальшої експлуатації цистерн.

Результати роботи використано для проведення практичних занять з дисципліни «Вагоноремонтні машини та обладнання» та «Основи експлуатації та відновлення вагонів» на кафедрі «Рухомий склад і колія» (Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна).

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційних досліджень отримані автором самостійно. Роботи [43,47,68,170,171,176] написані самостійно, без співавторів. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора полягає у наступному: у [22] – провів аналіз існуючих методів очистки перед завантаженням вантажів; у [76] – провів аналіз взаємодії контактуючих поверхонь з різними якісними показниками матеріалу, що впливають на зносостійкість елементів інструментів і поверхню обробки; у [85] – теоретично обґрунтував роботу інструментів, призначених для механізованого руйнування

монолітності ортотропних матеріалів та видалення їх залишків із порожнин котлів цистерн; у [97] – дослідив технологічні фактори процесу поверхневої обробки інструментом із гнучкими робочими елементами; у [98] – розробив методику динамічних випробовувань деталей вантажних вагонів на міцність та надійність, а також провів аналіз тривалості експлуатації якісно сформованої поверхні; у [114] – провів аналіз статичних випробовувань деталей вагонів на ефективність поверхневої обробки; у [121] – розробив принцип дії секційної щітки за допомогою коливного руху, а також дослідив тепловий вплив на оброблену поверхню; у [165] – проаналізував методи та інструменти, які застосовуються у існуючих технологічних процесах очищення ємностей, резервуарів та залізничних цистерн від осадів органічного характеру; у [166] – вирішив задачу створення механізму, який із зовні можна направляти крізь вузьку горловину або люк ємності у внутрішню її порожнину; у [167] – розробив пристрій, в якому розгортається вісь з гнучкими робочими елементами на довжину, рівну половині довжини цистерни та надає осі обертового руху; у [168] – вирішив задачу створення установки, здатної здійснювати одночасно очистку значної за розмірами площі поверхні механічними торцевими щітками; у [169] – спроектував механізм, закріпивши який в котлі цистерни змушує щітки здійснювати зворотно-поступальний рух вздовж горизонтальної осі котла цистерни.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та були схвалені на 65 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2005 р.); на V Міжнародній науковій конференції «Проблеми економіки транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2006 р.); на 73 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2013 р.); на 74 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2014 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті», (м. Харків, 2014 р.); на

75 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2015 р.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на міжкафедральному семінарі кафедр «Вагони та вагонне господарство», «Локомотиви», «Управління експлуатаційною роботою», «Станції та вузли» за участю фахівців ГНДЛ «Вагони» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Дніпропетровськ, квітень 2015 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 24 наукові праці, з них: 9 – у спеціалізованих фахових виданнях України, 1 – у науковому періодичному виданні іноземної держави, 1 – у журналі, зареєстрованому в міжнародних каталогах, 6 деклараційних патентів на винаходи та 1 патент на корисну модель, 6 – тези доповідей конференцій:

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел із 177 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 181 сторінку, в тому числі 165 основного тексту, ілюстрованого 61 рисунками та 13 таблицями.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПІДГОТОВКИ ВАГОНІВ-ЦИСТЕРН ДО РЕМОНТНИХ РОБІТ

1.1. Внесок вітчизняних та іноземних вчених в удосконалення підготовки вагонів-цистерн до ремонтних робіт.

Вагони-цистерни, які подають у ремонт на вагоноремонтні заводи або вагоноремонтні депо є забрудненні нашаруваннями з навколишнього середовища та особливо забрудненні їх внутрішні поверхні від вантажів які перевозяться.

Характер очищення котлів цистерн визначається родом вантажу, що перевозиться та встановлюється типовими технологічними процесами за повним або скороченим циклом обробки.

Цистерни очищають на промивально-пропарювальних станціях залізниць, місцях видобутку нафти, нафтоперегінних заводах та на інших підприємствах-відправниках вантажів, які використовують відповідні пристрої й устаткування.

Удосконалення технології підготовчих робіт до ремонту вантажних вагонів, зокрема очищення котлів вагонів-цистерн та їх технічної діагностики є важливою складовою підвищення ефективності та економічності вагонного господарства.

Напрямки удосконалення технології очищення котлів вагонів-цистерн знайшли відображення у значній кількості наукових праць, які проводились у ДНУЗТі, УкрДАЗТі, ДЕТУТі, ВНДІЗТі, БелДУТі, МПТі та ін.

Питаннями удосконалення технології очищення в Україні займалися такі видатні вчені, як Борзилов І.Д., Бубнов В.М., Власов А.С., Зайончковський Г.Ф., Куліченко А.Я., Мартинов І.Е., Радченко В.Ю., Тарасенко Т.В. та інші.

Серед російських і білоруських вчених слід відзначити праці Бикова Б.В., Бугаєва В. П., Герасимова В. С., Гридюшка В.І., Губенка В.К., Козлова Ю.С., Кузнецова О.К., Лисичкина Е.А., Морчиладзе І.Г., Сенька В.І., Тельнова А.Ф., Пастухова І.Ф. та ін.

Основними проблемами розвитку підготовчих робіт до ремонту вантажних вагонів, зокрема очищенням котлів вагонів-цистерн за кордоном займаються

науковці M. Kratzsch-Leichsenring, Jepsen Erik Lund, Sie Gunner Monrad, Thoegersen Klaus та ін.

Основні праці, які присвячені питанням підвищення ефективності підготовчих робіт до ремонту вантажних вагонів, зокрема вагонів-цистерн можуть бути умовно розділені на три групи.

1. Удосконалення технологічних процесів очищення поверхонь.
2. Удосконалення методів очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн від залишків вантажів.
3. Удосконалення засобів передремонтної технічної діагностики цистерн.

Шляхи удосконалення технологічних процесів очищення поверхонь

Види забруднень, що зустрічаються в класифікації професора Н.Ф. Тельнова [151], який умовно розділив забруднення за походженням, фізико-хімічними властивостями та специфіки їх видалення при очищенні поверхонь.

Очищення поверхонь пов'язана з витратою теплової, механічної та фізико-хімічної енергії на руйнування забруднень і на видалення забруднень з поверхні.

Механічна енергія необхідна для руйнування забруднень в процесі очищення за рахунок виникаючих нормальних і дотичних напружень, а також для видалення забруднень із зони очищення.

Теплова енергія необхідна для зниження когезійний-адгезійних зв'язків забруднень, які видаляються.

Очищення поверхні під впливом фізико-хімічної енергії відбувається за рахунок молекулярних перетворень та розчинення забруднення та поверхнею, що очищається. Реалізація даної енергії забезпечується застосуванням миючих засобів, кислотних розчинів та синтетичних миючих засобів.

Ефективність очищення залежить від властивостей поверхні деталі, характеру забруднень, розміру часток піску або металевого дробу, швидкості та кута нахилу струменя, відстаней від сопла до поверхні, що очищається та інших факторів.

У зв'язку з ускладненням виробів сучасного машинобудування, підвищенням вимог до їх точності і надійності, з удосконаленням технології виробництва істотно

зросли вимоги до якості очищення. Від досконалості застосовуваних технологічних процесів очищення та підготовки поверхні істотно залежить якісне очищення виробів різних галузей промисловості. Сучасні способи очищення поверхні виробів передбачають комплексну механічну, хімічну і фізико-хімічну взаємодію активного середовища з забрудненнями і поверхнею, що очищується.

Високоякісне очищення деталей – досить складна і дуже трудомістка операція. Вона здійснюється за допомогою спеціальних миючих засобів, що мають здатність розм'якшувати і розчиняти забруднення та видаляти їх з очищуваної поверхні.

Для здійснення очищення поверхонь від забруднень використовується також певне миюче обладнання [146, 151, 152, 153, 177].

За принципом дії миючі машини поділяють на струменеві, щіткові, циркуляційні, комбіновані і спеціальні [146, 151].

Фізико-хімічний фактор впливу водних розчинів миючих засобів у струменевих миючих машинах доповнюється механічними діями (ударами) струменя на видалення забруднення [177]. В якості миючого засобу застосовується вода або водні розчини. Для формоутворення струменів використовують різного роду насадки, а створення тиску – відцентрові, плунжерні й інші насоси.

У процесі виготовлення, експлуатації й ремонту машин, вагонів та інших виробів автори у праці [157] звертають увагу, що проводиться очищення деталей і складальних одиниць для забезпечення якості й надійності виробів, а також дотримання відповідних технологічних, естетичних і санітарно-гігієнічних вимог.

Також відзначено, що багатостадійне очищення вагона є важливим елементом виробничої культури кожного вагоноремонтного підприємства. Воно забезпечує на виробничих ділянках вагоноремонтних підприємств нормальні умови праці на рівні сучасних санітарно-гігієнічних вимог. Без належного очищення не можна якісно оглянути деталі – виявити пошкодження або визначити ступінь зносу, установити можливість відновлення деталей або необхідність їх заміни.

При усуванні корозійного нашарування, очищення запобігає подальшому розвитку корозії та зберігає лакофарбові покриття від передчасного старіння.

Тому перед подаванням у ремонт повинно проводитися ретельне очищення вагона у нерозібраному виді, а потім у процесі розбирання та ремонту – очищення його складових частин.

Важливим при розгляді ефективності очищення поверхонь є витрати енергії на руйнування забруднень. Дане питання розглянуто у [144] . Зауважено, що умова очищення поверхні під впливом фізико-хімічної енергії відбувається за рахунок молекулярних перетворень, розчинення, емульгування, диспергування хімічного травлення забруднень і очищуваної поверхні та інших процесів.

Реалізація даної енергії забезпечується застосуванням миючих засобів.

Автором Богдановим В. С. у праці [164] запропоновано обладнання для очищення і запобігання забруднень стінок ємностей, більш конкретно до систем очищення і утилізації залишкових забруднень з резервуарів для зберігання і транспортування нафтопродуктів, яке може знайти застосування в нафтовій, транспортній, хімічній промисловості. Винахід забезпечує підвищення ефективності очищення резервуарів, а також очищення та утилізації нафтових залишків, миючого розчину і залишкових забруднень з резервуарів. В системі очищення резервуарів, що включає засоби для приготування миючого розчину, гідродинамічного очищення резервуару і виведення залишкових забруднень, блоки живлення та управління, згідно винаходу, введені засоби для очищення та утилізації залишків нафтопродуктів, миючого розчину і забруднень.

Особливості системи підготовчих робіт та ремонту вагонів за кордоном відображені у працях [142,162,163,164,172].

У праці [142] автор відзначає, що формування та вдосконалення систем підготовчих робіт та ремонту вагонів за кордоном ведеться з урахуванням умов експлуатації, такі як належність до різних компаній, як залізничним, так і не залізничним та режимів експлуатації. Враховуються показники надійності вагонів, інтенсивності поповнення парку вагонів удосконалими та модернізованими вагонами.

Автори у праці [162] аналізують, що очищення обладнання вказаного типу використовується для очищення баків, коли вони порожні, і зможуть бути

налаштовані відповідно до програми, яка попередньо встановлена з точки зору часу, а також вибору методу очищення.

Також автори пропонують обладнання, яке може бути встановлене на постійній основі, або воно може бути встановлене, коли введена в експлуатацію. Фактичне очищення складається з розпилення миючої рідини з одного або декількох рухливих сопел, так що весь залишок із внутрішньої частини резервуара продувають при відповідній траєкторії очищення, щоб забезпечити ефективне очищення при мінімальній витраті миючої рідини.

Найбільшого поширення за кордоном отримав дробометний спосіб очищення [172] металу, як більш продуктивний і виключає сильне пилоутворення, що характерно для піскоструминного способу. Очищати дробом рекомендується лиття, поковки, профільний прокат і листовий матеріал, для останнього застосовується дріб діаметром до 1 мм. Як матеріал для очищення поверхонь за кордоном застосовують замість чавунної сталеву дріб або різаний дріт, що значно підвищує продуктивність.

При підготовчих роботах рухомого складу у Німеччині, автор у праці [163] підкреслює, що для видалення залишків транспортованих хімічно активних речовин і мінеральних мастил потрібно цистерни в більшій або меншій степені нахилити.

Удосконалення методів очищення внутрішніх поверхонь цистерн від залишків вантажів.

Очищення поверхонь цистерн є важливою підготовчою операцією при ремонті вагонів.

Методам очищення поверхонь від забруднень, у тому числі поверхонь вагонів-цистерн присвячені наступні праці [84, 157, 165-171].

Так, у праці [84] автор відзначає, що методам очищення поверхонь цистерн приділяється особлива увага перед ремонтними роботами.

Автор розглядає основні технічні засоби, такі як мийні установки та апарати для мийки, від яких залежить ефективність і якість промивання котлів цистерн. Також автор зазначає, що на ефективність очищення впливає одночасно багато факторів: енергія

гідродинамічного впливу, геометричні параметри струменю, віддаленість стінки від миючого сопла, хімічний і фізичний склад.

У праці [157] автори відзначають, що очищення цистерн встановлюється типовими технологічними процесами за повним або скороченим циклом обробки. Повний цикл передбачає видалення залишків вантажів з попереднім прогрівом парою в'язких продуктів з метою їх розм'якшення, гаряче промивання або пропарювання і просушування. За скороченим циклом видаляють залишки вантажів і просушують або протирають цистерни.

Автори вважають за потрібне відзначити, що сучасний технологічний процес передбачає об'єднану однопозиційну технологію, коли пропарювання і гаряче промивання здійснюють на одній естакаді. Цим зменшується простір цистерн, трудомісткість і вартість обробки та витрати тепла.

Більш прогресивною технологією є безпропарювальна обробка цистерн, у тому числі і з-під в'язких нафтопродуктів. Вона вимагає наявності ефективних промивних пристроїв і підвищеної потужності насосного устаткування.

Також автори зазначають, що є ручні методи очищення поверхонь цистерн. Так при промиванні вручну промивальник послідовно подає в котел шланг для пропарювання залишків вантажу, промивний прилад, шланг для подачі стисненого повітря або пари для просушування котла.

Автори акцентують увагу також, що дегазацію котла виконують для зниження концентрації вибухонебезпечних продуктів і здійснюють природним провітрюванням при відкритих кришці люка і зливному приладі за допомогою комбінованого приладу від компресорної установки або вентиляванням з переносними пароежекторами. Після дегазації перевіряють газоповітряне середовище в котлі за допомогою газоаналізаторів. Дегазація обов'язкова перед поставленням цистерн у ремонт із виконанням зварювальних або клепальних робіт.

Питання удосконалення методів очищення поверхонь цистерн від залишків вантажів висвітлені у працях [22,76,85,97,114].

Зокрема автор зазначає, що підготовка до ремонту поверхні кожної окремо взятої деталі або конструкції вагону зв'язана у першу чергу з процесом їх очищення, тобто видалення шкідливих або небажаних нашарувань (забруднень), різних за своєю природою

та властивостями. Крім того, цей процес пов'язаний із підготовкою поверхні кузовів вагонів і його окремих вузлів до повторного покриття захисними антикорозійними і лакофарбовими матеріалами.

Запропоновані Куліченком А.Я. методи поверхневої обробки, пристрої та інструменти дозволяють здійснювати очищення не лише вантажних засобів залізничного транспорту, а й видаляти утворені атмосферні кислотно-солеві та органічні осади з поверхні великогабаритних металевих конструкцій (металеві конструкції залізничних мостів; опори ліній електропередач; ферми перекриття вокзальних перонів і естакад ремонтних дільниць депо; вагони метрополітену, міського авто- і електротранспорту; ажурних металевих конструкцій ангарів тощо), так і оброблення незначних за розмірами деталей на етапі викінчувального технологічного процесу з метою підготовки поверхні для нанесення антикорозійного покриття.

Крім того Куліченком А.Я. передбачено очищення поверхонь виливок та поковок від литтєвого та ковальського пригару і товстого шару окалини, обробка зварних швів кузовів вагонів, котлів залізничних цистерн тощо.

Шляхи удосконалення засобів технічної діагностики цистерн.

Технічне діагностування є важливим етапом передремонтного процесу. Розвитку засобів технічної діагностики вантажних вагонів, зокрема вагонів-цистерн присвячені праці [84, 142, 146, 149, 150, 160, 161].

У праці [142] автор аналізує методи неруйнівного контролю в залежності від фізичного явища, яке покладено у основу контролю. Також розділяє їх на види: магнітний, акустичний, проникаючими речовинами, вихрострумовий та ін.

Автор перелічує поширені дефекти у відливках. Це, насамперед ливарні тріщини, газові і шлакові раковини, неметалеві включення і т.д. Також автор зазначає, що в процесі експлуатації в деталях вагонів виникають втомні тріщини, які розвиваються непомітно і призводять до зломів деталей.

Автор у праці [84] зазначає, що метою діагностування є оцінка загального технічного стану цистерн, на основі якого здійснюється прогнозування залишкового ресурсу цистерни та окремих її вузлів, визначається необхідність і обсяг технічного

обслуговування та ремонту. Також проводить визначення нормативних значень параметрів цистерн. При номінальному значенні – це значення параметра нової цистерни або цистерни, що пройшла капітальний ремонт. При допустимому значенні – умовна межа несправностей.

Також автор підкреслює, що основу системи методів діагностування становлять методи неруйнівного контролю. Вибираючи їх для діагностики цистерн, необхідно враховувати такі основні фактори: характер (вид) дефекту (тріщини, корозійні пошкодження і т.д.); місце розташування дефекту (поверхневий, внутрішній); умови роботи вузла (характер зовнішніх навантажень, температурні умови, і т.д.); матеріал деталі; стан і якість обробки поверхні; форма і розмір вузла; доступність для контролю. Значну частину параметрів можна діагностувати тільки візуальним методом. До них відносяться великі механічні пошкодження кожуха, люка, зливних пристроїв, кришок кожуха ізоляції і т.д.

У праці [150] автор розглядає основні поняття, терміни та визначення теорії надійності, що стосуються забезпечення надійності рухомого складу. Автор охарактеризовує специфіку задач забезпечення надійності вагонів з урахуванням знесобленого характеру експлуатації та викладає основні теоретичні положення кількісного оцінювання показників надійності вагонів, їх вузлів і деталей.

Галкіним В.Г. у роботі [160] наведено процес функціонування відновлюваного об'єкта. Його, автор представляє як послідовність інтервалів, що чергуються, – працездатності та відновлення (простою).

Також автор детально приводить поняття коефіцієнта готовності, який визначається за формулою:

$$K_g = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n \tau_i}$$

де – $t_1 \dots t_n$ – інтервали працездатності; $\tau_1 \dots \tau_n$ – інтервали відновлення, та являє собою імовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта по призначенню

не передбачається. Автор зазначає, що цей показник одночасно оцінює властивості безвідмовності та ремонтпридатності об'єкта.

Автор у праці [161] зазначає, що розробка діагностичного забезпечення об'єкта ґрунтується на сукупності правил і методів дослідження об'єкта діагностування. Кінцевим результатом розробки діагностичного забезпечення об'єкта є інформація, необхідна для проектування засобів технічної діагностики та пристосування об'єкта до виконання діагностичних операцій. З діагностичного забезпечення окремих систем складається діагностичне забезпечення об'єкта в цілому.

Діагностичне забезпечення об'єкта містить у собі перелік діагностичних параметрів, методи їхньої оцінки, умови працездатності та ознаки наявності дефектів в об'єкті, алгоритми та програму діагностування, показники контролепридатності об'єкта та ефективності процесу діагностування.

Також, автор зазначає, що діагностичне забезпечення об'єкта базується на результатах побудови та аналізу однієї або декількох діагностичних моделей (ДМ) об'єкта. Діагностична модель об'єкта – формальний його опис, що враховує можливість зміни стану.

На системному рівні в основу побудови ДМ покладений розподіл складної структури об'єкта на окремі системи різного рівня супідрядності. Модель об'єкта відображає співвідпорядкованість ДМ окремих його систем.

У праці [146] авторами відзначено, що забезпечення якісного ремонту вагонів у відповідності з вимогами типових технологічних процесів ремонту неможливо без використання відповідного ремонтного обладнання та засобів контролю.

Детального контролю дотримання технології ремонту на вагоноремонтних підприємствах немає, відзначає автор у праці [149], і це означає, що неможливо перевірити якість ремонту і стан всіх критичних вузлів і деталей вагонів. В таких умовах гарантія на якісний плановий ремонт не забезпечується. Тому на сучасному етапі автор пропонує впровадити на вагоноремонтних підприємствах керування якістю ремонту вагонів, заміну візуального контролю на інструментальний, удосконалювання засобів виміру з погляду підвищення точності й автоматизації

вимірів, впровадження стендів для випробування окремих вузлів, автоматизації запису результатів вимірів з переходом до безпаперових технологій.

Таким чином проведений аналіз літературних джерел показує що питанню технології очищення поверхонь вагонів-цистерн приділяється недостатня увага, хоча відзначається актуальність даного питання.

З огляду вищевказаних праць технологічні процеси підготовчих робіт, а саме очищення поверхні цистерн, у більшості пов'язують із використанням хімічних засобів та піноутворюючих розчинів.

Для покращення ситуації у даному напрямку проаналізуємо технічний стан ремонтного виробництва та процесу підготовки вантажних засобів залізничного транспорту, технічні характеристики вагонів-цистерн для перевезення швидкотверднучих вантажів, фізико-механічні та хімічні властивості швидкотверднучих речовин, а також існуючі на практиці процесів підготовки вагонів під завантаження вантажів, які тверднуть.

1.2. Аналіз технологічних процесів підготовки вагонів-цистерн у ремонт та в експлуатацію

В умовах розвитку ринкових відношень для підприємств залізничного транспорту необхідною основною метою діяльності є якісне обслуговування вантажовласників – споживачів транспортної продукції. За умов скорочення об'єму перевезень та зростання рівня конкуренції із сторони інших видів транспорту (у першу чергу автомобільного) залізничному транспорту для отриманні прибутку необхідно застосовувати нові технології.

Для підвищення стійкості функціонування залізничного транспорту на даний час необхідно вирішити задачі по вдосконаленню керування процесом перевезень, підвищенню дохідності галузі, яка в першу чергу тісно пов'язана із ефективністю та якістю проведення робіт процесу підготовки вантажних засобів залізничного транспорту для повторного їх завантажування.

На вагоноремонтних підприємствах України підготовка до завантаження вагонів-цистерн вантажами, які тверднуть включає цілий ряд технологічних операцій (рис. 1.1), необхідних для гарантування її безпеки, недопущення забруднення

продукту або змішування його із залишками раніше транспортованого вантажу, ізоляції вантажу від впливу оточуючого середовища, справності ходових частин, приладів і обладнання для цистерн.



Рис. 1.1. Дільниці вагоноремонтних депо ВЧД-2 станції Дрогобич, ВЧД-4 станції Клепарів та ВЧД-10 станції Ужгород (Львівська залізниця).

При підготовці цистерн до завантаження виконується її технічне обслуговування з регулювання, ремонту та заміни вузлів і деталей. При цьому можливе відправлення цистерни в той або інший вид ремонту, проводиться очищення та дегазація котлів цистерн, які проводяться на певному

технологічному обладнанні у відповідно відведених зонах вагоноремонтного підприємства [75].

Набір операцій, які входять у перелік підготовки під завантаження кожної окремо взятої цистерни, є доволі різноманітним за своїм складом і загальною сумарною працемісткістю, він залежить від типу цистерни та її призначення. У залізничних вагоноремонтних депо сконцентровані потужності, здатні сприяти технічному підготовчому обслуговуванню вагонів, а у випадках необхідності – і по їх ремонту. У зв'язку із цим технологічні операції підготовки вагонів-цистерн під завантаження є одночасно підготовчою частиною ремонтного процесу.

Враховуючи те, що прибуття цистерн із вантажами, які тверднуть у пункти їх призначення носить випадковий стохастичний характер, повторне їх використання можливе і для транспортування інших, спорідненими за своїми властивостями, вантажами, що в свою чергу спонукає на станціях завантаження здійснювати ретельну підготовку порожнин котлів цистерн під новий продукт перевезення, оскільки за період їх транспортування відбувається певне накопичення застиглого осаду.

У вагоноремонтних депо технологічний процес підготовки цистерн починається із того, що партія цистерн, які надійшли проходять технічний огляд [77,78,158], згідно яких встановлюються:

- їх справність з точки зору придатності для наступного завантаження, можливості протікання, герметичність з'єднань, цілісність кришок та обладнання котлів;
- вид вантажу, який попередньо перевозився та у разі необхідності проведення його лабораторного аналізу;
- кількість застиглого осаду та необхідність додаткового зливу вантажу, придатність цистерни для її заповнення новим вантажем без додаткового очищування та переробки;
- кількість залишків та обсяг виконання необхідних робіт по їх видаленню та промивання.

Частина цистерн відразу ж направляється під завантаження, інша, із незначною ступінню забрудненості, йде на холодну обробку (без нагрівання до температури

більшої 80°C [75]), решта – під гарячу обробку із застосуванням для очищення розігрітого пару або води.

У промивально-пропарювальному секторі депо виконуються наступні підготовчі технологічні операції з очищування порожнин котлів вагонів-цистерн: зливання залишків або видалення застиглого осаду вантажу, промивання, пропарювання, дегазація котлів, сушіння та протирання цистерн, очищення та миття зовнішньої поверхні цистерн.

Як видно із представленого, технологічний процес підготовки вантажних засобів транспорту є доволі складним, трудомістким і енергоємним. Для прикладу наводимо Основні техніко-економічні показники роботи промивально–пропарювальної станції вагонного депо Дрогобич [158]:

Потужність промивально-пропарювальної станції:

річна – 63080 цистерн

добова – 190 цистерн

кількість робочих позицій – 12 позицій

Потужність зовнішньої обмивки цистерн – 138 цистерн/доба

кількість робочих позицій – 2 позиції

Розрахункова чисельність штату ППС – 91 чол.

Трудомісткість обробки однієї цистерни:

з-під темних під світлі нафтопродукти – 45 люд/хв.

з-під світлих під світлі нафтопродукти – 40 люд/хв.

Площа ділянки – 3,50 га

Площа забудови – 13600 м²

Споживання ресурсів:

вода питна – 9,69 м³/год.

вода технічна – 10,7 м³/год.

газ – 1330 м³/год.

електроенергія – 4052740 кВт.год/рік

пара – 5,82 т/год

Аналіз сьогоденного впровадженого технологічного процесу підготовки вантажних засобів залізничного транспорту, його технічного стану та обладнання у більшості своїй ґрунтуються на застосовуванні промивально-пропарювального процесу із необхідністю використання значних фінансових витрат на енергоносії. Особливо розміри цих витрат зростають в зимовий період року, коли необхідно процес холодної обробки здійснювати попередньо підігрітою водою. Тривалість процесу миття визначається особливостями підготовки цистерн (табл. 1.1) [75].

Характеристики тривалості процесу миття та витрати пару.

Таблиця 1.1.

Вид обробки цистерн	Час пропарки, хв	Витрати пару, кг
Підготовка цистерни:		
- із під темних під світлі нафтопродукти	30,0	200,0
- із під світлих нафтопродуктів під світлі вищих сортів	20,0	50,0
- із під етилованого бензину під не етиловані нафтопродукти	20,0	50,0
- із під бітуму під темні нафтопродукти	90,0	480,0

Крім того, ефективне застосовування існуючих на даний час технологічних процесів підготовки вагонів-цистерн пов'язане із застосуванням дорогого обладнання промивально-пропарювальної станції, обладнання необхідних електро-, водяних- та каналізаційних комунікацій, утримування значних за кількістю кваліфікованих робочих кадрів.

1.3. Технічні характеристики вагонів-цистерн для перевезення вантажів, які тверднуть

Згідно [84] вагон-цистерна — вид вантажного рухомого складу залізничного транспорту. Цистерни призначені для перевезення рідини: нафти та продуктів її переробки, хімічно-активних та агресивних рідких речовин (кислоти, луки, складні органічні речовини тощо), розрідженого газу (пропан-бутан, кисень) води, молока (молоковози), патоки. Вагони-цистерни використовуються також для перевезення муки (муковози) та цементу.

Масштаби народногосподарської проблеми, пов'язаної із перевезенням вантажів у залізничних цистернах, характеризується залученням значних за обсягом виробничих потужностей виробника цього виду рухомого складу (рис.1.2), а також експлуатаційних та ремонтних підприємств. Переваги у застосовуванні цистерн для перевезення широкої номенклатури наливних, пиловидних, тверднучих вантажів і газів є очевидними, оскільки при цьому суттєво скорочується час на технічну та комерційну обробку залізничного составу, вдосконалюється механізм вантажно-розвантажувальних робіт, забезпечується більша у порівнюванні з іншими видами рухомого складу безпека транспортування вогнебезпечних, токсичних, ядовитих вантажів, покращуються екологічні характеристики транспортно-технологічного процесу.

Одна із різновидностей цистерн призначена для транспортування вантажів, які тверднуть (рис. 1.3) наприклад, розплавленої сірки, кам'яновугільного пеку, капролактаму, сульфанола жовтого фосфору, суперфосфорної кислоти тощо [80,81].

Конструкції залізничних цистерн даного виду (рис. 1.4) мають котел, термоізоляцію котла, засоби розігрівання (рис. 1.5 *а* та рис. 1.5, *б*), зовнішній трап (рис. 1.6); котел включає в себе циліндричну обичайку та еліптичне дно, у верхній частині котла розташовані люки із кришками (рис. 1.7), допоміжний та оглядовий (рис. 1.8) люки, зливна та наливна труби, термоізоляція котла складається із кожуха термоізоляції та зовнішнього кожуха, між якими розташовується теплоізоляційний матеріал, каркас кожуха складається із приварених до котла кронштейнів, на яких закріплені чотири опорні пояси, і торцевих поясів днища. В якості теплоізоляційного матеріалу вибрані термостійкі мати СТВ (ТУ 21-224-75) та мати із скляного штапельного волокна ЦДФ (ТУ 21-80-77) [84]. Між опорами поясів на поздовжніх кутниках закріплені помости трапу, а у нижній частині котел оснащений нішами для встановлення електронагрівачів засобів розігрівання. Установка для розігрівання тверднучого вантажу складається із електричних нагрівачів І типу ТЕН-200 Д-13/2,5 Т 220 (ТУ 16-531-662-79) [84].

Зовні вагон-цистерна закрита зовнішнім кожухом ізоляції, який складається із окремих листів, стягнутих з обох сторін із кутниками каркасу кожуха термоізоляції.



Рис. 1.2. Загальний вигляд станційної колії на дільниці перевезенням вантажів у залізничних цистернах.



Рис. 1.3. Вигляд залізничної цистерни для транспортування тверднучих вантажів.

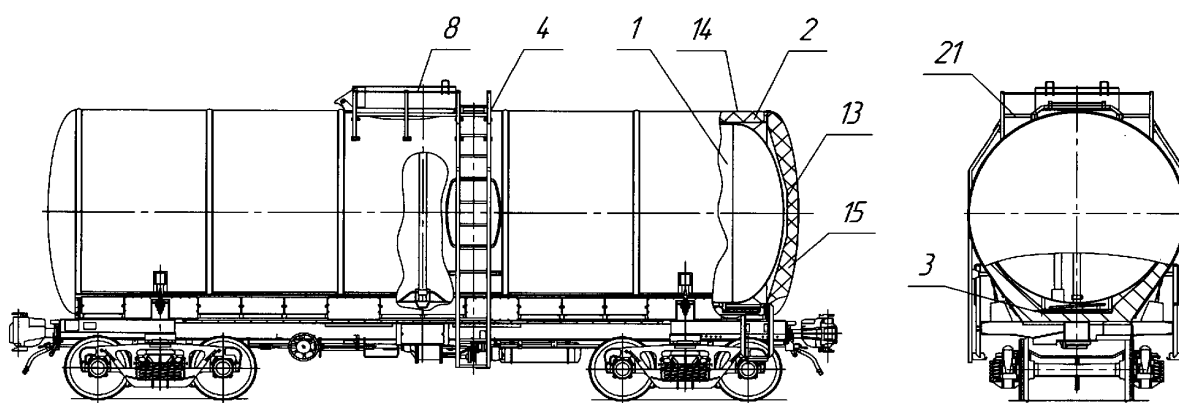


Рис. 1.4. Схема залізничної цистерни для транспортування тверднучих вантажів:
1 – котел цистерни; 2 – термоізоляція котла; 3 – засіб розігрівання; 4 – зовнішній трап; 5 (8) – кришка люку; 6 (13) – кожух термоізоляції; 7 (14) – внутрішній кожух; 8 (15) – теплоізоляційний матеріал; 9 (21) – поміст біля люку.

Електричні нагрівачі об'єднані у з'ємні секції і встановлені під донною частиною цистерни, де передбачений повітряний зазор між котлом і кожухом термоізоляції. До торцевих поясів каркасу кожуха термоізоляції жорстко закріплені донні частини зовнішнього кожуха, який виготовлений із склопластика, а радіальні стики днища зовнішнього кожуха закриті хомутами, при цьому форми днища зовнішнього кожуха виконані еліптичної форми і геометрично повторюють форму донної частини котла цистерни.

Вагони-цистерни для перевезення вантажів, які тверднуть відносяться до групи як 4-, так і 8-вісних. Всі цистерни, як вже наводилось вище, оснащені засобами термоізоляції та розігрівання вантажу перед його зливанням. Так, наприклад, цистерни для рідкого кам'яновугільного пеку вантажепід'ємністю 63,0 т. моделі 15-1532 забезпечують збереженість вантажу у рідкому стані при температурі заливання 250°C і оточуючого середовища -30°C на протязі 5 діб [82]. У табл. 1.2 наведені технічні характеристики котлів залізничних цистерн, призначених для перевезення вантажів, які тверднуть [86].

1.4. Фізико-механічні та хімічні властивості речовин, які тверднуть

Речовини мають здатність перебувати у твердому (вугілля, сланці, тверді бітуми), рідкому (нафта, рідкі бітуми) та газоподібному стані (газ, газоконденсат). В залежності від топології будови вуглецевого скелету вуглеводні поділяються на ациклічні та карбоциклічні. Концентрація розсіяної речовини у гірських породах здебільшого не переважає (1...5) %, концентрованої органічної речовини – у вугіллі (50...100) %, вуглецевих та горючих сланцях (20...50) %, нафтових і газоконденсатних накопиченнях (5...8) % [88,89].

Тверднучі речовини, до яких відносяться не лише кристалічні але й аморфні тіла, а також – будь-які інші, що мають органічну природу та здатність зберігати форму. Це – моно- та полікристали, рідкі кристали, порошки, в тому числі – нанорозмірні, полімери та низькомолекулярні з'єднання тощо [91].

Технічні характеристики котлів цистерн для перевезення вантажів, які тверднуть

Таблиця 1.2.

Вантаж	Модель цистерни	Параметри котла вагона-цистерни					
		Місткість, m^3		Діаметр внутрішній, мм	Довжина, мм	Матеріал	Товщина, мм
		повна	корисна				
Рідкий пек	15-1532	54,4	54,4	2600	10630	09Г2С	8,0; 11,0
Рідка сірка	15-1480	31,8	31,1	2000	10414	ВСт3сп5+ +12Х18Н10Т	8,0; 11,0
	15-1482	38,5	37,6	2200	10430	09Г2+ +12Х18Н10Т	8,0; 11,0
Капролактам	15-1552	55,2	49,5	2600	11300	08Х22Н6Т ВСт3сп5	8,0; 10,0
Паста сульфанола	15-1417	61,2	59,7	2800	10300	08Х22Н6Т;	9,0; 11,0
	15-1565	55,2	55,0	2600	10760	ВСт3сп5+ +12Х18Н10Т	8,0; 10,0
Суперфосфорна кислота	15-889	63,1	63,0	2300	14692	Сталь вуглецева	7,0; 8,0
	15-1578	63,1	63,0	2300	14692	Сталь легована	8,0; 9,0

До складних кристалічних речовин, які виражені у гетерогенній системі високо конденсованих карбо- та гетероциклічних з'єднань та продукти їх ущільнення, які відрізняються ступенем ароматичності, складом, властивостями, молекулярною структурою, а відповідно і відношенням до розчинників, слід віднести в'язучі та швидкотверднучі речовини, такі як (рис. 1.9): кам'яновугільний та нафтовий пеки, рідка сірка, капролактам, паста сульфанола, суперфосфорна кислота, нафтобітум, жовтий фосфор, рідкі нафтопродукти, олеум та ряд інших матеріалів [90,91,92,93].



а)



б)

Рис. 1.5. Засоби розігрівання котла вагона-цистерни.



Рис. 1.6. Зовнішній трап цистерни.



Рис. 1.7. Оглядовий та допоміжний люки.



Рис. 1.8. Оглядовий люк цистерни.

Згідно [94,95], *пек* – залишки від перегонки смол (коксування, напівкоксування, сланцевої, піролізної тощо) або дьогтю (торф'яного, деревинного представляє собою тверду (іноді густу в'язку) масу чорного кольору.

У складі кам'яновугільного пеку (рис. 1.9,*a*) переважають високомолекулярні ароматичні вуглеводні; у його складі присутні вищі феноли. Нерозчинна частина включає вільний вуглець (8,0...30) %, попіл (0,2 % і більше) та асфальтени. Однорідна за зовнішнім виглядом речовина чорного кольору із блискучим раковинним надломом. Елементний склад (%): (92...93)*C*, (4,3...4,7)*H*, (0,3...0,85)*S*, (1,7...1,8)*N*, (0,8...1,0)*O* [11,14,15,19].

Найбільш важливим для технологічного застосовування властивостями пеку є його густина, в'язкість, поверхневий натяг, термостабільність, а також здатність давати коксовий залишок. Ці властивості у пеків з різною температурою розм'якшення (від 60 до 300⁰C) [101] є неоднаковими і залежать від якості сировини та умов отримування пеку. На фізико-хімічні властивості середньотемпературного пеку в основному впливають склад смоли та умови її дистиляції. Якісні показники пеків з високою температурою розм'якшення (> 100⁰C) залежать від методу та технології отримування пеку. В першу чергу від степені термічного впливу. В загальному, густина кам'яновугільного пеку становить (1,2...1,3) г/см³ [100].

Кам'яновугільний пек не має певних температур плавлення та затвердіння; плавиться в інтервалі, що характеризується температурою розмягчення. Розрізняється пек: середньотемпературний із температурами розмягчення (65...90)⁰C та плавлення (200...250)⁰C із виходом летючих речовин, утворених при температурному розкладанні – (53...63) %; високо температурний відповідно (135...150)⁰C, (360...400)⁰C, (43...54) % [102,104].

У залежності від вихідної сировини розрізняють пек кам'яновугільний, торф'яний, деревний, нафтовий. У складі кам'яновугільного пеку переважають високомолекулярні ароматичні вуглеводні та містяться вищі феноли. Нерозчинна частина містить вільний вуглець, золу та асфальтени. Щільність пеку – 1,2...1,3 г/см³. [93,96,105].

У народному господарстві кам'яновугільний пек застосовують при виробництві пекового коксу, при будівництві автодоріг, для виготовлення толю та руберойду. Вуглецевий пек використовується в якості вихідної сировини для отримання вуглецевих волокон [109,110].



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1.9. Речовини, які тверднуть: а) кам'яновугільний пек; б) сірка; в) капролакта́м; г) паста сульфано́ла; д) суперфосфо́рна кислота

Згідно [111], *сірка* являє собою тверду крихку речовину жовтого кольору (рис.1.9, б). Вона практично є нерозчинною у воді, не змочується водою і не плаває на її поверхні. Завантажування та транспортування засобами залізничного транспорту сірки здійснюється у її рідкому стані. Рідка сірка має незвичні властивості: із підвищенням температури її в'язкість зростає. Нижче 160°C сірка – типова рідина жовтого кольору. Із підвищенням температури колір рідкої сірки стає темно червоним, в'язкість зростає, досягаючи свого максимуму при $(200...250)^{\circ}\text{C}$. При подальшому підвищенні температури колір рідкої сірки стає світлішим із зменшенням її в'язкості (рис. 1.9, б). Фізичні властивості сірки змінюються в залежності від температури нагрівання у наступних межах: густина $(2,07...1,96) \text{ г/см}^3$; температура плавлення – $(112,8...119,0)^{\circ}\text{C}$; температура кипіння $444,6^{\circ}\text{C}$; при температурі вищої 1500°C молекули сірки дисоціюються на атоми [113,115].

Основним споживачем сірки є хімічне виробництво. Вона необхідна для виготовлення сірчаної кислоти, фарбників, сульфідів, у целюлозно-паперовій, текстильній та інших галузях промисловості. Біля $(10...15)\%$ всієї отриманих сірки та технічної сірки йде на нужди сільського господарства в якості сировини для виробництва пестицидів для захисту рослин від шкідників. Також сірка в 10% свого випуску застосовується у процесі вулканізації гуми [115,116].

Згідно [118] *капролакта́м* –з'єднання, яке отримується методом синтезу із ароматичної (бензолу, фенолу, толуолу) та неароматичної (бутадієн, фурфурола, етиленоксид) вуглецевої сировини (рис. 1.9, в). Речовина кристалічного білого кольору, що добре в розчинниках (спирт, ефір, бензол, водні розчини кислот та лугів). У промисловості для виробництва капролактама вихідною сировиною є бензол. Фізичні властивості даної речовини наведені у табл. 1.3 [119].

Капролакта́м використовується, в основному, для отримання поліамідних пластмас, волокон. Основна частина світового споживання приходить на нитки та волокна, значна кількість використовується також у виробництві конструкційних

пластмас. Решта об'єму даної органічної речовини припадає на виготовлення пакувальних плівок та інших матеріалів.

Поліамідні волокна та нитки застосовуються у виробництві текстилю, килимових покриттів, промислових ниток, які застосовуються при виготовленні шинного корду. Найбільший обсяг капролактаму йде на синтез лізіна, а також в якості агента у виробництві поліуретану.

Згідно [120] *жовтий фосфор* – дуже сильно ядовита (гранично допустима концентрація у повітрі робочої зони – $0,0005 \text{ мг/м}^3$), вогнебезпечна кристалічна речовина жовтого кольору. Питома вага $1,83 \text{ г/см}^3$, плавиться при температурі $+34^\circ\text{C}$, кипить при $+280^\circ\text{C}$. У воді не розчиняється, а на відкритому повітрі легко окислюється та самоспалахується, при цьому горить сліпучим яскраво-зеленим полум'ям із виділенням густого білого диму.

Фізичні властивості капролактаму

Таблиця 1.3.

Фізичні властивості	Одиниця вимірювання	Значення
Молекулярна маса	–	113,6
Температура плавлення	$^\circ\text{C}$	68,8
Температура кипіння	$^\circ\text{C}$	262,5
Температура самоспалаху	$^\circ\text{C}$	400,0
Гранично допустима концентрація у повітрі робочої зони	Мг/м^3	10,0
Теплоємність при 70°C	кДж/(кг K)	1,76
Густина при 70°C	г/см^3	1,02
Критичний тиск	Па	$47,62 \cdot 10^5$

Основна маса виготовленого фосфору перероблюється в фосфорну кислоту, на основі якої отримують фосфорні добрива та технічні солі (фосфати). Крім того, дана речовина застосовується в сірниковому виробництві; при одержанні сплавів кольорових металів, де слугує в якості розкислювача, введення 1,0 % якого сприяє

зростанню жароміцності таких сплавів, як фехраль, хромаль тощо. Фосфор входить також до складу ряду бронз, оскільки він підвищує їх рідко текучість та стійкість до стирання [122].

Згідно [122] *паста сульфанола* – речовина, отримана із сульфанола, який являє собою сипучий гранульований порошок від жовтого до світло-коричневого кольору (рис. 1.9, з), без запаху або із слабким запахом гасу; вміст натрієвих солей алкилбензолсульфокислот не менше 80 %, сульфата натрія не більше 15 %. Він досить добре розчиняється у дистильованій воді, а у жорсткій воді випадає осад. Водні розчини мутніють у присутності $NaCl$, солей алюмінію та барію.

Паста сульфанола застосовується при виготовленні порошковидних синтетичних миючих засобів, а також у інших галузях промисловості в якості поверхнево-активної речовини. Крім того, дану пасту застосовують як змочуючу, миючу та емульгуючу речовину. У текстильній промисловості – в процесах підготовки та переробки волокон і при його фарбуванні та оздобленні полотна.

Паста сульфанола широко використовується в нафтогазовидобувній промисловості для збільшення віддачі пластів [123].

Згідно [123] *суперфосфорна кислота* – це комерційна назва поліфосфорних кислот, що застосовуються у хімічній промисловості (рис. 1.9, д).

Суперфосфорна кислота, що містить усього 0,1 – 0,3% фтору, придатна для виробництва кормових фосфатів і виготовлення зубних цементів. Зазвичай ці продукти отримують з більш дорогої термічної кислоти.

Суперфосфорна кислота з концентрацією 75% P_2O_5 містить 49% P_2O_5 у вигляді ортофосфорної, 42% – у вигляді пірофосфорної, 8% у вигляді триполіфосфорної і 1% – у вигляді тетраполіфосфорної кислот. При розведенні суперфосфорної кислоти водою відбувається значне виділення тепла та поліфосфорні кислоти швидко гідротуються до ортофосфорної.

Суперфосфорна кислота менш агресивна по відношенню до металів і сплавів, ніж ортофосфорна кислота, і також є цінною сировиною для отримання висококонцентрованих добрив [124].

1.5. Аналіз існуючих на практиці процесів підготовки вагонів під завантаження вантажів, які тверднуть

В залежності від технологічного процесу розвантажування залізничних вагонів-цистерн механізована обробка даних вантажних засобів транспорту на промивально-пропарювальних станціях здійснюється проведення цієї виробничої операції за допомогою необхідних технічних засобів, до яких слід віднести системи для подачі теплоносіїв у засоби підігрівання вантажу, зливна та газова комунікації, засоби для відбору проб та ряд іншого обладнання. Окремі елементи процесу розвантаження передбачені безпосередньо в конструкціях цистерн.

Технологічний процес розвантаження визначається прийнятим способом вивантажування продукції: через зливний прилад, передавленням, аеропневматичним або сифонуванням [78,127]. На цистернах, які обладнані засобами підігрівання вантажу, перед вивантажуванням продукт розігрівається, що викликано температурним режимом транспортування даного виду вантажу. Однак, незалежно від технології вивантажування продукту виконуються обов'язкові загальні операції [134,135]:

- подача цистерн на пункт розвантаження;
- контроль технічного стану цистерни;
- підготовка вагона-цистерни до розвантаження (заземлити, відкрити кришку, взяти пробу, розігріти вантаж у котлі тощо);
- під'єднання комунікацій пункту вивантаження до елементів засобів розвантаження цистерни;
- розвантажування із одночасним контролем параметрів (тиску, температури, контролю зливу).

Конструктивно-технічні параметри розвантаження цистерн для транспортування різних за властивостями швидкотверднучих речовин наведені у табл. 1.4 [134].

Конструктивно-технічні параметри розвантаження цистерн

Таблиця 1.4

Вид вантажу	Спосіб розвантаження	Допустимий тиск, МПа	Допустима температура, °C	Час розігріву, год	Час зливу вантажу, хв.
Кам'яновугільний пек	Перетискання Сифонування	0,06	180,0	16,0...20,0	90,0
В'язкі нафтопродукти	- // -	відсутній	50,0	до 20,0	100,0
Жовтий фосфор	- // -	0,2	60,0	3,0...8,0	90,0
Сірка	- // -	0,2	120,0	0...29,0	55,0
Суперфосфорна кислота	- // -	0,2	40,0	4,0	150
Капролактам	- // -	0,2	75,0	8,0	35,0
Паста сульфанола	- // -	0,2	50,0	6,0	30,0

У резервуарах, трубопроводах і залізничних цистернах для перевезення сирої нафти, в'язких нафтопродуктів та тверднучих вантажів при тривалій їх експлуатації відкладається осад із значним вмістом парафіну, сірчаних з'єднань та різних смол. Традиційно на залізничних станціях прибуття та у вагоноремонтних депо для боротьби із утвореними осадами застосовується метод пропарювання цистерн. Процес підготовки до завантаження спеціальних вагонів-цистерн, призначених для транспортування тверднучих вантажів, складається із ряду наступних операцій [78]:

- зовнішній огляд на станції прибуття, розподілення поступивши вагонів на партії, які направляються безпосередньо під завантажування і на дільницю наступних процесів розігрівання та внутрішнього миття порожнини котла;

- розігрівання та злиття залишків продукту, діагностика технічного стану технологічних засобів завантажування та дослідження цілісності котла на предмет його протікання;
- внутрішнє та зовнішнє миття, діагностика внутрішньої поверхні котла, відправлення під завантажування або ремонт.

При достатньо потужному технічному оснащенні пунктів промивання та розігріву процесу підготовки даних засобів транспорту підлягають всі цистерни, призначені для завантаження. Розігрівають цистерни, як правило, поблизу пунктів їх миття або безпосередньо на ньому. Застосовують два способи, при першому із яких застосовуються спеціалізовані засоби, що розташовані на цистерні: паро-підігрівальний кожух або система електричного нагрівання [126]. При другому – в середині котла цистерни розташовують спеціальні нагрівні засоби [132], найчастіше це є паро нагрівачі у вигляді «парових пік», які вводяться безпосередньо у транспортований вантаж або його залишки, що у порівнюванні із першим способом забезпечує менші енергетичні витрати та прискорює тривалість операції [74].

Зливання залишків вантажу, попередньо розігрітого у цистерні, виконується за допомогою занурених pomp, які вводяться у цистерну, способом сифонування, перетискуванням продукту із герметизованого котла, при посередництві парових або водоструменевих ежекторів [83,84].

Основним технічним засобом, від якого залежать ефективність та якість промивання котлів залізничних цистерн, є миючі установки – миюча машина моделі МП-2/11 [125] та прилад для промивання цистерн моделі Т689 [128]. Вони утворюють систему гідро очищування, при якому застосовуються технічні засоби, що мають систему рухомих сопел і гідравлічний привід для їх обертання (турбінний, поршневий, реактивний тощо).

На ефективність очищення при застосуванні таких технічних засобів впливає одночасно ряд факторів: енергія гідродинамічного впливу, геометричні параметри струменю, відстань розташування миючого сопла від стінки котла, кут впливу струменю на стінку котла, напрям відбиття рідини, її температура, хімічний та фізичний склад.

В окремих вагоноремонтних депо країн СНД для очищення цистерн від залишків застиглої речовини застосовують засоби інжекторного типу із гідромонітором, який перетворює частину теплової енергії пару із тиском в $(2,0 \dots 16,0) \text{ кг/кВ}$ в механічну енергію струменю рідкого продукту [129]. Рідкий струмінь має в товщині рідини на порядок більшу дальність впливу, ніж струмінь пару. Крім того, гідравлічний імпульс гідромонітора гарантує потужні звукові коливання, які прискорюють процес розм'ягчення утворених осадів.

Розроблений і впроваджений на вагоноремонтних підприємствах спосіб миття вагонів-цистерн, призначених для транспортування рідких нафтопродуктів та продуктів нафтопереробки [131]. Основна суть процесу миття цистерни полягає в тому, що внутрішню поверхню котла спочатку змочують лужним водним розчином, після чого відбувається миття оболонки котла розігрітим паром до температури нагрівання металу в $(70 \dots 95) ^\circ\text{C}$, при якій вода, що перебуває у лужному розчині, випаровується. Після чого внутрішнє миття проводиться напрямленими водяними струменями, а накопичена у котлі вода видаляється за допомогою помпи.

Також, в деяких вагоноремонтних депо країн СНД запроваджено спосіб очищування порожнин котлів вагонів-цистерн шляхом попереднього нагрівання їх зовнішньої поверхні до температури $(20 \dots 40) ^\circ\text{C}$ методом обливання нагрітою водою із одночасним заповненням внутрішньої порожнини котла хімічним розчином, який під впливом зовні нагрітого металу генерується у пінну масу [133]. Далі, утворену піну, що заповнює поверхню застиглих залишків з густиною шару $(10 \dots 20) \text{ л/м}^3$, витримують на протязі $(20 \dots 30) \text{ хв.}$, після чого гідромонітором струменем гарячої води під тиском $(2,0 \dots 2,5) \text{ МПа}$ остаточно руйнують залишки застиглих речовин. Утворений роздроблений шлам разом із водою видаляється із цистерн за допомогою водяної помпи.

Як видно, із всіх наведених вище технічних способів очищення внутрішніх порожнин вагонів-цистерн від залишків вантажів, які тверднуть основними є способи пропарювання котлів з наступним промиванням струменями гарячої або холодної води. При будь-яких способах обробки технологічний процес операції очищування проводиться лише на промивально-пропарювальних станціях

вагоноремонтних депо (рис. 4.1), що значно обмежує можливості широкого впровадження існуючих у виробництві способів і засобів обробки.

1.6. Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу вітчизняних і зарубіжних технологічних процесів проведення підготовчих робіт виявилось, що в основному очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн ґрунтується на роботах, які проводяться на промивально-пропарювальних станціях вагоноремонтних депо із застосуванням ручної праці та теплового впливу води і пару, що суттєво обмежує можливості широкого, швидкого, якісного, а головне – ефективного проведення даних видів робіт. Крім того виявлено, що у більшості випадках при проведенні ремонтних робіт на етапах технічної підготовки вантажних вагонів задіяна значна кількість робітників і практично відсутні засоби механізації.

Детально досліджені характер та особливості кристалізованої застиглої маси, що залишається у порожнинах котлів цистерн після їх розвантаження, складності руйнування їх монолітності та порушення зчеплення із металом внутрішньої поверхні даного виду транспорту.

На основі наведеного вище, метою даної праці є технологічне забезпечення роботи з підготовки до завантаження вагонів-цистерн із застосовуванням механізованого технічного обслуговування як у вагоноремонтних депо, так і за його межами, на основі дослідження комплексного впливу параметрів технологічного процесу на результати його якісних та силових характеристик.

РОЗДІЛ 2.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРИНЦИПІВ РУЙНУВАННЯ ЗАСТИГЛИХ ЗАЛИШКІВ РЕЧОВИН

Як вже наводилось, вантажі, які транспортуються вагонами-цистернами мережею залізничного транспорту, після їх прибуття у кінцевий пункт призначення та розвантаження, частково залишаються у порожнинах котлів у вигляді кристалізованої застиглої маси. Інколи кількість цих залишків продуктів досягає за обсягом їх доволі значну кількість. Складність технологічного процесу видалення із котлів залізничних цистерн застиглих залишків речовин, перш за все, полягає у складності руйнування їх монолітності та порушення адгезійності із металом внутрішньої поверхні цистерни.

Для очищення внутрішніх порожнин вагонів розроблений механізм, що сприяє ефективному руйнуванню монолітності шару залишків застиглої речовини. Конструкція руйнівного-очищувального механізму, який обертається, являє собою суміщений комплекс, що складається із шарошок і каскаду торцевих інструментів із набором гнучких робочих елементів. Принцип установки та закріплення на консольній штанзі механізму ґрунтується по схемі, як модель механізму з гнучких тіл, які обертаються. Далі детально розглянемо прийнятий технологічний процес технічної підготовки вагонів-цистерн для їх наступної ефективної експлуатації, як домінуючих засобів в системі вантажних залізничних перевезень.

2.1. Теорія руйнування застиглих залишків речовин

На даний час для застиглих матеріалів, яким властиві ортогональні міцнісні та пружні характеристики, ще недостатньо розроблені, створені і впроваджені надійні методи, які дозволяють визначати умови руйнування таких матеріалів при складному тримірному напруженому стані. Всі необхідні на сьогоднішній вимоги проектувальників технологічного обладнання та інструменту, хоч і недостатньо, але задовольняли методи розрахунку умов руйнування при простих розтягуючих, стискуючих та згинаючих навантаженнях. У наведеному далі дослідженні ми задаємось припущенням, що енергія формозмінення являє собою розумну основу

для опису непружної поведінки застиглих матеріалів для випадку, коли головні напруження за напрямом співпадають безпосередньо із вісями матеріалу. Далі пропонується простий алгебраїчний метод створення умов руйнування монолітності різних за своїми властивостями речовин.

Для виведення критерію руйнування розглядаємо елементарний одиничний куб застиглої речовини (рис.2.1).

Геометричні осі одиничного кубу матеріалу співпадають з ортогональними осями X , Y , Z . Напружений стан прийнятого об'єму визначається напруженнями σ_x , σ_y та σ_z . Згідно закону Гука пружні деформації матимуть вигляд [1]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{xy} \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{xz} \frac{\sigma_z}{E_z}; \\ \varepsilon_y &= -\mu_{yx} \frac{\sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{yz} \frac{\sigma_z}{E_z}; \\ \varepsilon_z &= -\mu_{zx} \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{zy} \frac{\sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z}. \end{aligned} \right\}, \quad (2.1.1)$$

де E – модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга);

μ – коефіцієнт Пуассона.

Необхідно визначити дев'ять пружних сталих матеріалу, тобто шість коефіцієнтів μ та три E .

У пружному випадку запас пружної енергії не повинен залежати від порядку прикладення напружень. Отримуємо шість рівнянь:

$$U_{xyz} = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z} \right) - \frac{\sigma_x \sigma_y}{E_y} \mu_{xy} - \frac{\sigma_x \sigma_z}{E_z} \mu_{xz} - \frac{\sigma_y \sigma_z}{E_z} \mu_{yz}; \quad (2.1.2a)$$

$$U_{xzy} = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z} \right) - \frac{\sigma_x \sigma_z}{E_z} \mu_{xz} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{E_y} \mu_{xy} - \frac{\sigma_z \sigma_y}{E_y} \mu_{zy}; \quad (2.1.2b)$$

$$U_{yxz} = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z} \right) - \frac{\sigma_y \sigma_x}{E_x} \mu_{yx} - \frac{\sigma_y \sigma_z}{E_z} \mu_{yz} - \frac{\sigma_x \sigma_z}{E_z} \mu_{xz}; \quad (2.1.2c)$$

$$U_{yzx} = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z} \right) - \frac{\sigma_y \sigma_z}{E_z} \mu_{yz} - \frac{\sigma_y \sigma_x}{E_x} \mu_{yx} - \frac{\sigma_z \sigma_x}{E_x} \mu_{zx}; \quad (2.1.2d)$$

$$U_{zxy} = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z} \right) - \frac{\sigma_z \sigma_x}{E_x} \mu_{zx} - \frac{\sigma_z \sigma_y}{E_y} \mu_{zy} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{E_y} \mu_{xy}; \quad (2.1.2e)$$

$$U_{zyx} = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_x^2}{E_x} + \frac{\sigma_y^2}{E_y} + \frac{\sigma_z^2}{E_z} \right) - \frac{\sigma_z \sigma_y}{E_y} \mu_{zy} - \frac{\sigma_z \sigma_x}{E_x} \mu_{zx} - \frac{\sigma_y \sigma_x}{E_x} \mu_{yx}. \quad (2.1.2f)$$

Оскільки всі енергії в лівій частині рівнянь (2.1.2) є рівними, шість величин, які далі будуть наведені, також повинні бути рівними

$$\frac{\mu_{xy}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}}{E_z} + \frac{\mu_{yz}}{E_z}; \quad (2.1.3a)$$

$$\frac{\mu_{xz}}{E_z} + \frac{\mu_{xy}}{E_y} + \frac{\mu_{zy}}{E_y}; \quad (2.1.3b)$$

$$\frac{\mu_{yx}}{E_x} + \frac{\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{zx}}{E_z}; \quad (2.1.3c)$$

$$\frac{\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{yx}}{E_x} + \frac{\mu_{zx}}{E_x}; \quad (2.1.3d)$$

$$\frac{\mu_{zx}}{E_x} + \frac{\mu_{zy}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}}{E_y}; \quad (2.1.3e)$$

$$\frac{\mu_{zy}}{E_y} + \frac{\mu_{zx}}{E_x} + \frac{\mu_{yx}}{E_x}. \quad (2.1.3f)$$

Для цього необхідно, щоб:

$$\frac{\mu_{yz}}{E_z} = \frac{\mu_{zy}}{E_y}; \quad (2.1.4a)$$

$$\frac{\mu_{xz}}{E_z} = \frac{\mu_{zx}}{E_x}; \quad (2.1.4b)$$

$$\frac{\mu_{xy}}{E_y} = \frac{\mu_{yx}}{E_x}. \quad (2.1.4c)$$

Це означає, що дев'ять пружних сталих не є незалежними. Достатньо шести незалежних констант матеріалу, як можна очікувати із того факту, що кожне рівняння енергії (2.1.2) має лише шість констант. Далі розв'язуємо рівняння (2.1.4) відносно трьох коефіцієнтів Пуассона:

$$\mu_{yx} = \frac{E_x}{E_y} \mu_{xy}; \quad (2.1.5a)$$

$$\mu_{zx} = \frac{E_x}{E_z} \mu_{xz}; \quad (2.1.5b)$$

$$\mu_{zy} = \frac{E_y}{E_z} \mu_{yz}. \quad (2.1.5c)$$

Із рівняння (2.1.1), застосовуючи залежності (2.1.5), отримуємо наступні деформації:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{xy} \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{xz} \frac{\sigma_z}{E_z}; \quad (2.1.6a)$$

$$\varepsilon_y = -\mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_y} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \mu_{yz} \frac{\sigma_z}{E_z}; \quad (2.1.6b)$$

$$\varepsilon_z = -\mu_{xz} \frac{\sigma_x}{E_z} - \mu_{yz} \frac{\sigma_y}{E_z} + \frac{\sigma_z}{E_z}. \quad (2.1.6c)$$

Енергію викривлення форми можна визначити, відокремлюючи від загальної енергії деформування ту частину, яка пов'язана лише із зміною об'єму наведеного на рис. 2.1 кубічного елемента матеріалу. Зміна об'єму від впливу напружень σ_x , σ_y та σ_z , якщо знехтувати членами другого порядку, матиме наступний вигляд:

$$\Delta V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (2.1.7)$$

Такі ж зміни об'єму можна досягнути при напруженнях σ_x^* , σ_y^* та σ_z^* без зміни форми, якщо напруження, відмічені зірочками, вибрані так, що викликані ними деформації ε^* у трьох напрямках є однаковими:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3}. \quad (2.1.8)$$

Система напружень із зірочкою визначається наступними рівняннями:

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma_x^*}{E_x} - \mu_{xy} \frac{\sigma_y^*}{E_y} - \mu_{xz} \frac{\sigma_z^*}{E_z}; \quad (2.1.9a)$$

$$\varepsilon^* = -\mu_{xy} \frac{\sigma_x^*}{E_y} + \frac{\sigma_y^*}{E_y} - \mu_{yz} \frac{\sigma_z^*}{E_z}; \quad (2.1.9b)$$

$$\varepsilon^* = -\mu_{xz} \frac{\sigma_x^*}{E_z} - \mu_{yz} \frac{\sigma_y^*}{E_z} + \frac{\sigma_z^*}{E_z}. \quad (2.1.9c)$$

Енергія, яка пов'язана із зміною об'єму, становитиме:

$$U_{\Delta V} = 0,5 \cdot (\sigma_x^* + \sigma_y^* + \sigma_z^*) \cdot \varepsilon^*. \quad (3.1.10)$$

Розв'язуючи рівняння (2.1.9) відносно напружень із зірочкою, одержуємо:

$$\sigma_x^* = \varepsilon^* \frac{\left(\frac{1}{E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_z} + \frac{\mu_{zy}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} \right)}{\left(\frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - \frac{2\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_y E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \right)}; \quad (2.1.11a)$$

$$\sigma_y^* = \varepsilon^* \frac{\left(\frac{1}{E_x} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_z} + \frac{\mu_{xy}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z} + \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{yz}}{E_x} \right)}{\left(\frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - \frac{2\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_y E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \right)}; \quad (2.1.11b)$$

$$\sigma_z^* = \varepsilon^* \frac{\left(\frac{E_z}{E_x E_y} - \frac{E_z \mu_{xy}^2}{E_y^2} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{yz}}{E_x} \right)}{\left(\frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - 2 \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_y E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \right)}. \quad (2.1.11c)$$

Додаємо між собою всі рівняння системи (2.1.11):

$$\sigma_x^* + \sigma_y^* + \sigma_z^* = \frac{\left[\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{E_z}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_z} - \frac{E_z}{E_y^2} \mu_{xy} + 2 \cdot \left(\frac{\mu_{yz}}{E_x} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}}{E_y} \right) + 2 \cdot \left(\frac{\mu_{xy}\mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_z} \right) \right]}{\left[\frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} - 2 \frac{\mu_{xy}\mu_{xz}\mu_{yz}}{E_y E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \right]} \cdot \varepsilon^* \quad (2.1.12)$$

Деформацію ε^* визначаємо із залежностей (2.1.8) та (2.1.6):

$$\varepsilon^* = (1/3) \cdot \begin{bmatrix} +\sigma_x \cdot \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{xz}}{E_z} \right) \\ +\sigma_y \cdot \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{yz}}{E_z} \right) \\ +\sigma_z \cdot \left(\frac{1}{E_z} - \frac{\mu_{xz}}{E_z} - \frac{\mu_{yz}}{E_z} \right) \end{bmatrix} \quad (2.1.13))$$

Для енергії зміни об'єму із рівнянь (2.1.10), (2.1.12) та (2.1.13) одержуємо:

$$U_{\Delta V} = \frac{\begin{bmatrix} +\sigma_x \cdot \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{xz}}{E_z} \right) \\ +\sigma_y \cdot \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{yz}}{E_z} \right) \\ +\sigma_z \cdot \left(\frac{1}{E_z} - \frac{\mu_{xz}}{E_z} - \frac{\mu_{yz}}{E_z} \right) \end{bmatrix}^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{E_z}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_z} \\ -\frac{E_z}{E_y} \mu_{xy} + 2 \cdot \left(\frac{\mu_{yz}}{E_x} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}}{E_y} \right) \\ + 2 \cdot \left(\frac{\mu_{xy} \mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy} \mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xz} \mu_{yz}}{E_z} \right) \end{bmatrix}}{18 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} \\ -2 \cdot \frac{\mu_{xy} \mu_{xz} \mu_{yz}}{E_y E_x} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \end{bmatrix}} \quad (2.1.14)$$

Тоді енергію викручування форми отримаємо, віднімаючи вираз (2.1.14) із залежності (2.1.2а), одержавши рівняння (2.1.15).

$$U_{\text{ВИКР.Ф.}} = \begin{bmatrix} 0,5 \cdot \begin{bmatrix} \frac{\sigma_x^2}{E_x} \\ + \frac{\sigma_y^2}{E_y} \\ + \frac{\sigma_z^2}{E_z} \end{bmatrix} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{E_y} \mu_{xy} \\ - \frac{\sigma_{xz}}{E_z} \mu_{xz} \\ - \frac{\sigma_y \sigma_z}{E_z} \end{bmatrix} - \frac{\begin{bmatrix} \sigma_x \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{xz}}{E_z} \right) \\ + \sigma_y \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\mu_{xy}}{E_y} - \frac{\mu_{yz}}{E_z} \right) \\ + \sigma_z \left(\frac{1}{E_z} - \frac{\mu_{xz}}{E_z} - \frac{\mu_{yz}}{E_z} \right) \end{bmatrix}^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{E_z}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_z} \\ -\frac{E_z}{E_y} \mu_{xy} + 2 \cdot \left(\frac{\mu_{yz}}{E_x} + \frac{\mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy}}{E_y} \right) \\ + 2 \cdot \left(\frac{\mu_{xy} \mu_{yz}}{E_y} + \frac{\mu_{xy} \mu_{xz}}{E_y} + \frac{\mu_{xz} \mu_{yz}}{E_z} \right) \end{bmatrix}}{18 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x E_y} - \frac{\mu_{yz}^2}{E_x E_z} - \frac{\mu_{xy}^2}{E_y^2} \\ -2 \cdot \frac{\mu_{xy} \mu_{xz} \mu_{yz}}{E_y E_z} - \frac{\mu_{xz}^2}{E_y E_z} \end{bmatrix}} \quad (2.1.15)$$

Представлений автором метод визначення умов руйнування ґрунтується на припущенні, що гранична величина енергії формо змінення є постійною при всіх комбінаціях напружень σ_x , σ_y та σ_z . Для застосування критерію руйнування необхідно мати шість пружних констант і одне значення границі міцності при простому розтягу, яке дозволяє визначити величину граничної енергії.

Рівняння (2.15) приводиться до звичайного виразу енергетичної теорії міцності ізотропних матеріалів, якщо припускати, що:

$$\begin{aligned} E_x &= E_y = E_z = E; \\ \mu_{xy} &= \mu_{xz} = \mu_{yz} = \mu; \\ U_{\text{ВИКР.Ф.}} &= \frac{1+\mu}{6E} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2]. \end{aligned} \quad (2.1.16)$$

Згідно початкового визначення було констатовано, що розглядаються характеристики монолітних застиглих матеріалів, але все ж таке твердження є суперечливим і не остаточним, оскільки за своєю природою дані речовини мають низку розбіжностей у своїй характеристиці, що ставить під сумнів поставлене нами остаточне твердження. Із ряду технічних причин (див. п. 1.3) досить важко чітко визначитись із характеристиками даних матеріалів, тому з метою створення «універсальності» запропонованої теорії, розглядаємо їх як напівортотропні матеріали.

Далі розглядаємо застосування теоретичного питання руйнування для напівортотропного матеріалу. В якості прикладу практичного застосовування виразу (2.1.15) розглянемо матеріал з однаковими властивостями у двох напрямках і відмінними у третьому. Припускаємо далі, що напруження є також однаковими у цих двох напрямках і відрізняються в третьому напрямі. Такі умови можуть існувати у посудинах сферичної форми, до яких можна віднести і корпус залізничної цистерни.

Нехай S_τ – границя міцності в тангенціальному напрямі при одновісному напруженні:

$$\sigma_\tau = \sigma_x = \sigma_y; \quad \sigma_r = \sigma_z;$$

$$E_\tau = E_x = E_y; E_r = E_z;$$

$$\alpha = \mu_{xy}; \beta = \mu_{xz} = \mu_{yz}.$$

Граничну величину енергії викривлення форми визначаємо із рівняння (2.1.15), припускаючи, що $\sigma_x = S_\tau$ та $\sigma_y = \sigma_z = 0$:

$$U_{\text{ГРАНИЧ.}} = \frac{S_\tau^2}{2E_r} \cdot \left\{ 1 - \frac{\left[1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right]^2 \cdot \left[(1 - \alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} \right\} \quad (2.1.17)$$

Енергію викривлення для напівортотропного матеріалу при $\sigma_\tau = \sigma_x = \sigma_y$ та $\sigma_r = \sigma_z$ також отримуємо із виразу (2.1.15):

$$U_{\text{ВИКР.Ф.}} = \frac{\sigma_\tau^2}{2E_\tau} \cdot \left\{ \begin{aligned} &+ 2 \cdot (1 + \alpha) + \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right)^2 \frac{E_r}{E_\tau} - 4\beta \cdot \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right) \frac{E_\tau}{E_r} \\ &- \frac{\left[2 \cdot \left(1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right) + (1 - 2\beta) \cdot \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right) \frac{E_\tau}{E_r} \right]^2 \cdot \left[(1 - \alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.18)$$

Прирівнюючи значення енергії викривлення форми, згідно виразу (2.1.18), і граничну енергію із виразу (2.1.17), отримуємо вираз для розрахунку шуканої величини напруження руйнування:

$$\sigma_\tau^{\text{руйнув.}} = S_\tau \cdot \left[\begin{aligned} &1 - \frac{\left(1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right)^2 \cdot \left[(1 - \alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} \\ &+ 2 \cdot (1 - \alpha) + \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \right)^2 \frac{E_r}{E_\tau} - 4 \cdot \beta \frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \frac{E_\tau}{E_r} \\ &- \frac{\left[2 \cdot \left(1 - \alpha - \beta \frac{E_\tau}{E_r} \right) + (1 - 2\beta) \frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \frac{E_\tau}{E_r} \right]^2 \cdot \left[(1 - \alpha) \frac{E_\tau}{E_r} + 2 \cdot (1 + 2\beta) \right]}{9 \cdot \left(1 - \alpha - 2\beta^2 \frac{E_\tau}{E_r} \right)} \end{aligned} \right] \quad (2.1.19)$$

Зауважимо, що тут залишилось лише три пружні параметри: α , β та $E_t = E_r$.

Прикладання до експериментального зразка двох однакових стискуючих напружень

та одного розтягуючого напруження, яке напрямлене перпендикулярно діючим стискуючим напруженням, можна впевнитись у правильності запропонованої теоретичної викладки.

Можна також розглянути випадок перебування застиглих залишків речовин не лише в закритому середовищі, як, наприклад, котел залізничної цистерни, а й в умовах перебування застиглої маси на відкритому повітрі, тобто під впливом двовісного напруженого стану при умові рівноцінності величини напружень. У такому випадку:

$$\sigma_r = 0; \quad \alpha = \beta = \mu; \quad \frac{E_t}{E_r} = 1,$$

і рівняння (2.1.19) отримає наступний вигляд $\sigma_t = S_t$, що вказує на зниження міцності внаслідок двостороннього навантаження.

2.2. Модель взаємодії робочих елементів інструменту із застиглими залишками вантажів

Моделювання технологічного процесу технічного обслуговування підготовчих робіт проводилось на основі системного підходу. Особливість його полягає в розробці моделей окремих структур процесу, а також моделей структур у їх взаємозв'язку. Основна суть моделювання процесу обробки полягає у здатності поєднування двох, протилежних за своєю суттю, динамічних процесів – руйнування монолітності застиглої маси речовини та концентрації зруйнованого і роздробленого шламу з одночасним якісним формуванням поверхні металу внутрішньої порожнини котла вагона-цистерни. Далі розглядатимемо окремо кожну із наведених моделей, математично аргументуючи запропоновані теоретичні викладки.

2.2.1. Процес руйнування внаслідок динамічного удару

Після прибуття вантажним залізничним транспортом вантажу в пункт призначення і його розвантаження, застигли в цистернах залишки продуктів становлять за обсягом їх значну кількість. Складність технологічного процесу видалення із котлів залізничних цистерн залишків у першу чергу полягала у

складності руйнування його монолітності та порушення адгезійності із металом внутрішньої поверхні цистерни.

Для ефективної і якісної підготовки вантажних засобів рухомого складу залізниці розроблено ряд пристроїв і механізмів для очищення внутрішніх поверхонь котлів вагонів-цистерн [165,166,167,169], які успішно експлуатуються у деяких вагоноремонтних депо Укрзалізниці. На даний час розроблений пристрій [176], у якому в якості робочих ріжучих елементів застосовуються шарошки, що своїми шипами ефективно руйнують шар затверділого матеріалу. На практиці таке руйнування проводиться шляхом впливу на застиглий шар механічних коливань, де джерелом вібрації слугують дебаланси, які обертаються, а переміщення відбувається за рахунок коливного руху даного механізму.

До факторів, які впливають на динаміку системи шар застиглої речовини – інструмент обробки і на якість руйнування, відносяться [4]: 1) частота вимушеного впливу; 2) розмах вертикальних коливань; 3) відцентрове зусилля; 4) вага неамортизованих частин механізму; 5) відношення відцентрових сил до ваги; 6) стійкість роботи механізму; 7) швидкість переміщення даного механізму; 8) тип і товщина руйнівного шару.

Хоча в літературних джерелах наведені деякі теоретичні та експериментальні дослідження з питань вібраційного руйнування матеріалу [6,7,8,9,10,11], відомості про вплив різних конструктивних параметрів механізмів подібного типу на його роботу є дуже обмеженими. Майже у всіх теоретичних роботах із динаміки конкретних систем (у нашому випадку, це шар застиглого матеріалу – інструмент обробки) дослідження обмежувалось лише лінійним аналізом [5,12], в якому руйнівний механізм відтворювався як точкова маса, а матеріал руйнування – лінійними пружиною і демпфером в'язкого тертя. Динамічна модель [13] наведена на рис. 2.3 хоча така спрощена модель суттєво обмежує сферу її застосування.

У даній моделі одне із обмежень лінійного дослідження полягає у тому, що вимушені коливання системи завжди мають частоту вимушеного впливу, що є справедливо, лише в окремих випадках. Лінійний підхід не дає також відповіді на питання, чи будуть існувати на практиці знайдені вимушені коливання при

наявності різних незначних збуджень, тобто виявляється, що стійкість лінійного рішення є невірним, тому досліджуємо нелінійну систему, виражену шаром застиглого матеріалу та робочими елементами інструменту.

Найпростіша модель системи: матеріал руйнування – інструмент, складається із жорсткої головки із набором шарошок масою m , яка здійснює коливання над поверхнею згуслої маси під впливом постійного відновлюючого зусилля H та змушуючого зусилля з амплітудою F_0 і частотою ω . Оскільки пружні опори інструменту конструюються як амортизатори (див. рис. 2.2), слід припустити, що сила, яка передається ними на головку із набором шарошок, зводиться по сутності до ваги. Для простоти будемо вважати, що обидва зусилля прикладені до даної головки в її центрі мас.

У процесі коливань поверхня застиглого шару поступово руйнується, зменшуючи свою загальну товщину при кожному ударі. Оскільки руйнування даного шару за один удар є незначним, із достатньою степінню точності можна вважати, що дана поверхня є нерухомою, але здатною поглинати енергію робочої головки при ударі. Припускаємо, що при кожному із ударів робочі елементи шарошок головки можуть або «грузнути» у застиглій масі, або миттєво відскакувати від неї. Припускаємо, що процес удару можна описати коефіцієнтом e даної системи та коефіцієнтом μ . Досліджувана система має дві степені вільності, а її положення задається координатами (x, y) центру мас робочої головки інструменту відносно нерухомої прямокутної системи координат відповідно в горизонтальному і вертикальному напрямках (рис. 2.4).

У проміжках між ударами переміщення робочої головки описується наступними лінійними диференціальними рівняннями:

$$m\ddot{y} = -H + F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta), \quad (2.2.1)$$

$$m\ddot{x} = -F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \beta), \quad (2.2.2)$$

де β – невідомий фазовий кут; H – відновлюючі зусилля;

F_0 – амплітуда вимушуючих сил; ω – кутова частота вимушуючих зусиль;

t – час, а точками над символами вказується про диференціювання по t .

Нехай $\dot{x}^{(-)}$ та $\dot{y}^{(-)}$, $\dot{x}^{(+)}$ та $\dot{y}^{(+)}$ – компоненти швидкості безпосередньо до і після удару відповідно. Згідно коефіцієнта відновлення при ударі робочої головки e :

$$\dot{y}^{(+)} = -e \cdot \dot{y}^{(-)}. \quad (2.2.3)$$

Проекція P_V буде рівною

$$P_V = -m \cdot (1 + e) \cdot \dot{y}^{(-)}. \quad (2.2.4)$$

Якщо в момент удару маса переміщується вздовж осі x ($\dot{x} > 0$), то після удару вона або буде продовжувати своє переміщення, або зупиниться під впливом тертя. У першому випадку зміна проекції горизонтального імпульсу буде рівною:

$$m \cdot [\dot{x}^{(+)} - \dot{x}^{(-)}] = -\mu \cdot P_V = m \cdot \mu \cdot (1 + e) \cdot \dot{y}^{(-)}, \quad (2.2.5)$$

де μ – коефіцієнт тертя ковзання.

Із останнього рівняння (2.2.5) визначаємо горизонтальну проекцію швидкості після удару:

$$\dot{x}^{(+)} = \dot{x}^{(-)} + \mu \cdot (1 + e) \cdot \dot{y}^{(-)}. \quad (2.2.6)$$

Очевидно, що переміщення вперед відбуватиметься після удару лише у тому випадку, якщо

$$\dot{x}^{(-)} + \mu \cdot (1 + e) \cdot \dot{y}^{(-)} > 0. \quad (2.2.7)$$

Якщо нерівність (2.2.7) буде порушено, то швидкість $\dot{x}^{(+)}$ повинна обернутися в нуль. Вона не зможе стати від'ємною, оскільки пасивне тертя проявляє супротив лише переміщенню вперед і не може викликати рухові назад після того, як маса зупинилась.

Міркуючи аналогічно, встановлюємо, що при $\dot{x}^{(-)} < 0$

$$\dot{x}^{(+)} = \dot{x}^{(-)} - \mu \cdot (1 + e) \cdot \dot{y}^{(-)}, \quad (2.2.8)$$

якщо

$$\dot{x}^{(-)} + \mu \cdot (1 + e) \cdot \dot{y}^{(-)} < 0. \quad (2.2.9)$$

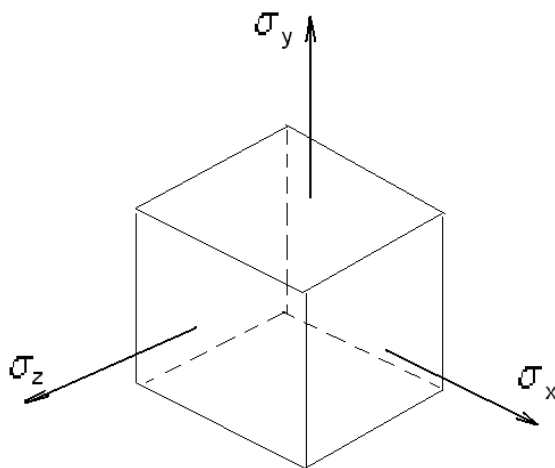


Рис. 2.1. Елементарний одиничний куб прийнятого застиглого матеріалу.

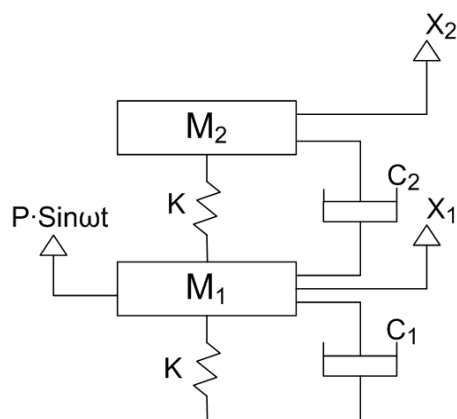


Рис. 2.2. Динамічна модель, яка застосовується при лінійному розгляді механізму.

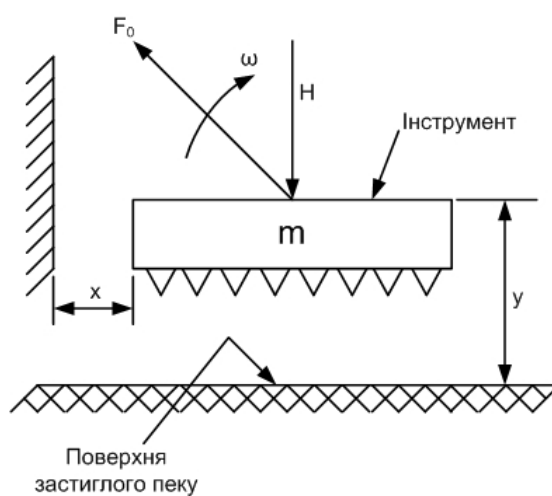


Рис. 2.3. Динамічна модель.

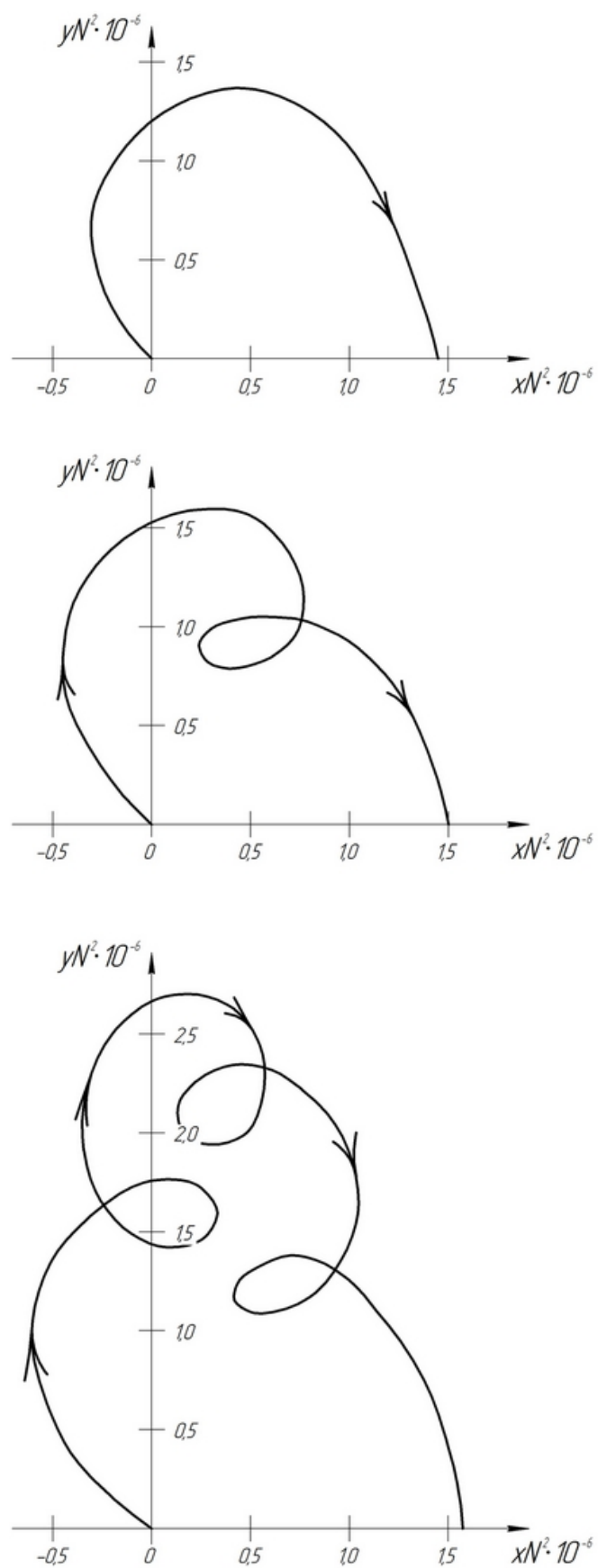


Рис. 2.4. Траєкторія переміщення елементарного шипа шарошки в інтервалах між ударами.

Якщо нерівність (2.2.9) порушена, то $\dot{x}^{(+)}$ обертається в нуль. В останньому можливому випадку, коли $\dot{x}^{(-)} = 0$, то $\dot{x}^{(+)}$ також буде рівним нулю.

Наведені вище рівняння слугують для прийняття початкових умов руху після удару. Отже, переміщення робочої головки інструменту визначається шляхом додавання послідовності рішень лінійних диференціальних рівнянь. Зауважимо, що період між двома послідовними ударами залежить виключно від переміщення у вертикальному напрямі.

В залежності від значень параметрів і початкових умов у даній лінійній системі можуть існувати різні види переміщень. При проектуванні будь-яких механізмів особливий інтерес викликають усталені рішення. Дійсно, якщо такі рішення існують, то вони не обов'язково повинні бути синхронними із вимушеним зусиллям. Крім того, можна отримати кілька усталених рішень обумовлених рівнянь. Однак не всі із них можна реалізовувати впродовж довільного відрізка часу. Припустимо, що переміщення системи описується заданим усталеним рішенням. Це рішення називається «асимптотичним усталеним», якщо система завжди повертається до нього після прикладання миттєвих малих, але в загальному довільних збуджень.

Усталене рішення з періодом, який рівний M періодам вимушуючої сили, задовольняє диференціальним рівнянням (2.2.1), (2.2.2) та умовам періодичності:

$$y(0) = 0, \quad (2.2.10a)$$

$$y\left(\frac{2M\pi}{\omega}\right) = 0, \quad (2.2.10б)$$

$$\dot{y}(0) = eV, \quad (2.2.10в)$$

$$\dot{y}\left(\frac{2M\pi}{\omega}\right) = -V, \quad (2.2.10г)$$

$$x(0) = 0, \quad (2.2.11a)$$

$$x\left(\frac{2M\pi}{\omega}\right) = \delta, \quad (2.2.11б)$$

$$\dot{x}(0) = \dot{x}^{(+)}, \quad (2.2.11в)$$

$$\dot{x}\left(\frac{2M\pi}{\omega}\right) = \dot{x}^{(-)}, \quad (2.2.11\Gamma))$$

де V – ударна швидкість, яка рівна $V = -\dot{y}^{(-)}$;

δ – сумарне зміщення вперед за час $(2M\pi / \omega)$ між співударями.

Загальні рішення рівнянь (2.2.1) і (2.2.2) матимуть наступний вигляд:

$$y = \frac{1}{m} \cdot \left\{ -\frac{F_0}{\omega^2} \sin(\omega \cdot t + \beta) - 0,5 \cdot H \cdot t^2 + C_1 t + C_3 \right\}, \quad (2.2.12)$$

$$x = \frac{1}{m} \cdot \left\{ \frac{F_0}{\omega^2} \cos(\omega \cdot t + \beta) + C_2 t + C_4 \right\}, \quad (2.2.13)$$

де $C_1 \dots C_4$ – сталі інтегрування;

β – фазовий кут;

H – відновлююча сила.

Підставляючи вираз (2.2.12) в умову (2.2.10), знаходимо:

$$\frac{F_0}{\omega^2} \sin \beta + C_3 = 0, \quad (2.2.14a)$$

$$-\frac{F_0}{\omega^2} \sin \beta - \frac{H}{2} \cdot \left(\frac{2M\pi}{\omega} \right)^2 + C_1 \frac{2M\pi}{\omega} + C_3 = 0 \quad (2.2.14б)$$

$$meV = -\frac{F_0}{\omega} \cos \beta + C_1, \quad (2.2.14в)$$

$$-mV = -\frac{F_0}{\omega} \cos \beta - H \frac{2M\pi}{\omega} + C_1. \quad (2.2.14г)$$

Останні чотири рівняння визначають сталі інтегрування C_1 і C_3 , а також невідомі β і V :

$$V = \frac{2\pi \cdot M \cdot H}{m \cdot \omega \cdot (1 + e)}, \quad (2.2.15)$$

$$\cos \beta = \frac{1 - e}{1 + e} \cdot \frac{M \cdot \pi \cdot H}{F_0}, \quad (2.2.16)$$

$$C_1 = m \cdot e \cdot V + \frac{F_0}{\omega} \cos \beta, \quad (2.2.17)$$

$$C_3 = \frac{F_0}{\omega^2} \sin \beta. \quad (2.2.18))$$

Підставляючи вираз (2.2.13) у рівності (2.2.11а, в,г), знаходимо:

$$C_4 = -\frac{F_0}{\omega^2} \cos \beta; \dot{x}^{(+)} = \dot{x}^{(-)}.$$

Якщо $\dot{x}^{(-)}$, то із рівняння (2.2.6) і (2.2.8) виходить, що $\dot{x}^{(+)}$ не може співпадати з $\dot{x}^{(-)}$, якщо $\dot{y}^{(-)} \neq 0$. Однак із рівняння (2.2.15) виходить, що $\dot{y}^{(-)} \neq 0$.

Тому лишається прийняти, що:

$$\dot{x}^{(+)} = \dot{x}^{(-)} = 0, \quad (2.2.19)$$

причому рівняння (2.2.11в) або (2.2.11г) дають наступне:

$$C_2 = \frac{F_0}{\omega} \sin \beta.$$

Рівняння (2.2.12) і (2.2.13) приймають наступний вигляд:

$$y = \frac{F_0}{m \cdot \omega^2} \left\{ \sin \beta - \sin(\omega \cdot t + \beta) + \frac{\omega \cdot t}{F_R} (M\pi - 0,5 \cdot \omega \cdot t) \right\}, \quad (2.2.20)$$

де F_R – безрозмірне зусилля ($F_R = F_0 / H$).

$$x = \frac{F_0}{m \cdot \omega^2} \{ \cos(\omega \cdot t + \beta) - \cos \beta + \omega \cdot t \cdot \sin \beta \}. \quad (2.2.21)$$

Застосовуючи рівняння (2.2.15), визначаємо потужність, яка передається інструментом до поверхні застиглого вантажу:

$$P = \frac{\pi \cdot M}{m \cdot \omega} H^2 \cdot \frac{1-e}{1+e}. \quad (2.2.22)$$

Підставляючи вираз (2.2.21) у рівняння (2.2.11б), при умові, що $e = 0$, визначаємо:

$$\delta = \frac{2M\pi H}{m \cdot \omega^2} \cdot \sqrt{F_R^2 - M^2 \pi^2}, \quad (2.2.23)$$

де δ – сумарне зміщення вперед за час $(2M\pi / \omega)$ між співударями.

Позначивши через V_x середню швидкість переміщення, одержуємо:

$$V_x = \frac{\delta}{\frac{2M\pi}{\omega}} = \frac{H}{m \cdot \omega} \cdot \sqrt{F_R^2 - M^2 \pi^2} . \quad (2.2.24))$$

До цих пір усталене рішення ґрунтувалось виходячи із припущення, що удар робочої головки інструменту по поверхні застиглої маси відбувається через кожні M періодів вимушуючого зусилля. Далі досліджуємо асимптотичну стійкість отриманих рішень [8,9].

Розглядаємо рішення із періодом, рівним M періодам вимушуючого зусилля. Вимагаємо, щоб у системі після введення слабкого збудження виконувались наступні умови періодичності:

$$y(\Delta\tau) = 0 , \quad (2.2.25)$$

$$y \cdot \left(\frac{2M\pi}{\omega} + \Delta\tau' \right) = 0 , \quad (2.2.26)$$

$$\dot{y} \cdot (\Delta\tau) = e \cdot (V + \Delta V) , \quad (2.2.27)$$

$$\dot{y} \cdot \left(\frac{2M\pi}{\omega} + \Delta\tau' \right) = -(V + \Delta V') , \quad (2.2.28)$$

де $\Delta\tau$, $\Delta\tau'$, ΔV та $\Delta V'$ – слабкі збудження.

При $\Delta\tau < \tau < \frac{2M\pi}{\omega} + \Delta\tau' - \Delta\tau$ переміщення системи визначається згідно диференційних рівнянь (2.2.1). Вводячи безрозмірний час - $\bar{\tau} = \tau - \Delta\tau$, переписуємо рівняння (2.2.1) та рівності (2.2.25....2.2.28) у вигляді:

$$m \cdot \omega^2 y'' = -H + F_0 \cdot \sin(\bar{\tau} + \beta + \Delta\tau) , \quad (2.2.29)$$

$$y(0) = 0 , \quad (2.2.30)$$

$$y \cdot \left(\frac{2M\pi}{\omega} + \Delta\tau' - \Delta\tau \right) = 0 , \quad (2.2.31)$$

$$\omega \cdot y'(0) = e \cdot (V + \Delta V) , \quad (2.2.32)$$

$$\omega \cdot y' \cdot \left(\frac{2M\pi}{\omega} + \Delta\tau' - \Delta\tau \right) = -(V + \Delta V') , \quad (2.2.33)$$

де штрихом позначено диференціювання по τ .

Розв'язок рівняння (2.2.29) із врахуванням умов (2.2.30) та (2.2.32) записуємо у вигляді:

$$y = \frac{1}{m} \cdot \left\{ \frac{F_0}{\omega^2} \sin \cdot (\bar{\tau} + \beta + \Delta\tau) - 0,5 \frac{H}{\omega^2} \bar{\tau}^2 + \frac{C'_{1\omega}}{\omega} \bar{\tau} + C'_2 \right\}. \quad (2.2.34)$$

Сталі інтегрування C'_1 та C'_2 легко визначаються із рівнянь (2.2.15) і (2.2.16):

$$C'_1 = C_1 + m \cdot e \cdot \Delta V - \frac{F_0}{\omega} \sin \beta \Delta\tau, \quad (2.2.35)$$

$$C'_2 = C_2 + \frac{F_0}{\omega^2} \cos \beta \Delta\tau. \quad (2.2.36)$$

Підставляючи вирази (2.2.34...2.2.36) в (2.2.33), визначаємо:

$$\begin{bmatrix} \Delta\tau' \\ \Delta V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-x & \frac{e \cdot (1+e) \cdot m \cdot \omega}{H} \\ \frac{k \cdot H \cdot (F_R \cdot \sin \beta - 1)}{m \cdot \omega} & -e \cdot (x-e) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\tau \\ \Delta V \end{bmatrix}, \quad (2.2.36,a)$$

де k визначається із рівності, наведеної наступною:

$$k = F_R \cdot (1+e) \cdot \sin \beta. \quad (2.2.37)$$

Постійне усталене рішення буде асимптотично стійким лише в тому випадку, коли модулі власних значень, які є коренями рівняння

$$\left| \begin{array}{cc} 1-k-Q & \frac{e \cdot (1+e) \cdot m \cdot \omega}{H} \\ \frac{kH \cdot (F_R \cdot \sin \beta - 1)}{m \cdot \omega} & -e \cdot (k-e)-Q \end{array} \right| = 0 \quad (2.2.38)$$

будуть менше одиниці [8]. Розкривання визначника (2.2.38) приводить до наступного рівняння:

$$Q = 0,5 \cdot \left\{ 1+e^2 - k \cdot (1+e) + \sqrt{k^2(1+e)^2 - 2k \cdot (1+e) \cdot (1+e^2) + (1-e^2)^2} \right\} \quad (2.2.39)$$

Оскільки видаленню із котлів залізничних цистерн підлягають ряд застиглих речовин, кожна із яких має свої фізико-механічні властивості (див. розділ 1), то матеріал із найменшим показником густини, наприклад нафтобітум, тобто при $e = 0$, для стійкості усталеного рішення необхідно і достатньо, щоб

$$F_R \leq \sqrt{4 + M^2 \pi^2} \quad (2.2.40)$$

або, що є еквівалентним

$$M \geq \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{F_R^2 - 4} \quad (2.2.40a)$$

З іншого боку, при $e = 0$ необхідно також, щоб:

$$\sin \beta \geq \frac{H}{F_0}, \quad (2.2.41)$$

тобто, на початку кожного періоду проекція вимушуючого зусилля на вертикаль повинна бути направленою догори, перевищуючи величину відновлюючого зусилля. Умову (2.2.41) можна переписати наступним чином:

$$F_R \geq \sqrt{1 + M^2 \pi^2} \quad (2.2.42)$$

або, що є еквівалентним

$$M \leq \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{F_R^2 - 1}. \quad (2.2.42a)$$

Для сімейства кривих типу

$$F_R = \sqrt{M^2 \pi^2 + \gamma} \quad (2.2.43)$$

при $1 \leq \gamma \leq 4$ потужність, яка передається поверхневому застиглому шару, може бути вираженою у вигляді

$$P = \frac{P_0^2}{m \cdot \omega} \cdot \frac{\sqrt{F_R^2 - \gamma}}{F_R^2} \quad (2.2.44)$$

Отже,

$$\frac{\sqrt{F_R^2 - 4}}{F_R^2} < \frac{Pm \cdot \omega}{F_0^2} < \frac{\sqrt{F_R^2 - 1}}{F_R^2}. \quad (2.2.44a)$$

Швидкість переміщення, яка визначається із рівняння (2.2.24), набуде вигляду

$$V_x = \frac{\gamma \cdot H}{m \cdot \omega}. \quad (2.2.45)$$

Визначене таким чином усталене рішення має період, рівний M періодам вимушуючого зусилля.

На рис.2.4 відображені траєкторії переміщення елементарного шипа шарошки в інтервалами між ударами в площині x, y .

2.2.2. Руйнування застиглого матеріалу внаслідок обертання руйнівних робочих елементів шарошок

Наступне дослідження полягає у виведенні системи диференціальних рівнянь динамічних процесів переміщення та впливу на поверхню обробки робочих ріжучих елементів інструменту, які обертаються і розглядаються як «тверде тіло», і де окремі основні кінематичні параметри, і системи координат, які далі розглядаються, наведені на рис. 2.5. Система $\{X, Y, Z\}$ є інерційною, а система $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ є жорстко пов'язана із недеформованим положенням робочих елементів інструменту із поверхнею руйнування. Припускаємо, що вісь $\bar{z}$ співпадає із номінальною віссю симетрії тіла. Вектор R задає положення початку координат системи $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ в системі $\{X, Y, Z\}$, а вектор a визначає положення центра мас недеформованого тіла в системі координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$. Приймаємо, що вектор a лежить у площині $\{\bar{x}, \bar{y}\}$.

Кутова швидкість системи координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ по відношенню до системи координат $\{X, Y, Z\}$ задається вектором Ψ . Кутова орієнтація системи координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ відносно системи координат $\{X, Y, Z\}$ визначається кутами Ейлера (рис. 2.6), як кути, що описують повороти абсолютно твердого тіла у тримірному евклідовому просторі. Осі X', Y', Z' на рис. 2.6 є паралельними відповідно осям X, Y, Z , а орієнтування системи координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ визначається наступною послідовністю поворотів: а) поворотом на кут α_1 навколо осі X' ; б) поворотом на кут α_2 навколо осі y та в) поворотом на кут ϕ навколо осі z . Система координат $\{x, y, z\}$ (див рис. 2.6) і є тією безобертовою системою координат, про яку вже йшла мова на початку даного підрозділу, що у подальшому відіграє доволі значну роль у наступних побудовах.

Компоненти вектора Ψ в системі координат $\{x, y, z\}$ виражаються наступним чином через кути Ейлера та їх похідні:

$$\Psi_x = \dot{\alpha}_1 \cdot \cos \alpha_2, \quad \Psi_y = \dot{\alpha}_2, \quad \Psi_z = \dot{\phi} + \dot{\alpha}_1 \cdot \sin \alpha_2 \quad (2.2.46))$$

Якщо вектор кутової швидкості системи координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ відносно $\{x, y, z\}$ позначити через w , то

$$w_x = w_z = \dot{\phi} \quad (2.2.47)$$

Вектор Ψ^r кутової швидкості системи координат $\{x, y, z\}$ відносно $\{X, Y, Z\}$ відповідно буде рівним

$$\Psi^r = \Psi - w \quad (2.2.48)$$

Операція диференціювання по часові у різних системах координат для довільного вектору v визначається наступним чином:

$$\dot{v} = \left. \frac{dv}{dt} \right|_{X,Y,Z} - \text{швидкість зміни вектора } v \text{ для спостерігача, зв'язаного із}$$

інерційною системою координат;

$$\hat{\dot{v}} = \left. \frac{dv}{dt} \right|_{x,y,z} - \text{швидкість зміни вектора } v \text{ для спостерігача, зв'язаного із}$$

інерційною системою координат $\{x, y, z\}$;

$$\bar{\dot{v}} = \left. \frac{dv}{dt} \right|_{\bar{x},\bar{y},\bar{z}} - \text{швидкість зміни вектора } v \text{ для спостерігача, зв'язаного із}$$

інерційною системою координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$.

На рис. 2.7 показані решта кінематичних параметрів, які використовуються в системі координат; i -те тверде тіло, наведене на рис. 2.7, є одним із n твердих тіл, що входять в дану розрахункову систему. Система координат $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$, яка жорстко зв'язаного із i -тим твердим тілом, що обертається відносно системи координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$ із кутовою швидкістю w^i . Центр мас i -того тіла співпадає із початком координат системи $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$.

Система координат $\{x_i, y_i, z_i\}$ визначає недеформоване положення та орієнтацію системи координат $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$. Осі x_i, y_i та z_i є паралельними відповідно осям $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$.

Іноді буде необхідно виразити компоненти векторів у кожній із різних систем координат. При цьому застосовуються позначення, наведені нижче на прикладі довільного вектора v :

$(v)_I$ – компоненти в системі координат $\{X, Y, Z\}$;

(v) – компоненти в системі координат $\{x, y, z\}$;

$(v)_{\bar{i}}$ – компоненти в системі координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$;

$(v)_i$ – компоненти в системі координат $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$.

Наведені компоненти пов'язані наступними ортогональними перетвореннями координат:

$$\begin{aligned}(v) &= [A_1] \cdot (v)_I, \quad (v)_I = [A_1]^T \cdot (v); \\ (v)_{\bar{i}} &= [A_2] \cdot (v), \quad (v) = [A_2]^T \cdot (v)_{\bar{i}}; \\ (v)_i &= [A_i] \cdot (v)_{\bar{i}}, \quad (v)_{\bar{i}} = [A_i]^T \cdot (v)_i,\end{aligned}\tag{2.2.49}$$

де T – позначення операції транспонування матриці.

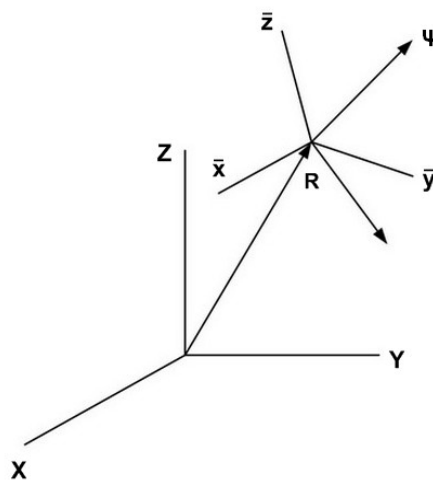


Рис. 2.5. Основні системи координат.

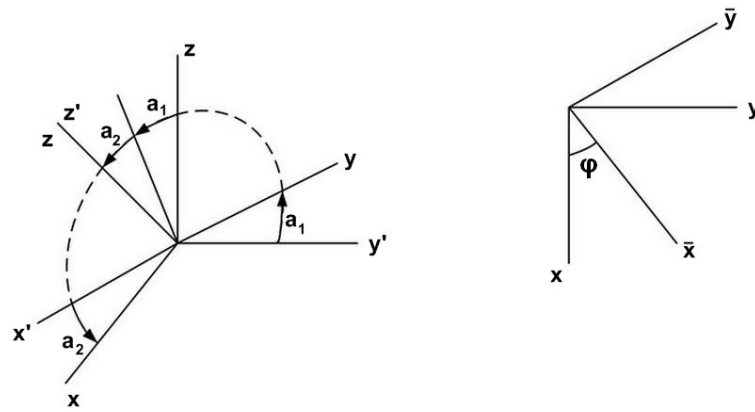


Рис. 2.6. Визначення кутів Ейлера.

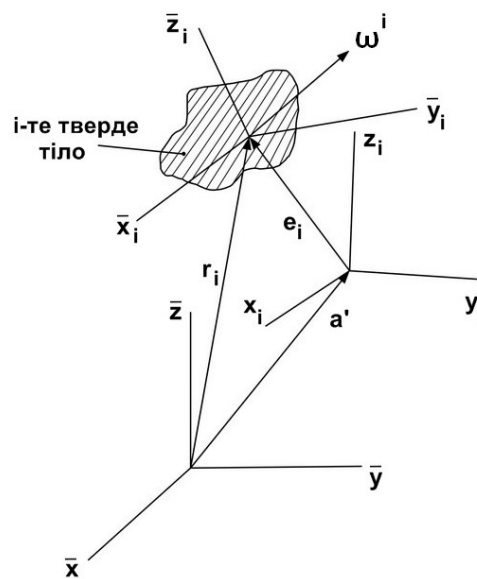


Рис. 2.7. Додаткові кінематичні змінні та системи координат.

Із рис. 2.7 видно, що вектор e^i визначає положення початку системи координат $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$ в системі $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$, тоді як вектор a^i задає положення початку системи $\{x_i, y_i, z_i\}$ в координатній системі $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$. Вектор e^i визначає пружне переміщення початку координат.

Кутова орієнтація жорстко зв'язаної із тілом системи координат $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$ відносно $\{x_i, y_i, z_i\}$ задається сукупністю кутів Ейлера $\beta_1^i, \beta_2^i, \beta_3^i$ із тією ж послідовністю поворотів, що й для кутів α_1, α_2 та ϕ на рис. 2.6. Кути β^i та їх похідні пов'язані із компонентами вектора w^i наступними залежностями:

$$\begin{aligned}
w_{\bar{x}}^i &= \bar{\beta}_1^i \cdot \cos \beta_2^i \cdot \cos \beta_3^i + \bar{\beta}_2^i \cdot \sin \beta_3^i; \\
w_{\bar{y}}^i &= -\bar{\beta}_1^i \cdot \cos \beta_2^i \cdot \sin \beta_3^i + \bar{\beta}_2^i \cdot \cos \beta_3^i; \\
w_{\bar{z}}^i &= \bar{\beta}_3^i + \bar{\beta}_1^i \cdot \sin \beta_2^i.
\end{aligned} \tag{2.2.50}$$

Далі розглядатиметься питання визначення робочої системи основних рівнянь переміщення. Ці рівняння включають в себе: а) рівняння руху кожного із n твердих тіл; б) рівняння переміщення системи твердих тіл.

У вже наведених працях [15,16] показано, що вектор e^i пружного зміщення i -того твердого тіла задовольняє наступне рівняння:

$$\begin{aligned}
(F^i)_{\bar{i}} - m_i \cdot [A_2] \cdot [A_1] \cdot (\ddot{R})_i - \{[(\dot{\Psi})_{\bar{i}}] - [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot [(\Psi)_{\bar{i}}]\} \cdot (a^i)_{\bar{i}} = \\
= m_i \cdot (\ddot{e}^i)_{\bar{i}} + 2m_i \cdot [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot (\ddot{e})_{\bar{i}} + [(\dot{\Psi})_{\bar{i}}] \cdot (e^i)_{\bar{i}} + [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot (e^i)_{\bar{i}} + (F^{i_0})_{\bar{i}}
\end{aligned} \tag{2.2.51}$$

де m_i – маса i -того тіла;

F^i та F^{i_0} – відповідно вектор зовнішнього зусилля, прикладений до i -го твердого тіла, та внутрішнє зусилля в i -му твердому тілі, яке виникає внаслідок пружних зміщень.

Матриці типу $[(\dot{\Psi})_{\bar{i}}]$ та $[(\Psi)_{\bar{i}}]$ дозволяють вивести матричний еквівалент операції векторного перемножування:

$$(A \times B)_{\bar{i}} = [(A)_{\bar{i}}] \cdot (B)_{\bar{i}} = \begin{bmatrix} 0 & -A_{\bar{z}} & A_{\bar{y}} \\ A_{\bar{z}} & 0 & -A_{\bar{x}} \\ -A_{\bar{y}} & A_{\bar{x}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{\bar{x}} \\ B_{\bar{y}} \\ B_{\bar{z}} \end{bmatrix}$$

Далі пружний поворот пружного i -го твердого тіла визначається наступним рівнянням:

$$\begin{aligned}
(M^i)_i - [J_i^i] \cdot (\dot{\Psi})_i - [(\Psi)_i] \cdot [J_i^i] \cdot (\Psi)_i = [J_i^i] \cdot (\ddot{w}^i)_i + [(\dot{w}^i)] \cdot [J_i^i] \cdot (w^i)_i + \\
+ [(d^i)_i] \cdot (w^i)_i + (M^{i_0})_i
\end{aligned} \tag{2.2.52}$$

де M^i та M^{i_0} – зовнішній та реактивний обертові моменти, прикладені до i -го твердого тіла;

$[J_i^i]$ – матриця моментів інерції i -го твердого тіла.

Верхній та нижній індекси i у цих матричних виразах вказують відповідно, що матриця моментів інерції відноситься до i -го твердого тіла і що її елементи записані

в системі координат $\{\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i\}$, яка пов'язана із i -тим твердим тілом. У рівнянні (2.52) матриця $[(d^i)_i]$ визначається як

$$(d^i)_i = \{j_i \cdot [U] - 2 \cdot [J_i^i]\} \cdot (\Psi)_i; \quad j_i = \text{tr}[J_i^i], \quad (2.2.53)$$

де $[U]$ – одинична матриця; символом tr позначається слід поля або слід матриці.

Для спрощення рівняння переміщення приймаються наступні припущення, які застосовуються в лінійній теорії пружності та опорі матеріалів:

а) компоненти навантажень, які прикладені до конструкції механізму інструменту, та деформацій, які він отримує, можуть бути описані в недеформованій системі координат;

б) деформації, яким підлягає конструкція механізму, лінійно залежать від прикладених навантажень.

Основне значення припущення а) полягає у тому, що n матриць, направляючих косинусів $[A_i]$, зводяться до одиничних. Із тією ж степінню точності рівняння (2.2.50) приводяться до наступного вигляду:

$$(w^i)_i = (w^i)_{\bar{i}} = (\bar{\beta}^i). \quad (2.2.54)$$

Отже,

$$(\bar{w}^i)_i = (\bar{w}^i)_{\bar{i}} = (\bar{\beta}^i)_{\bar{i}}. \quad (2.2.55)$$

Оскільки складові другого порядку є дуже малими, які мають вектори β^i, e^i та їх похідні, то ми ними нехтуємо в зв'язку із незначними деформаціями, відповідно члени

$$[(\dot{\Psi})_{\bar{i}}] \cdot (e^i)_{\bar{i}}; \quad [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot (e^i)_{\bar{i}} \quad (2.2.56)$$

також зникають.

Використання припущення б) у рівняннях переміщень приводить до утворення матриці жорсткості. Визначення цієї матриці буде у вигляді [17]:

$$\begin{bmatrix} (F^{10})_{\bar{i}} \\ (M^{10})_{\bar{i}} \\ (F^{20})_{\bar{i}} \\ (M^{20})_{\bar{i}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ (F^{n0})_{\bar{i}} \\ (M^{n0})_{\bar{i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{K_{11}} \\ \underline{K_{12}} \\ \underline{K_{21}} \\ \underline{K_{22}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{K_{n1}} \\ \underline{K_{n2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (e^1)_{\bar{i}} \\ (\beta^1)_{\bar{i}} \\ (e^2)_{\bar{i}} \\ (\beta^2)_{\bar{i}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ (e^n)_{\bar{i}} \\ (\beta^n)_{\bar{i}} \end{bmatrix} \quad (2.2.57)$$

Позначивши стовпчик у лівій частині через $(Q)_{\bar{i}}$, а у правій – через $(x)_{\bar{i}}$, одержуємо:

$$(Q)_{\bar{i}} = [K] \cdot (x)_{\bar{i}} \quad (2.2.58)$$

та

$$(F^{i0})_{\bar{i}} = [K_{i1}] \cdot (x)_{\bar{i}}; \quad (M^{i0})_{\bar{i}} = [K_{i2}] \cdot (x)_{\bar{i}}. \quad (2.2.59)$$

Послідовне застосування наведених значень припущення про незначну величину деформації приводить рівняння (2.2.51) і (2.2.52) до наступного виду:

$$\begin{aligned} (F^i)_i - m_i [A_2] \cdot [A_1] \cdot (\ddot{R})_I - m_i \{[(\dot{\Psi})_{\bar{i}}] + [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot [(\Psi)_{\bar{i}}]\} = \\ = m_i (\ddot{e}^i)_{\bar{i}} + 2m_i \cdot [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot (\bar{e}^i)_{\bar{i}} + [K_{i1}] \cdot (x)_{\bar{i}} \end{aligned} \quad (2.2.60)$$

$$(M^i)_{\bar{i}} - [J_{\bar{i}}^i] \cdot (\dot{\Psi})_{\bar{i}} - [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot [J_{\bar{i}}^i] \cdot (\Psi)_{\bar{i}} = [J_{\bar{i}}^i] \cdot (\bar{\beta}^i)_{\bar{i}} + (d^i)_{\bar{i}} (\bar{\beta}^i)_{\bar{i}} + [K_{i2}] \cdot (x)_{\bar{i}}. \quad (2.2.61)$$

Із тією ж точністю описується рух інструменту в цілому вектором R , який визначається наступним рівнянням [15]:

$$\begin{aligned} (F^r)_I = m \cdot (\ddot{R})_I + m \cdot [A_1]^T \cdot [A_2]^T \cdot \{[(\dot{\Psi})_{\bar{i}}] + [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot [(\Psi)_{\bar{i}}]\} \cdot (a)_{\bar{i}} + \\ + [A_1]^T \cdot [A_2]^T \cdot \sum m_i \cdot (\bar{e}^i)_{\bar{i}} + 2 \cdot [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot (\bar{e}^i)_{\bar{i}} \end{aligned} \quad (2.2.62)$$

де m – сумарна маса елементів інструменту обробки, яка рівна:

$$m \cdot a = \sum m_i a_i; \quad (F^r)_I = \sum (F^i)_I. \quad (2.2.63)$$

Додавання у рівняннях (2.2.63) і далі проводиться для всіх n твердих тіл елементів інструменту. Остаточне визначне рівняння обертання інструменту обробки застиглого пеку матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} (M^r)_{\bar{i}} = & [J_{\bar{i}}] \cdot (\dot{\Psi})_{\bar{i}} + [(\Psi)_{\bar{i}}] \cdot [J_{\bar{i}}] \cdot (\Psi)_{\bar{i}} + m \cdot [(a)_{\bar{i}}] \cdot [A_2] \cdot [A_1] \cdot (\ddot{R})_I + \\ & + \sum m_i [(a^i)_{\bar{i}}] \cdot \{(\ddot{e}^i)_{\bar{i}} + 2 \cdot [(\Psi_{\bar{i}})] \cdot (\dot{e}^i)\} + \sum \{[J_{\bar{i}}^i] \cdot (\ddot{\beta}^i)_{\bar{i}} + [(d^i)_{\bar{i}}] \cdot (\ddot{\beta}^i)_{\bar{i}}\} \end{aligned} \quad (2.2.64)$$

де $[J_{\bar{i}}]$ – матриця моментів інерції недеформованої системи твердих тіл, а вектор M^r буде рівним:

$$M^r = \sum \{M^i + (a^i \times F^i)\}.$$

Щодо параметрів, які фігурують в рівняннях (2.2.60) і (2.2.61), здебільшого приймаються наступні допущення:

а) матриця моментів інерції $[J_{\bar{i}}^i]$ для кожного із твердих тіл, які входять в систему, є діагональною

$$I_{xx}^i = I_{yy}^i;$$

б) вектори $(a^i)_{\bar{i}}$, які визначають номінальне положення центра мас i -того твердого тіла в системі координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$, лежать на осі $\bar{z}$, тобто

$$a_x^i = a_y^i = 0; \quad (2.2.65)$$

в) пружні характеристики робочих елементів інструменту є асиметричними, тобто матриці $[K_{i1}]$ та $[K_{i2}]$ є інваріантними відносно повороту осей $\bar{x}$ та $\bar{y}$ навколо осі $\bar{z}$. А саме ці матриці є інваріантними відносно перетворення координат

$$(v)_{\bar{i}} = [A_2] \cdot (v)_i \cdot (v) = [A_2]^T \cdot (v)_{\bar{i}}. \quad (2.2.66)$$

Наведені вище аналітичні побудови привели до системи визначних рівнянь, яка записана в системі координат $\{X, Y, Z\}$ та $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$. Далі ми розглядатимемо ці рівняння, що записуються в системі координат $\{X, Y, Z\}$ та $\{x, y, z\}$. Такий запис значно полегшує введення зв'язків у точках кріплення робочих елементів.

Прийняті припущення стосовно параметрів рівнянь (2.2.60) та (2.2.61) зводились до вимог інваріантності $[J^i_{\bar{i}}]$, (a^i) , $[K_{i1}]$ та $[K_{i2}]$ відносно перетворення координат (2.2.66). А саме:

$$[J^i] = [A_2]^T \cdot [J^i_{\bar{i}}] \cdot [A_2],$$

$$(a^i)_{\bar{i}} = [A_2] \cdot (a^i) = (a^i).$$

Отже, формулювання рівнянь (2.2.60) і (2.2.61) для системи координат, яка не обертається $\{x, y, z\}$ ускладнюється лише перетворенням змінних.

Далі розглядатимемо задачу заміни змінних (та їх похідних) у рівняннях (2.2.60) та (2.2.61). Якщо для перетворення компонент довільного вектора v , заданого в системі координат $\{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$, до системи $\{x, y, z\}$ застосовується рівняння (2.2.66), то

$$(\bar{v})_{\bar{i}} = [A_2] \cdot (v) + [A_2] \cdot (\hat{v}). \quad (2.2.67)$$

У зв'язку із тим, що

$$[A_2] = -[(\omega)_{\bar{i}}] \cdot [A_2], \text{ де } [(\omega)] = [A_2]^T \cdot [(\omega)_{\bar{i}}] \cdot [A_2],$$

рівняння (2.2.67) приймає наступний вигляд:

$$(\bar{v})_{\bar{i}} = [A_2] \cdot \{(\hat{v}) - [(\omega)] \cdot (v)\}. \quad (2.2.68)$$

Аналогічно:

$$(\dot{\Psi})_{\bar{i}} = [A_2] \cdot \left\{ \left(\hat{\Psi} \right) + [(\Psi)] \cdot (\omega) \right\}. \quad (2.2.69)$$

Диференціюючи (2.2.68), отримуємо

$$(\ddot{v})_{\bar{i}} = [A_2] \cdot \left\{ (\hat{\ddot{v}}) - 2 \cdot [(\omega)] \cdot (\hat{v}) - [(\dot{\omega})] \cdot (v) + [(\omega)] \cdot [(\omega)] \cdot (v) \right\}. \quad (2.2.70)$$

Із врахуванням (2.2.68)...(2.2.70) рівняння (2.2.60) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} (F^i) - m_i \cdot \left\{ \left[\left(\hat{\Psi} \right) \right] + [(\Psi \times \omega)] + [(\Psi)] \cdot [(\Psi)] \right\} \cdot (a^i) - m_i \cdot [A_1] \cdot (\ddot{R})_i = \\ = m_i \cdot (\ddot{e}^i) + [c^i] \cdot (\hat{e}^i) + [K_{i1}] \cdot (x), \end{aligned} \quad (2.2.71)$$

де

$$[c^i] = 2m_i \cdot [(\Psi^r)], \quad (2.2.72)$$

а Ψ^r визначається рівністю (2.2.48).

Підставляючи вирази (2.2.68)...(2.2.70) в залежність (2.2.61), знаходимо:

$$(M^i) - [J^i] \cdot \{(\dot{\Psi}) + (\Psi \times \omega)\} - [(\Psi)] \cdot [J^i] \cdot (\Psi) = [J^i] \cdot (\hat{\beta}^i) + [D^i] \cdot (\hat{\beta}^i) + [K_{i2}] \cdot (x), \quad (2.2.73)$$

$$\text{де} \quad [D^i] = [(d^i)] - 2 \cdot [J^i] \cdot [(\omega)]. \quad (2.2.74)$$

Перетворюючи аналогічним чином рівняння (2.2.62) та (2.2.64) до системи координат $\{x, y, z\}$, отримуємо відповідно:

$$(F^r)_i = m \cdot (\ddot{R})_i + m \cdot [A_1]^T \left\{ \left[(\hat{\Psi}) \right] + [(\Psi \times \omega)] + [(\Psi)] \cdot [(\Psi)] \right\} \cdot (a), \quad (2.2.75)$$

$$(M^r) = [J] \cdot (\hat{\Psi}) + [J] \cdot (\Psi \times \omega) + [(\Psi)] \cdot [J] \cdot (\Psi) + m \cdot [(a)] \cdot [A_1] \cdot (\ddot{R})_i + \\ + \sum 2 \cdot \left\{ m_i \cdot [(a^i)] \cdot [(\Psi)] \cdot (\hat{e}^i) + [(d^i)] \cdot (\hat{\beta}^i) \right\}. \quad (2.2.76)$$

У рівняннях (2.2.75) та (2.2.76) присутні наступні параметри, які залежать від часу:

$$\left. \begin{aligned} (a) &= [A_2] \cdot (a)_i; \\ [(a)] &= [A_2]^T \cdot [(a)_i] \cdot [A_2]; \\ J &= [A_2]^T \cdot [J_i] \cdot [A_2] \end{aligned} \right\} \quad (2.2.77)$$

На рис. 2.8 і рис. 2.9 графічно наведені результати інтегрування системи рівнянь (2.2.75) та (2.2.76) у площинах $x - z$ та $y - z$ із витримуванням двох власних форм.

2.3. Моделі процесів руйнування застиглих залишків вантажів від динамічного удару та обертання робочих елементів

Як вже наводилось вище, технологічний процес технічного обслуговування вагонів-цистерн передбачає, крім руйнування монолітності застиглих залишків речовин, здійснювати видалення із порожнини котлів цистерн утвореного руйнуванням шламу та одночасне якісне формування внутрішньої поверхні металу. Така операція проводиться при сприянні кільцевої торцевої щітки із евольвентним розміщенням щіткових секцій.

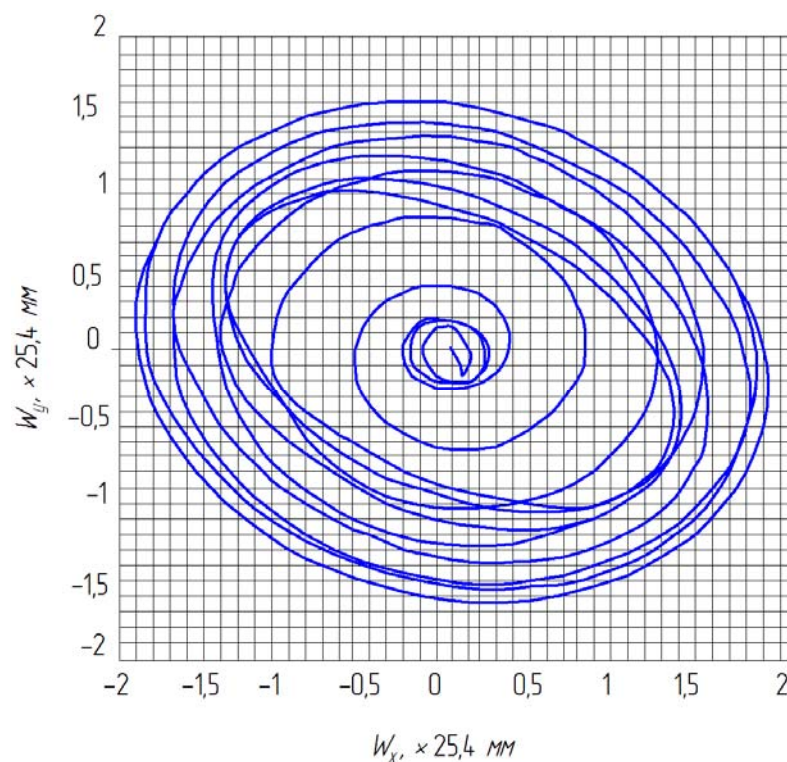


Рис. 2.8. Залежність w_y від w_x для шарошки у центрі інструменту.

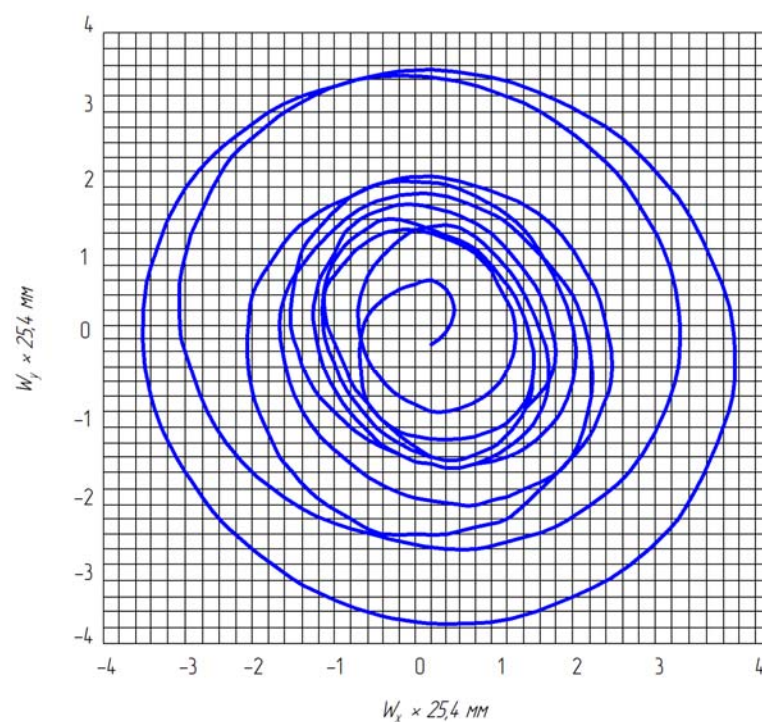


Рис. 2.9. Залежність w_y від w_x для шарошок по колу інструменту.

Контактна взаємодія гнучких робочих елементів очисних секцій за своїми особливостями значно відрізняється від характеру впливу на поверхню обробки робочих елементів шарошок. Особливості полягають в тому, що контактні зусилля

гнучких робочих елементів в момент миттєвого удару об поверхню зруйнованого шламу впливають не лише на поверхню, але й на сусідні (вигнуті та ущільнені) дротинки даної секції. Дані обставини приводять до зниження інтенсивності деформування поверхневого шару як застиглої маси, так і металу цистерни. В зв'язку із цим, оцінка дійсної картини контактної взаємодії представляє собою певні труднощі.

Абстрагуючись від реальних умов роботи кожного елементарного гнучкого робочого елементу, розглядатимемо його удар, як модель взаємодії початкового впливу двох тіл, які обертаються в протилежні один відносно іншого сторони: одиничний гнучкий робочий елемент – поверхня обробки. На рис. 2.10 наведена схема моделі даної контактної взаємодії. Така прийнята модель контактної взаємодії є максимально наближеною до реальних умов обробки очисними секціями інструменту сферичної внутрішньої поверхні цистерни.

Припускаємо, що підскакування дротинки під час удару перешкоджається дротинками, які розташовані позаду. У такому випадку удар можна вважати абсолютно пружним, який характеризується лише активним етапом, в кінці якого швидкість одиничної дротинки буде рівною нулю.

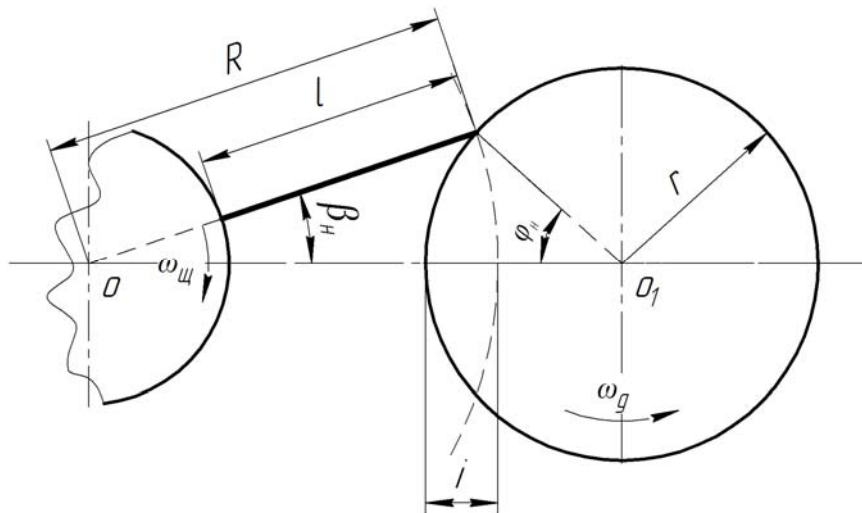


Рис. 2.10. Схема взаємодії при ударі одиничного гнучкого елемента із поверхнею обробки.

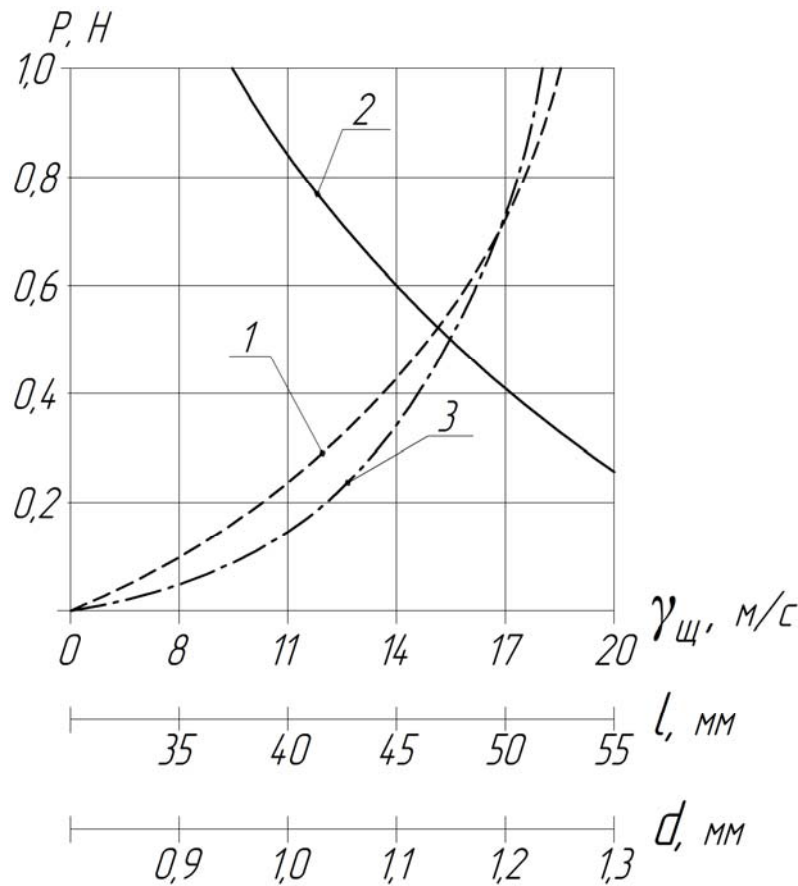


Рис. 2.11. Вплив швидкості удару (1), довжини вільного вільоту дротинки (2) та її діаметру (3) на зусилля контактування.

Справді, якщо розглядати рух кожного із співударних тіл (одиничний гнучкий елемент – поверхня обробки) на основі теорем динаміки відносно миттєвих сил, де до дротинки застосована теорема про зміну головного моменту кількості руху, а для поверхні обробки – теорема кінетичної енергії, то можна встановити залежність кінцевої швидкості V_K від конструктивних і технологічних параметрів торцевої секційної щітки:

$$V_K = \frac{V_{щ}}{1 + 3 \frac{m_i}{m_n} \cdot \frac{R \cdot l^2}{R^3 - (R - l)^3} \cdot \sin^2(\beta_H - \varphi_H)}, \quad (2.3.1)$$

де m_i та m_n – маси, відповідно, одиничної дротинки та одиничного об'єму речовини видалення;

β_H та φ_H – відповідно робочий кути повороту щітки та контакту гнучкого елемента з поверхнею обробки (див. рис. 2.10), які визначаються:

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta_H &= 1 - \frac{i}{2R} \cdot \frac{2r-i}{R+r-i}; \\ \cos \varphi_H &= 1 - \frac{i}{2r} \cdot \frac{2R-i}{R+r-i}. \end{aligned} \right\} \quad (2.3.2)$$

Аналіз формули (2.3.1) показує, що при $m_i / m_n \rightarrow \infty$, то $V_K \rightarrow 0$.

Оскільки $m_i \gg m_n$, то припущення про рівність нулю швидкості руху одиничного щіткового елемента у місці його контакту із поверхнею слід вважати абсолютно справедливим. В той же час останній висновок означає, що кінетична енергія W_K ударяючого тіла перетворюється в потенціальну енергію W_{II} його деформації ($W_K = W_{II}$). Для консольно закріпленого одиничного гнучкого елемента:

$$W_{II} = \frac{P^2 \cdot l_{32}^3}{G \cdot E \cdot J_{екв}}; \quad (2.3.3)$$

$$W_K = \frac{J_0 \cdot \omega_{щ}^2}{2}, \quad (2.3.4)$$

де l_{32} – довжина дротинки, яка вигинається при контакті;

$J_{екв}$ – момент інерції поперечного перерізу одиничного гнучкого робочого елемента;

P – максимальне зусилля, яке діє на кінці дротинки;

J_0 – динамічний момент інерції одиничного гнучкого робочого елемента відносно точки 0 (див. рис. 2.10).

У процесі даного (кінцевого) контактування приведену масу співудару двох тіл (одиничний гнучкий елемент – поверхня обробки) можна замінити масою одиничного гнучкого робочого елемента. Виражаючи J_0 через m_i , враховуючи, що $J_{екв} = Jk^4$, та прирівнюючи залежності (2.3.3) і (2.3.4), отримуємо наступне:

$$P = k^2 \frac{\omega_{щ}}{l_{32}^2} \cdot \sqrt{m_n \cdot [R^3 - (R - l_{32})^3]} \cdot E \cdot J. \quad (2.3.5)$$

Якщо вважати, що удар здійснюється передніми (атакуючими) дротинками секції, які перед входженням в контакт із поверхнею обробки перебувають у нещільному (розрідженому) стані, то їх взаємним впливом можна знехтувати. В

такому випадку вираз (2.3.5) можна використовувати для аналізу роботи не лише одиничних елементів, а й всієї щіткової секції.

На рис. 2.11 у вигляді графіків наведені залежності контактного зусилля від технологічних режимів обробки. Зусилля P зростає із підвищенням швидкості обертання торцевої щітки, розмірів поперечного перерізу одиничного гнучкого робочого елемента та зменшення величини його вільного вильоту. Крива 1 отримана для щіткової дротинки діаметром $d = 0,8$ мм та довжини її вільного вильоту $l = 30$ мм; крива 2 – для $d = 1,0$ мм при коловій швидкості інструменту $V_{\text{ш}} = 7,55$ м/с; крива 3 – для $l = 45$ мм при $V_{\text{ш}} = 7,55$ м/с. Зовнішній діаметр кільцевої торцевої щітки прийнятий рівним 320 мм. Характер зміни величини зусилля контактної взаємодії є немонотонним. Найбільш різко воно зростає при значеннях $l = 40$ мм та $d > 1,1$ мм, а також в діапазоні швидкостей, які переважають 17,0 м/с.

При зустрічному контакті гнучких робочих елементів евольвентних секцій із поверхнею обробки відбувається косий удар. Зусилля P в початковий момент контакту має напрям вниз по нормалі до поверхні обробки. Із зменшенням швидкості переміщення дротинки до її нульового значення відбувається зближення контактуючих поверхонь. Приймаємо, що при досягненні найбільшого зближення контактне зусилля P стає напрямленою вздовж вектора колової швидкості $V_{\text{ш}}$. При цьому максимальному зусиллю відповідає найбільша величина деформації.

Характеристика ударного деформування евольвентними секціями інструменту, яке крім остаточного руйнування роздроблених залишків речовин одночасно здійснює якісне формування поверхні металу котла цистерни, визначається не лише величиною контактного зусилля, фізико-механічними властивостями контактуючих тіл, але й розмірами та формою робочої поверхні гнучких робочих елементів.

Динамічне навантаження із швидкістю (16...18) м/с приводить до змін властивостей металу внутрішньої поверхні цистерни. У більшості випадків у процесах поверхнево-зміцнюючого оброблення дослідники акцентують увагу на границях текучості матеріалу, із виникнення якої пов'язують пластичну деформацію [18,19,20]. В роботі [21] показано, що під час удару динамічна границя текучості отримує значні зміни. Так, для низьколегованої сталі марки 09Г2С при швидкості

поверхневого удару $16,0 \text{ м/с}$ динамічна границя текучості σ_T у порівнюванні із статичною границею текучості σ_T у 2,2 рази (із 305 МПа до 670 МПа).

Форма робочої поверхні гнучких робочих елементів має доволі складну конфігурацію і залежить від часу та характеру попередньої обробки робочої поверхні щіткових секцій торцевої щітки, які визначаються її режимами та твердістю поверхні. Коротковорсні щітки мають здатність самозагострюватись. У довговорсних щітках після певного терміну роботи робочі кромки стають заокругленими. Форма робочого торця дротинки наведений на рис. 2.12.

Рішення задачі, пов'язаної із нецентральним косим ударом дротинкою із складною формою робочого торця, має певні труднощі. Тому у першому наближенні користуємося емпіричною залежністю для пружно-пластичної контактної деформації [2,23], $h = K \cdot P^n$ де K і n – коефіцієнти, які залежать від властивостей матеріалу та форми ударного елемента.

Величина зближення в проекції на нормаль визначається із врахуванням кута атаки, показаного на рис. 2.13

$$h_{\max} = K \cdot P^n \cdot \sin(\varphi_H + \beta_H). \quad (2.3.6)$$

Ударна обробка робочими торцями щіткових дротинки, які виготовляються із різних матеріалів, викликає неоднакові деформації поверхневого шару металу.

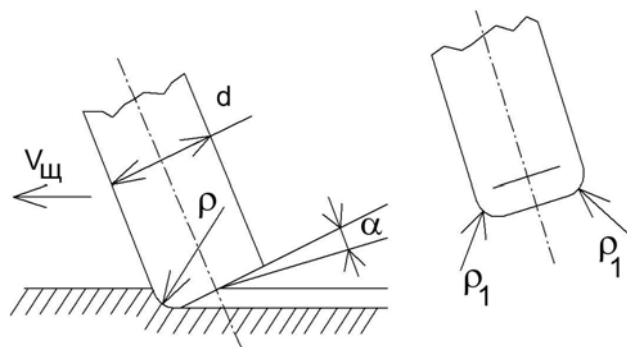


Рис. 2.12. Дійсна форма робочої поверхні одиничного елемента.

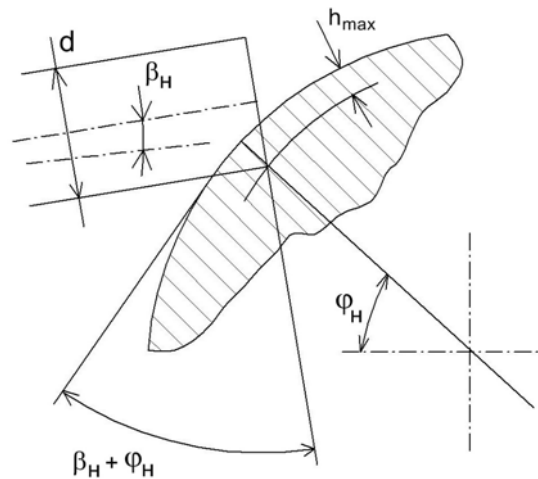


Рис. 2.13. Геометричні параметри контакту при ударі.

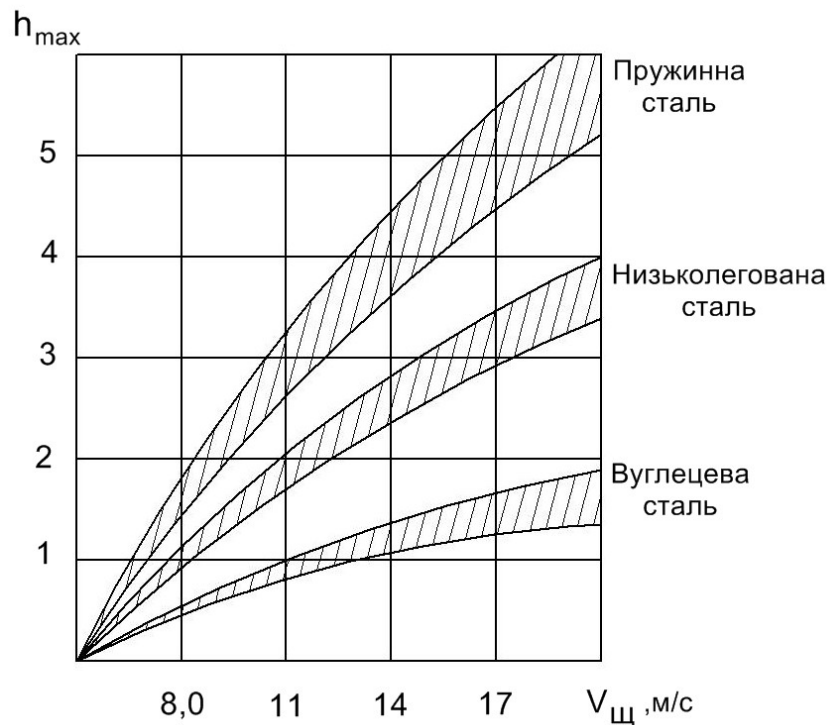


Рис. 2.14. Вплив швидкості обертання інструменту на величину пружно-пластичної деформації при контактуванні ударом.

На рис. 2.14 показано вплив швидкості удару, натягу (відстані заглиблення робочого торця дротинки в поверхню обробки) та матеріалу дротинки на величину пружно-пластичного заглиблення, розрахованого згідно залежності (2.3.6). Заштриховані на графіках області перебувають у межах натягу щіткових елементів $i = (3,0 \dots 5,0) \text{ мм}$. Як видно із графіка, величина максимального зближення робочого торця дротинки в проекції на нормаль буде максимальним, коли обробка поверхні буде проводитись дротинками, виготовленими із пружинної сталі.

2.4. Дослідження процесу руйнування методом кінцевих елементів

Механіка руйнування в останні роки стала самостійною дисципліною, яка дозволяє виявляти умови, при яких починається неконтрольований процес руйнування машин, конструкцій, їх елементів та матеріалів внаслідок виникнення і поширення тріщин. Знання механіки руйнування зможе допомогти інженеру або конструктору у справі запобігання небезпеки катастрофічного руйнування елементів конструкцій. Крім того, володіння теоретичними основами механіки тріщиноутворення дозволяє розробляти механізми і методики руйнування монолітності поверхневих відкладень і корозійних нашарувань, які не сприяють ефективній експлуатації механізмів і окремих конструкцій.

Два основні критерії руйнування, які відіграють фундаментальну роль в механіці руйнування, пов'язані із використанням принципу збереження енергії та коефіцієнтів інтенсивності напружень. Існуюча на даний час теорія тріщиноутворення ґрунтується на використанні принципу збереження енергії, у відповідності з яким джерелами енергії, яка необхідна для утворення нової поверхні руйнування у твердому тілі, повинна бути енергією пружного деформування і робота зовнішніх навантажень.

Інший підхід до теорії виникнення тріщин розглянутий вітчизняними науковцями [24, 25], які обмежилися дослідженням околиць вершини тріщини, розміри якої є малими у порівнюванні із характерними розмірами всього тіла, але, з іншого боку, достатньо великими у порівнюванні з розмірами атомів, щоб можна було б застосовувати лінійну теорію пружності. Була запропонована теорія, що руйнування починається тоді, коли інтенсивність напружень в околицях вершини досягає якоїсь певної критичної величини.

Основна мета даного теоретичного дослідження є вирішення задачі пружнопластичного руйнування. Далі будемо розглядати лише тип I деформування тріщини (тріщини нормального розриву).

Основна задача проектанта полягає у тому, щоб при розробці тієї чи іншої конструкції не допускати умов для виникнення крихкого руйнування. Для

вирішення цієї задачі необхідно точно знати про напружено-деформований стан навколо вершини тріщини, у місці її можливого утворення. Загально прийнятий підхід, відомий під назвою лінійно-пружної механіки руйнування, полягає у тому, що поведінка матеріалу в зоні вершини тріщини вважається лінійно-пружним. Відомо, що при вершині тріщини завжди виникають пластичні деформації [26], підхід, який ґрунтується на даній механіці, може привести до позитивних результатів лише для відносно крихких матеріалів, і для таких умов навантаження, при яких розміри пластичної зони при вершині тріщини мінімальні у порівнюванні з довжиною самої тріщини та товщиною дослідного зразка. Оскільки більшість технічних матеріалів є відносно пластичними і товщини зразків не завжди є великими, в окремих випадках пластичними деформаціями при вершині тріщини неможливо просто нехтувати.

При проведенні розрахунків пластичність на вершині тріщини найчастіше припускають, що матеріал поводить себе як ідеально пружний. На практиці ж, як тільки деякий залежний від напруження вираз досягає своєї критичної величини, більшість матеріалів пластично деформуються. Внаслідок непружності у поведінці матеріалу можуть знадобитися видозміни певних положень лінійно-пружної механіки руйнування. Поширеними є два критерії текучості – Треска і Мізеса [27,28], відомі як відповідно гіпотези максимального дотичного напруження та питомої енергії формозмінення.

У відповідності з критерієм Треска текучість починається, коли найбільше критичне напруження досягає своєї критичної величини. Якщо записати критерій Треска, застосовуючи головні напруження σ_1 , σ_2 та σ_3 (припускаємо, що $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) і границя текучості перебуває у одновісному стані σ_{yp} , то отримуємо, що текучість матеріалу починається при умові

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_{yp}. \quad (2.4.1)$$

У відповідності з критерієм Мізеса потрібно, щоб критичної величини досягала питома енергія деформації зсуву. У відповідності із цим критерієм, записаним із

використанням головних напружень і границі текучості σ_{yp} , руйнування відбувається при виконанні умови

$$\sigma_{yp} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2.4.2)$$

Критерій Мізеса краще узгоджується із результатами експериментів, однак в інженерних розрахунках простіше застосовувати критерій Треска.

Однією з основних задач технічного проектування є недопущення крихкого руйнування. З цієї причини дослідження форми та розміру пластичної зони, які залежать від властивостей матеріалу, геометрії, навантаження та граничних умов, стає однією з найважливіших задач механіки руйнування.

Для того, щоб використовувати відповідний критерій текучості, розподілення напружень навколо вершини тріщини можна описати за допомогою наступних виразів для головних напружень через коефіцієнт інтенсивності напружень K_I [26]:

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right], \quad (2.4.3)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right], \quad (2.4.3,a)$$

$$\sigma_3 = \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) = 2\nu \cdot \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2.4.3,b)$$

Крім цього, σ_3 вказує на плоску деформацію, а за умови, що $\sigma_3 = 0$ – плоский напружений стан.

Підставляючи наведені співвідношення в критерій Мізеса, отримуємо рівняння границі пластичної зони θ (рис. 2.15), $r_p(\theta)$ у наступному вигляді:

$$r_p(\theta) = \frac{K_I}{4\pi \cdot \sigma_{yp}^2} \left[1,5 \cdot \sin^2 \theta + (1 - 2\nu)^2 \cdot (1 + \cos \theta)\right] \quad (2.4.4)$$

де r_p – радіус пластичної зони.

Для випадку плоскої деформації та для випадку плоского напруженого стану:

$$r_p(\theta) = \frac{K_I}{4\pi \cdot \sigma_{yp}^2} \left[1 + 1,5 \cdot \sin^2 \theta + \cos \theta\right] \quad (2.4.5)$$

Останнім часом в механіці пружнопластичного руйнування стали широко використовуватися спеціальні прийоми кінцево-елементного аналізу.

Метою даної роботи є розробка методу рішення задач пружнопластичного руйнування за допомогою восьмивузлових чотирикутних ізопараметричних елементів.

Основна ідея методу кінцевих елементів полягає у побудові дискретної моделі, яка складається із множини кусково-неперервних функцій, визначених на кінцевому числі замкнутих підобластей. Ці підобласті названі елементами, які з'єднуються одна з одною в спільних вузлах і які у сукупності апроксимують дану область. Компоненти узагальнених переміщень цих вузлів є основними невідомими задачі про диференціювання суцільного середовища.

Нехай вектор-стовпець $\{q\}$ складається із компонент узагальнених переміщень у вузлах, а вектор-стовпець $\{U\}$ – із переміщень елемента. Ці величини пов'язані між собою матричним співвідношенням виду:

$$[U] = [N] \{q\}, \quad (2.4.6)$$

де $[N]$ – функції форми, які є функціями локальних координат і повинні бути заданими у кожній вузловій точці. Символи $\{q\}$ та $[U]$ використані для позначення вектор-стовпця і матриці відповідно.

Позначаючи вектор узагальненої деформації символом $\{\varepsilon\}$ та виражаючи компоненти деформації через переміщення, можна записати

$$\{\varepsilon\} = [\bar{B}] \cdot \{U\}, \quad (2.4.7)$$

де $\{U\}$ – вектор переміщень; $[\bar{B}]$ – матричний оператор, який має наступний вигляд

$$[\bar{B}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (2.4.8)$$

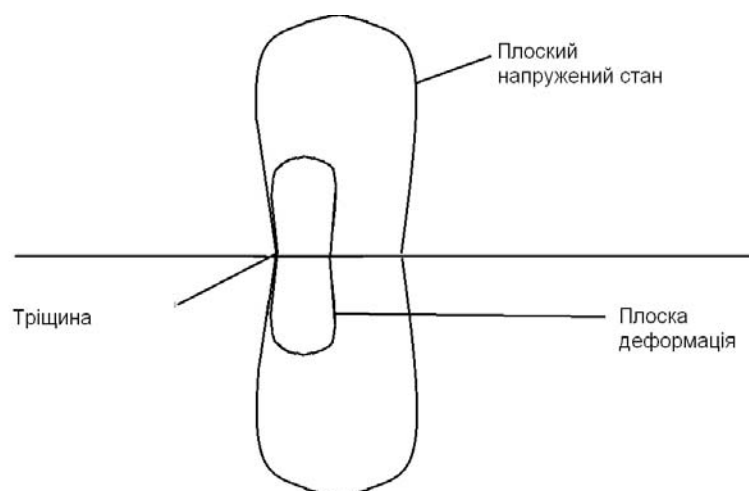


Рис. 2.15. Форма пластичної зони згідно критерію Мізеса.

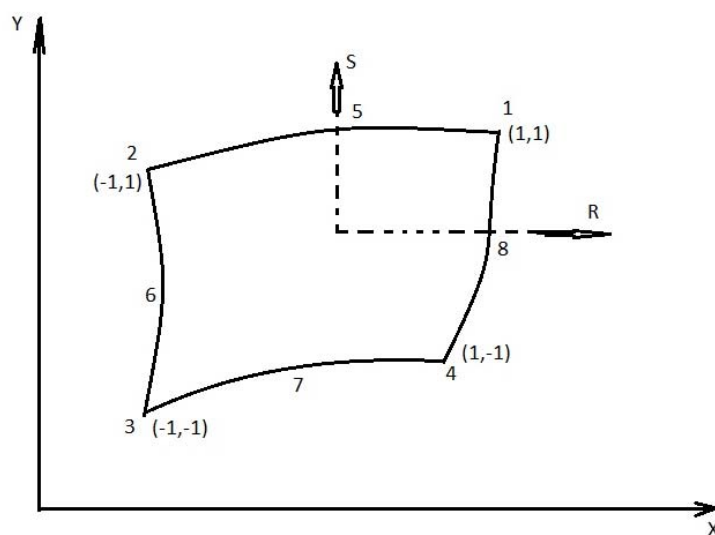


Рис. 2.16. Чотирикутний ізопараметричний елемент.

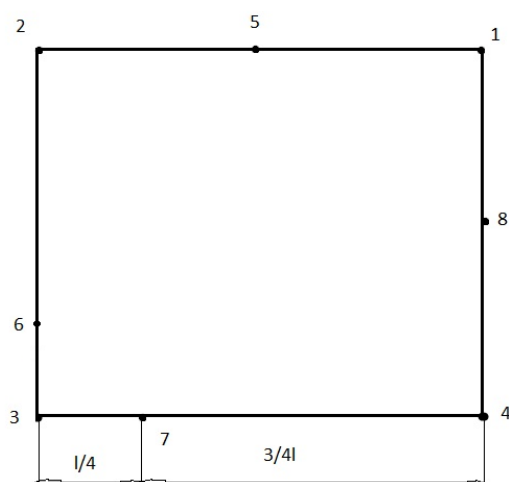


Рис. 2.17. Восьмивузловий чотирикутний елемент із зміщеними середніми вузлами.

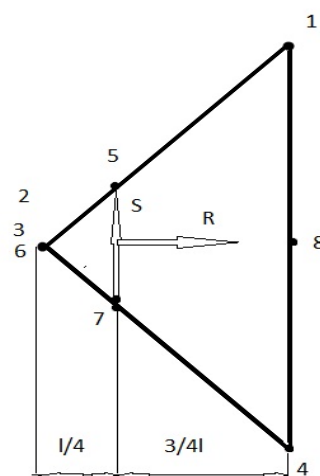


Рис. 2.18. Шестивузловий трикутний елемент із зміщеними середніми вузлами.

Використовуючи співвідношення, які описують залежність напружень від деформацій, вектор узагальненого напруження $\{\sigma\}$ виражаємо через вектор узагальненої деформації $\{\varepsilon\}$ у вигляді

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}, \quad (2.4.9)$$

де $[D]$ – матриця, яка характеризує властивості матеріалу, і яка рівна:

– для плоского напруженого стану

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu^2}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.4.10)$$

де E – модуль Юнга.

– для плоскої деформації

$$[D] = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.4.11)$$

де E та ν – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона відповідно.

Побудова матриці восьмивузлового ізометричного елемента достатньо описана у праці [23]. За допомогою перетворення

$$X = \sum_{i=1}^8 N_i(R, S) x_i \quad Y = \sum_{i=1}^8 N_i(R, S) y_i, \quad (2.4.12)$$

де N_i – функція форми, яка відповідає вузловій точці i із координатами (x_i, y_i) , побудова матриці жорсткості проводиться наведеним далі способом.

В системі координат $R - S$ значення координат вузлових точок R_i та S_i рівні ± 1 , а у точках, розташованих на середині сторін, одна із координат рівна нулю (рис. 2.16).

Функція $N_i(R, S)$ має наступний вигляд:

$$N_i(R, S) = \left[(1 + RR_i) \cdot (1 + SS_i) - (1 - R^2) \cdot (1 + SS_i) - (1 - S^2) \cdot (1 + RR_i) \right] \cdot \frac{R_i^2 \cdot S_i^2}{4} + \\ + (1 - R^2) \cdot (1 + SS_i) \cdot (1 - R_i^2) \cdot \frac{S_i^2}{2} + (1 - S^2) \cdot (1 + RR_i) \cdot (1 - S_i^2) \cdot \frac{R_i^2}{2}. \quad (2.4.13)$$

Очевидно, що, оскільки координати системи $R - S$ на границі кожного елемента приймає значення ± 1 , доданки, які мають множники $(1 - R^2)$ та $(1 - S^2)$, не можуть одночасно бути відмінними від нуля ні на якій границі. Таким чином, інтерполяційні функції для восьмивузлового ізопараметричного елемента можна показати наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} N_1(R, S) &= -\frac{1}{4} \cdot (1 + R) \cdot (1 + S) \cdot (1 - R - S), \\ N_2(R, S) &= -\frac{1}{4} \cdot (1 - R) \cdot (1 + S) \cdot (1 + R - S), \\ N_3(R, S) &= -\frac{1}{4} \cdot (1 - R) \cdot (1 - S) \cdot (1 + R + S), \\ N_4(R, S) &= -\frac{1}{4} \cdot (1 + R) \cdot (1 - S) \cdot (1 - R + S), \\ N_5(R, S) &= \frac{1}{2} \cdot (1 + S) \cdot (1 - R^2), \\ N_6(R, S) &= \frac{1}{2} \cdot (1 - R) \cdot (1 - S^2), \\ N_7(R, S) &= \frac{1}{2} \cdot (1 - S) \cdot (1 - R^2), \\ N_8(R, S) &= \frac{1}{2} \cdot (1 + R) \cdot (1 - S^2). \end{aligned} \right\} \quad (2.4.14)$$

Переміщення при цьому визначаються згідно інтерполяційних формул:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i(R, S) \cdot u_i \text{ та } v = \sum_{i=1}^8 N_i(R, S) \cdot v_i. \quad (2.4.15)$$

де u – переміщення в напрямі осі Z .

Деформації через переміщення виражаються за допомогою співвідношень

$$\{\varepsilon\} = [B] \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}. \quad (2.4.16)$$

де $[B]$ – матриця залежності деформації від переміщень.

Матриця $[B]$ матиме вигляд

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad (2.4.17)$$

де

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial R} \\ \frac{\partial N_i}{\partial S} \end{Bmatrix}, \quad (2.4.18))$$

де N_i – функція форми;

$[J]$ – матриця Якобі, яка визначається:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial R} & \frac{\partial y}{\partial R} \\ \frac{\partial x}{\partial S} & \frac{\partial y}{\partial S} \end{bmatrix}. \quad (2.4.19)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial R} x_i & \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial R} y_i \\ \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial S} x_i & \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial S} y_i \end{bmatrix}. \quad (2.4.20)$$

Диференціали поля переміщень можна визначати за допомогою оператора Якобі:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial R} \\ \frac{\partial u}{\partial S} \end{Bmatrix}, \quad (2.4.21)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial R} \\ \frac{\partial v}{\partial S} \end{Bmatrix}. \quad (2.4.22)$$

Матриця, обернена матриці Якобі, матиме наступний вигляд

$$[J]^{-1} = \frac{1}{\det[J]} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial y}{\partial S} & -\frac{\partial x}{\partial S} \\ -\frac{\partial y}{\partial R} & \frac{\partial x}{\partial R} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\frac{\partial x}{\partial R} \frac{\partial y}{\partial S} - \frac{\partial y}{\partial R} \frac{\partial x}{\partial S}} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial y}{\partial S} & -\frac{\partial y}{\partial R} \\ -\frac{\partial x}{\partial S} & \frac{\partial x}{\partial R} \end{Bmatrix}. \quad (2.4.23)$$

Напруження можна вирахувати згідно наступного співвідношення:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}, \quad (2.4.24)$$

де $[D]$ – матриця, елементи якої залежать від механічних характеристик матеріалу.

Матриця жорсткості елемента $[K]$ визначається на основі формули:

$$[K] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \det|J| dR dS. \quad (2.4.25)$$

Оскільки функції форми $N_i(R, S)$ для всіх елементів є многочленами, похідні $(\partial N_i / \partial R)$ та $(\partial N_i / \partial S)$ особливостей не мають. Застосовуючи співвідношення (2.4.21), (2.4.22) та (2.4.23), формулу для визначення деформацій можна записати у наступному виді:

$$\{\epsilon\} = [J]^{-1} \cdot [B'(R, S)] \cdot \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}. \quad (2.4.26)$$

Таким чином, виходячи із останнього виразу, для отримання сингулярної деформації можна вимагати сингулярності матриці Якобі при вершині тріщини. Іншими словами, визначник матриці Якобі $\det |J|$ повинен бути рівним нулю при вершині тріщини. Цього можна досягти, переміщуючи серединні вузли на сторонах елемента на чверть довжини сторони. Розглянемо це питання докладніше.

Для того щоб матриці елементів при вершині тріщини були сингулярними, потрібно, щоб сингулярними були вирази для $\{\epsilon\}$ та $\{\sigma\}$. Як вже вказувалось, сингулярності можна досягти, переміщуючи серединні вузли на сторонах елемента на відстань, рівну чверті довжини сторони. На рис. 2.17 зображений двомірний восьмивузловий чотирикутний елемент, а на рис. 2.18 – шестивузловий трикутний елемент. Обидва вони є ізопериметричними елементами із зміщеними на чверть довжини сторони серединними вузлами на сторонах, які дотичні до вершини тріщини.

Одна із важливих особливостей цих елементів полягає у тому, що вони задовольняють необхідні умови сходимості [29] як у сингулярному, так і в несингулярному варіантах. Ці елементи на відміну від багатьох інших спеціальних елементів, які використовуються при вершині тріщини, допускають опис руху як жорсткого тіла при постійній деформації, а також задовольняють умову неперервності переміщення.

Слід зауважити, що останнім часом кінцево-елементний метод початкових напружень в наукових роботах з механіки руйнування пов'язаний переважно із дослідженнями пружнопластичної поведінки матеріалу. Основною метою даного дослідження є розробка спрощеного методу складної задачі, який дозволить отримати сприйнятливі результати при найменшій складності програмування.

Практичний інтерес при рішенні задачі пружнопластичного руйнування являють собою розрахунки переміщень, напружень і деформацій на різних етапах навантаження, визначення розмірів пластичної зони і оцінка можливості її зростання. Далі описаний кінцево-елементний метод початкових напружень, який дозволяє одержати необхідні результати.

Припускаємо, що у даному випадку є справедливим критерій текучості Мізеса та закони текучості [30]. У відповідності із цим застосовується наступне припущення. Нехай $\delta\{\varepsilon\}_p$ означає приріст пластичної деформації, тоді

$$\delta\{\varepsilon\} = \lambda \frac{\partial F}{\partial(\sigma)}. \quad (2.4.27)$$

У даному співвідношенні λ – коефіцієнт пропорційності, а F – функція напруження. Для відомої поверхні текучості Мізеса функція F має наступний вигляд:

$$F = \sqrt{0,5 \cdot (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 0,5 \cdot (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 0,5 \cdot (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{yx}^2 + 3\tau_{zx}^2} - \bar{\sigma}, \quad (2.4.28)$$

де $\bar{\sigma}$ – границя текучості в одновісному стані.

Можна припустити, що приріст деформації у процесі нескінченно малого приросту напруження складається із пружної та пластичної частини, тобто:

$$\delta\{\varepsilon\} = \delta\{\varepsilon\}_e + \delta\{\varepsilon\}_p. \quad (2.4.29)$$

Прирости пружної деформації пов'язані із приростом напруження наступним співвідношенням:

$$\delta\{\varepsilon\}_e = [D]^{-1} \cdot \delta\{\sigma\}. \quad (2.4.30)$$

де $\{\sigma\}$ – вектор напруження.

Таким чином приріст деформації можна записати у вигляді:

$$\delta\{\varepsilon\} = [D]^{-1} \delta\{\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}} \lambda. \quad (2.4.31)$$

Зручно розв'язувати наведене співвідношення та виразити приріст напруження через задані прирости деформації [31]:

$$\delta\{\sigma\} = [D]_{ep} \delta\{\varepsilon\}, \quad (2.4.32)$$

де $[D]_{ep}$ – матриця, яка характеризує пружнопластичні властивості матеріалу.

Дана матриця є симетричною та позитивно визначається:

$$[D]_{ep} = [D] - [D] \cdot \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\} \cdot \left\{ \frac{\partial F}{\partial (\sigma)} \right\}^T [D] \cdot \frac{1}{A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D] \cdot \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}}. \quad (2.4.33)$$

У даному виразі стала величина A являє собою параметр зміцнення. Для ідеально пластичного матеріалу без зміцнення величина A рівна нулю. В загальному випадку присутності явища зміцнення величину A можна визначити, знаючи нахил кривої залежності напруження від пластичної деформації при заданому значенні пластичної деформації.

При рішенні пружнопластичної задачі розрахунок при приростах навантаження проводиться наступним чином.

- a) Задається приріст навантаження і вираховується приріст пружних напружень $\{\Delta \sigma'\}_1$ та відповідні ним прирости деформацій $\{\Delta \varepsilon'\}_1$.
- b) Приріст напружень $\{\Delta \sigma'\}_1$ додаються до напружень $\{\sigma_0\}$, які існують до початку приросту навантаження, внаслідок чого визначаються напруження $\{\sigma'\}$.
- c) Перевірюється умова $F\{\sigma'\} < 0$. Якщо ця умова витримується, то продовжується розв'язування задачі про пружне деформування.
- d) Якщо $F\{\sigma'\} \geq 0$ та $F\{\sigma_0\} = 0$, в елементі процес текучості почався на початку приросту навантаження. При цьому величина $\{\Delta \sigma\}_1$ визначається згідно наступної формули:

$$\{\Delta \sigma\}_1 = [D]_{ep} \cdot \{\Delta \varepsilon'\}_1.$$

- e) Вираховуються напруження, причиною виникнення яких повинні бути об'ємні сили:

$$\{\Delta \sigma''\}_1 = \{\Delta \sigma'\}_1 - \{\Delta \sigma\}_1.$$

- f) Запам'ятовуються поточні значення напружень і деформацій:

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{\Delta \sigma''\}_1,$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon'\} + \{\Delta \varepsilon'\}_1.$$

g) Якщо $F\{\sigma'\} > 0$, але $F\{\sigma_0\} < 0$, знаходиться проміжне значення напруження, при якому починається текучість, і вираховуються прирости напружень $\{\Delta\sigma\}$. Далі виконуються дії, наведені у пункті *d*.

h) Вираховуються вузлові зусилля для даного елемента, тобто вектор пластичного навантаження, який відповідає зрівноважуючим об'ємним силам, згідно формули:

$$\{P\}_1^e = \int [B]^T \{\Delta\sigma''\}_1 d(vol),$$

де *vol* (volume) – функціонал об'єму узагальнених поверхонь у багатомірному просторі.

i) Розраховуються значення $\{\Delta\sigma'\}_2$ та $\{\Delta\varepsilon'\}_2$ згідно початкових значень пружних характеристик матеріалу і навантаження.

j) Визначаються поточні значення $\{\sigma\}$ і повторюються дії, наведені у пунктах *b...i*.

Цикл розрахунків переривається лише тоді, коли вузлові зусилля, які визначаються у відповідності із пунктом *h*, стануть достатньо малими за величиною.

2.5. Висновки до розділу 2.

У наведеному дослідженні представлений метод визначення умов руйнування, який ґрунтується на припущенні, що гранична величина енергії формозмінення є постійною при всіх комбінаціях напружень σ_x , σ_y та σ_z . Для застосування критерію руйнування необхідно мати шість пружних констант і одне значення границі міцності при простому розтягу, яке дозволяє визначити величину граничної енергії.

Припускається, що гранична величина енергії викривлення форми, яка описується рівнянням (2.1.15), є сталою при всіх комбінаціях σ_x , σ_y та σ_z де застосовується дев'ять пружних сталих матеріалу, хоча традиційно прийнято вважати, що для визначення величини граничної енергії викривлення форми необхідно лише шість пружних сталих матеріалу і одну границю текучості. Представленим дослідженням вважається, що прийняті допущення сприяють полегшенню у проведенні розрахунків і нададуть можливість запропонованій теорії руйнування ортотропних матеріалів бути більш доступною при практичному застосуванні.

У проведеному дослідженні розглядається динамічна модель, яка враховує суттєво нелінійний характер процесу контактної взаємодії робочих шипів із поверхнею застиглих залишків речовин. Дослідження представлені двома методами, якими показано, що при певних значеннях параметрів системи можна отримати її переміщення із періодом, який є кратним періоду вимушеного зусилля удару. Досліджена також стійкість «простих» несинхронних усталених рішень та визначаються границі усталеності у просторі параметрів.

При проведенні даних теоретичних досліджень було встановлено, що швидкість поступального переміщення шарошок і потужність, яка передається поверхні обробки, дуже суттєво залежать від відношення амплітуди вимушеного зусилля удару до ваги шарошки. Величина потужності, яка передається поверхневому шару застиглої маси, досягає свого максимуму, коли амплітуда вимушеного зусилля є приблизно у два рази більшим від ваги.

Метою наведеного дослідження була побудова розрахункових моделей динаміки обертання руйнівних шарошок, яка ґрунтується на порівняно простих принципах векторного аналізу, що приводить до динамічної моделі із зосередженими параметрами. Основна задача полягала у виведенні системи визначаючих диференціальних рівнянь рухомих елементів конструкції, що дозволить чітко визначати динаміку контактної взаємодії при обертових рухах елементів даного інструменту. Дослідження полягає у виведенні системи диференціальних рівнянь динамічних процесів переміщення та впливу на поверхню обробки робочих ріжучих елементів інструменту, які обертаються, і розглядаються як «тверде тіло».

Розроблена розрахункова модель спрощена за допомогою припущення про незначність пружних деформацій. Домінуюче рівняння моделі перетворюється до незв'язаною із тілом, тобто шарошкою, системою необертових координат.

При дослідженні очисних елементів інструменту, яка виготовлена у формі кільцевої торцевої щітки із евольвентним розташуванням очисних секцій, теоретично встановлені контактні зусилля в момент удару одиничних гнучких

робочих елементів інструменту в поверхні як роздроблених застиглих згустків речовини, так і металу внутрішньої поверхні котла цистерни.

Ґрунтуючись основними теоремами динаміки відносно миттєвих сил, де по відношенню до елементарної щіткової дротинки застосована теорема про зміну головного моменту кількості руху, а для поверхні обробки – теорема кінетичної енергії, встановлена залежність оптимальної кінцевої швидкості V_K переміщення робочого торця дротинки від конструктивних і технологічних параметрів даного очищувального інструменту, характеру та фізико-механічних властивостей як очищувального елемента, так і матеріалу поверхні цистерни. Крім того, було встановлене максимальне зусилля P контактної взаємодії в залежності від вже наведених властивостей та характеристик контактуючих тіл і особливостей форми робочого торця одиничного елемента. Встановлені технологічні режими обробки дозволятимуть надалі приймати ефективні та оптимальні умови проведення технічного обслуговування підготовчих робіт на організаційних етапах перед наступними завантаженнями даних вантажних засобів залізничного транспорту.

За результатами рішення пружнопластичних задач про поширення тріщин, можна зробити наступні висновки.

1. Розроблений метод визначення розмірів і форми пластичної зони біля вершини тріщини. Задача розв'язувалась кінцево-елементним методом початкових напружень. При рішенні застосовувались восьмивузлові чотирикутні ізопараметричні елементи.

2. Застосування восьмивузлових елементів із зміщеними на чверть довжини сторони середніми вузлами дозволяє при правильному розбитті на кінцеві елементи отримати позитивні результати. Застосування такого сингулярного елемента у поєднанні із використанням методу рухомих елементів особливо є переважаючим при дослідженні задачі при швидкому руйнуванні.

Дослідження критерію росту тріщин і визначення розмірів пластичної зони дозволяють суттєво просунутись у рішенні задачі оцінки довговічності деталей машин і транспортних засобів.

РОЗДІЛ 3

МЕХАНІЧНИЙ ПРИНЦИП РУЙНУВАННЯ ЗАЛИШКІВ РЕЧОВИН, ЯКІ ТВЕРДНУТЬ І МЕТОДИКА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

Конструкція руйнівного-очищувального інструменту, режими процесу обробки та ефективність їх застосовування безпосередньо впливають на досягнення у вирішенні головного завдання – руйнування монолітності застиглих залишків речовин та їх видалення із порожнин котлів залізничних цистерн із одночасним якісним формуванням поверхневого шару металу донної їх частини [43,47]. Крім того, суттєвим фактором даного технологічного процесу є тривалість і надійність ефективності експлуатації даного інструменту. Таким чином, очікувані результати залежать безпосередньо від степені та ефективності комбінованого впливу на поверхню обробки робочих елементів інструменту, окремо, так і в комплексі, тобто, як від впливу робочих елементів шарошки, так і від ефективності роботи елементів очищування.

Експериментальне моделювання технологічного процесу обробки проводилось на основі системного підходу. Особливість його полягає в розробці моделей окремих структур процесу, а також моделей структур у їх взаємозв'язку. Виходячи із цього, експериментальні дослідження розробленого технологічного процесу проводились у таких напрямках:

- вивчення поелементного впливу на поверхню застиглих залишків речовин робочих елементів шарошок та очисних секцій інструменту;
- дослідження впливу технологічних режимів обробки на силові, якісні та експлуатаційні характеристики інструментів процесу.

3.1. Обладнання, об'єкт дослідження, зразки та матеріали

Експериментальні дослідження проводились на універсальному горизонтально-фрезерувальному верстаті моделі 6Р80 (рис. 3.1) з частотою обертання шпинделя $n = (50 \dots 2240) \text{ хв}^{-1}$ та подачею $S = (25,0 \dots 1120) \text{ мм/хв}$ та токарно-гвинторізному верстаті моделі 16Б04А (рис. 3.2) з частотою обертання шпинделя $n = (320 \dots 3200) \text{ хв}^{-1}$,

поздовжньою подачею супорта – $(0,01 \dots 0,175)$ мм/об та поперечною – $(0,005 \dots 0,09)$ мм/об. Дотримання вимог техніки безпеки забезпечувалось застосуванням огорожень, які встановлені на даних верстатах.



а)



б)

Рис. 3.1. Експериментальні дослідження обробки дослідних зразків щіткою (а) та шарошкою (б) на універсальному горизонтально-фрезерувальному верстаті моделі 6Р80.

*a)**б)*

Рис. 3.2. Експериментальні дослідження обробки дослідних зразків щіткою (*a*) та шарошкою (*б*) на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16Б04А

Для виконання як дослідно-експериментальних досліджень, так і безпосередньо при виконанні технологічного процесу руйнування монолітного шару застиглих залишків речовин, було розроблено, виготовлено і впроваджено у виробництво у вагоноремонтному депо станції Дрогобич (Львівська залізниця) механізм для очищення котла цистерни від залишків пеку (рис. 3.3 та рис. 3.3 а), який передбачав приєднування та комбінованого переміщення інструменту обробки (див. п. 3.2.1).

Суть конструкції даного механізму полягає у тому, що робочі органи, зображені на рис. 2.3 – котел цистерни 1 та її переріз – А-А, в якій при посередництві талрепу 2 встановлена опорна стійка 3, на якій закріплений барабан 4 із натяжним тросом 5. За допомогою даного троса здійснюється переміщення по направляючій траллєї 6 каретки 7 (конструкція якої показана на рис. 3.3,а) до якої приєднаний механізм реверсного обертання важеля 9, що з'єднаний із інструментом обробки 10. Вертикального переміщення інструменту 10 здійснюється за допомогою пружини 11.

Конструкція реверсного обертання (переріз Б-Б) полягає у тому, що для забезпечення неперервності обертання колеса 12 із зупинками лише в крайніх положеннях необхідно, щоб зубчасте колесо 12 при виході із зачеплення із зубчастим колесом 13 відразу входило в зачеплення із зубчастим колесом 14. На валу зубчастого колеса 12, при посередництві підшипників 15, закріплений важіль 9.

Каретка 7, яка переміщується траллелею 6, забезпечена комплексом роликів 16 (рис. 3.3,а) та проміжного ролика 17, який слугує опорою для натяжного троса 5 та скобою переміщення 18 для даної каретки 7.

Реверсне коливання важеля 9 з кутом γ забезпечується механізмом, зображеному на рис. 3.3 а).

Регулювання рівнем притискування інструменту до поверхні обробки гарантується пружиною 11 (переріз В-В), встановленою на важелі 9.

Монтаж запропонованої корисної моделі механізму для очищення котла цистерни від залишків пеку проводиться поетапно. Спочатку в котлі цистерни 1 встановлюється опорна стійка 3, яка при сприянні талрепу 2, жорстко фіксується до внутрішньої поверхні цистерни 1. До стійки 3 і до торцевої сферичної поверхні

цистерни при допомозі талрепу жорстко приєднується направляюча тралля 6, на якій закріплюється барабан 4 із натяжним тросом 5, що з'єднаний із барабаном 4 та проміжним роликком (на рис. 3.3 позиція не показана), та кареткою 7.

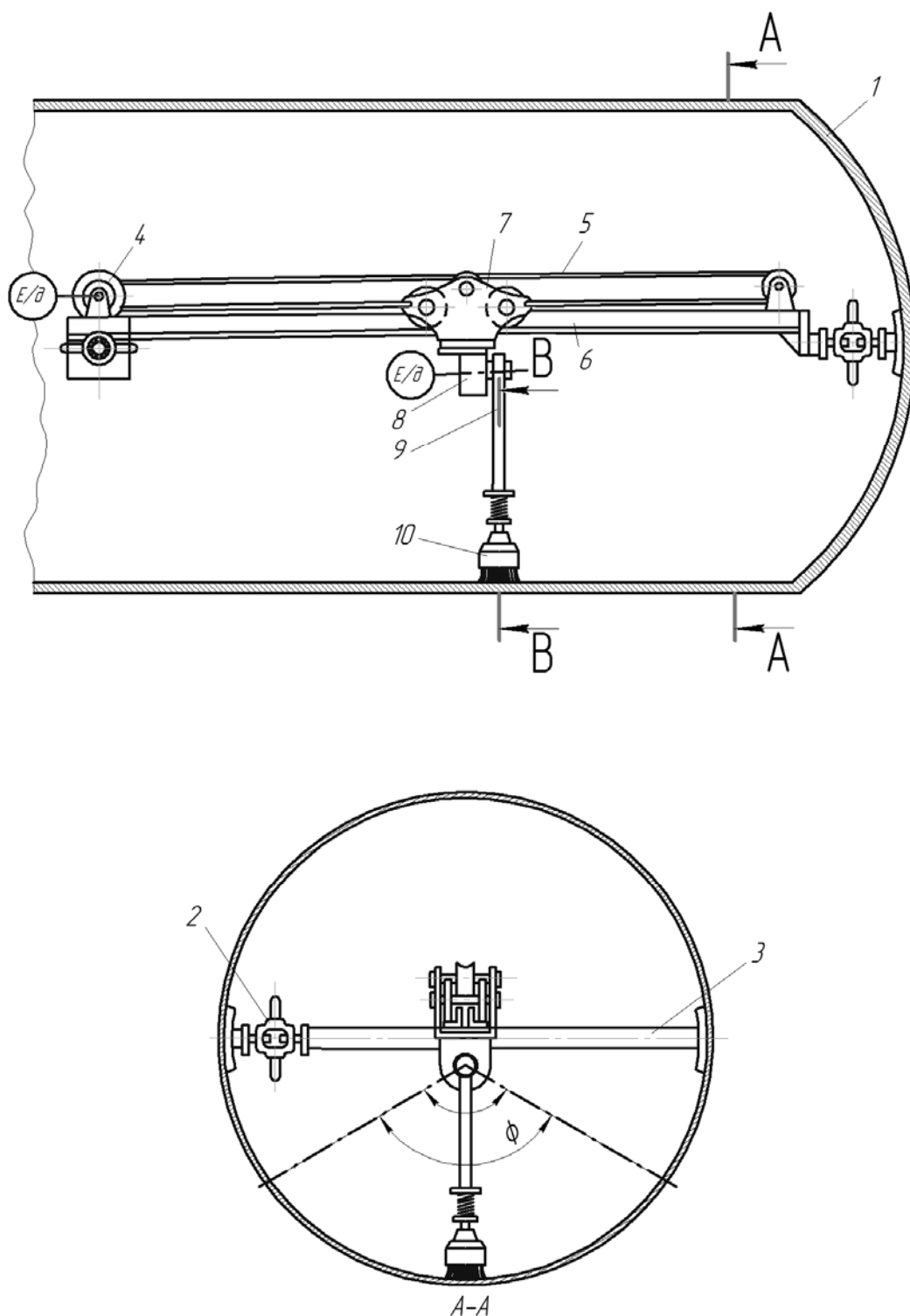


Рис. 3.3. Механізм для очищення котла вагона-цистерни від залишків застиглих речовин.

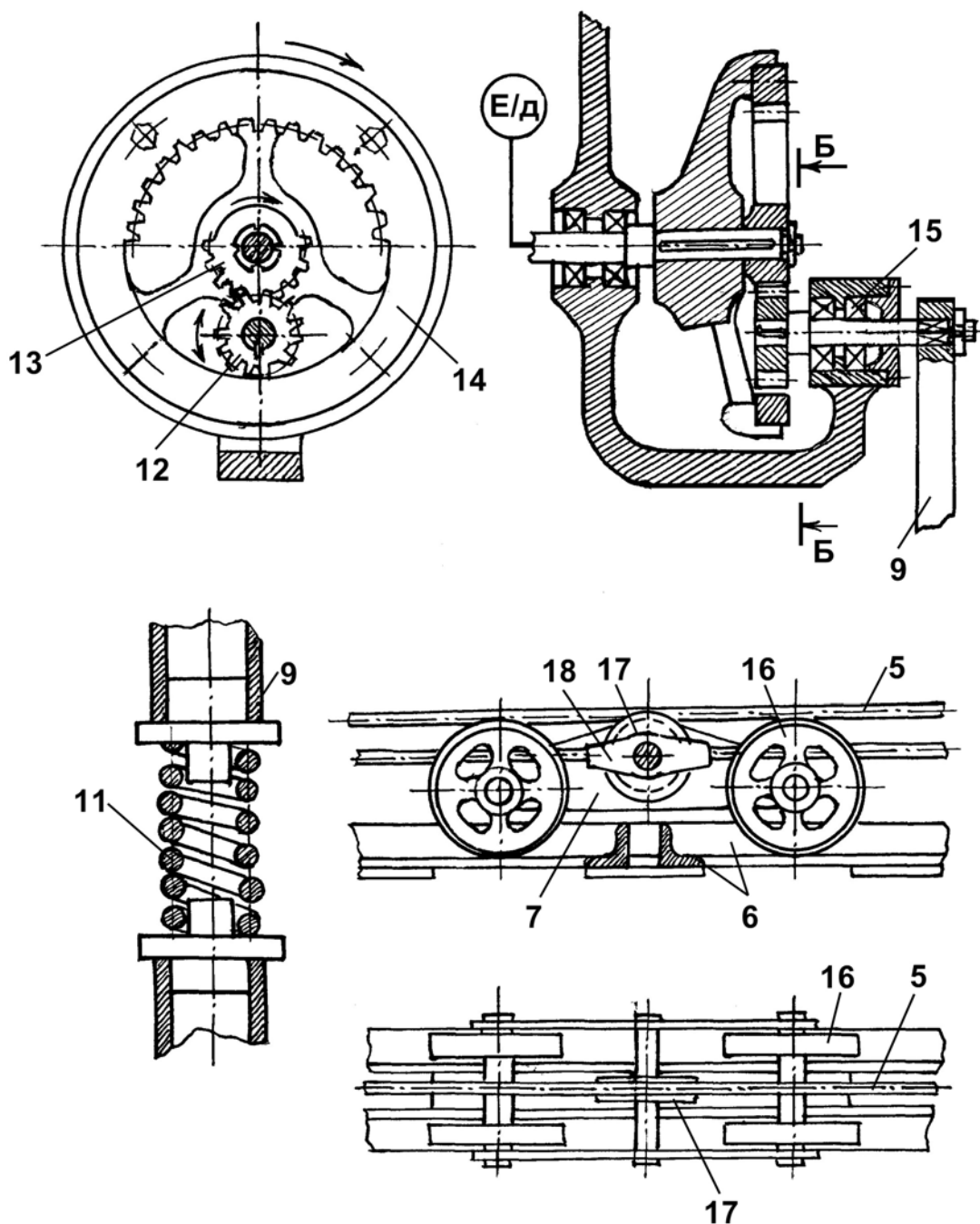


Рис. 3.3 а. Механізм для очищення котла вагона-цистерни від залишків застиглих речовин.

До каретки 7 жорстко приєднаний механізм реверсного коливання 8 із коливним важелем 9, на якому, при посередництві пружини 11, закріплений інструмент обробки 10.

Механізм для очищення котла цистерни від залишків пеку працює наступним чином. Трос 5 із натяжного барабану 4, опираючись на проміжний вільно закріплений в каретці 7 ролик 17, жорстко з'єднаний із провушиною 18, закріплений у корпусі каретки 7. Така послідовність монтажу дозволяє при обертанні електроприводу натяжного барабану 4 переміщатись в зворотно-поступальному режимі каретці 7 при посередництві комплексу роликів 16 по тралі 6.

Принцип роботи конструкції механізму реверсного коливання важеля 9 полягає у тому, що для забезпечення неперервності обертання колеса 12 із зупинками лише в крайніх положеннях необхідно, щоб зубчасте колесо 12 при виході із зачеплення із зубчастим колесом 13 відразу входило в зачеплення із зубчастим колесом 14. На валу зубчастого колеса 12, при посередництві підшипників 15, закріплений важіль 9 із інструментом обробки 10.

Експерименти з очищення порожнини котлів цистерн проводились за допомогою виготовленої механічної виробничої установки (рис. 2.4) із закріпленим інструментом обробки, сформованим із набору гнучких робочих елементів – пружинної сталі марки 65Г (ГОСТ 1542-71) із діаметром дротинок $d = 1,2$ мм.

Експериментальні дослідження проводились на зразках, заздалегідь підготовлених із листового прокату товщиною (9,0...11,0) мм призматичної форми розмірами (80 × 130) мм, покритих шаром застиглих залишків речовин різної товщини. Матеріали зразків використовувались як фрагменти котлів реальних цистерн, із вуглецевої сталі марки ВСТЗсп5 (ГОСТ 380-88), низьколегованих сталей марок 09Г2Д-12, 09Г2С і 10Г2С1Д (ГОСТ 19281-73). Хімічний склад і фізико-механічні властивості даних сталей наведені в табл. 3.1 [31, 32].

Хімічний склад і фізико-механічні характеристики матеріалів
дослідних зразків

Таблиця 3.1.

Марка сталі	Хімічний склад			Фізико-механічні властивості		
	%			МПа		%
	Вуглець	Марганець	Кремній	σ_B	σ_T	δ_5
ВСт3сп5	0,28...0,37	0,5...0,8	0,05...0,15	570	290	19
09Г2Д-12	0,12	1,4...1,8	0,17...0,37	441	305	21
09Г2С	0,12	1,3...1,7	0,5...0,8	441	305	21
10Г2С1Д	0,12	1,3...1,65	0,8...1,1	490	353	21
65Г	0,62...0,7	0,9...1,2	0,17...1,2	1000	800	13

3.2. Інструменти для проведення дослідів

Для якісного та ефективного проведення підготовчих робіт для повторної експлуатації вантажних засобів залізничного транспорту; для видалення та очищування від залишків попередньо транспортованих вантажів, було розроблено, експериментально перевірено та впроваджено на вагоноремонтному депо станції Дрогобич (Львівська залізниця) комбінований руйнівно-очищувальний інструмент для руйнування монолітності застиглих залишків речовин. Основна суть комбінованої конструкції інструменту обробки полягає у суміщеному впливу на застигли матеріали динамічного удару набором шарошок і очищування від зруйнованих залишків металу внутрішньої поверхні котла вагону-цистерни.

3.2.1. Руйнівно-очищувальний інструмент для видалення із цистерн застиглих залишків речовин

Виходячи із поставленої технічної задачі та розширення технологічних можливостей, пов'язаних, зокрема, із створенням можливості руйнування

монолітності затверділих нашарувань речовин та їх відокремлення від внутрішньої поверхні металевих котлів залізничних цистерн.

Суть роботи розробленого інструменту полягає у тому, що даний пристрій для видалення з поверхні затверділих нашарувань, що містить встановлений на валу циліндричний корпус, довкола якого з можливістю обмеженого переміщення встановлені ударні елементи із зубцями відрізняється тим, що на нижній поверхні корпусу колом встановлені евольвентно закріплені торцеві щіткові секції, а ударні елементи закріплені у корпусі з можливістю їх періодичного вертикального переміщення з одночасним обертанням навколо своєї осі при посередництві зубчастих коліс та кульки, яка вільно встановлена у зовнішній поверхні валу з можливістю її вільного переміщення гвинтовим пазом, розташованим у внутрішній поверхні корпусу (рис. 3.4).

Руйнівні-очищувальний інструмент містить корпус 1, із кільцевим розташуванням на нижній його поверхні евольвентно встановлених і торцево закріплених щіткових секцій 2, встановлений на валу 3 із закріпленням на ньому диском 4, на нижній поверхні якого закріплені зубчасті елементи 5. У корпусі 1 встановлені ударні елементи 6 із аналогічними зубчастими елементами 5, які при посередництві зубчастих коліс 7 і 8 та фланців 9 і 10 при посередництві кульок 11 сприяють обертанню ударних елементів 6 як навколо своєї осі, так і навколо валу 1. Ударні елементи 6, при посередництві кульки 12, вільно встановленій у валу 3 із можливістю її вільного переміщення гвинтовим пазом, розташованим на внутрішній поверхні фланця 10.

Пристрій працює наступним чином. При посередництві електродвигуна, редуктора та черв'ячної передачі обертається центральний вал 3, який шпонками з'єднаний із корпусом 1 та зубчастим колесом 7. У торцевій частині даного валу жорстко закріплений диск 4, на нижній поверхні якого розташовані зубчасті елементи 5. У корпусі 1 встановлені чотири ударні елементи 6 (див. вид А) із аналогічними зубчастими елементами 5, які обертаються навколо своєї осі при посередництві зубчастих коліс 8, що обертаються, перебуваючи у зачепленні із зубчастим колесом 7. Крім свого обертання, ударні елементи 6 здійснюють

періодичне вертикальне переміщення (удар). Дане переміщення здійснюється при посередництві двох рухомих фланців 9 і 10, які з'єднані між собою набором кульок 11.

Вертикальне переміщення ударних елементів 6 здійснюється за рахунок кульки 12, яка встановлена у гніздо фланця 10 з можливістю вільного переміщення гвинтовим пазом на валу 3.

При обертанні валу 3 здійснюється обертання центрального диска 4 та чотирьох ударних елементів 6, які в свою чергу ще й здійснюють динамічний удар по поверхні очищування, що сприяє ефективності руйнування монолітності поверхневого накопичення. Для видалення утвореного руйнуванням шламу на торцевій поверхні корпусу 1 розташований набір торцево закріплених щіткових секцій 2 (див. вид А).

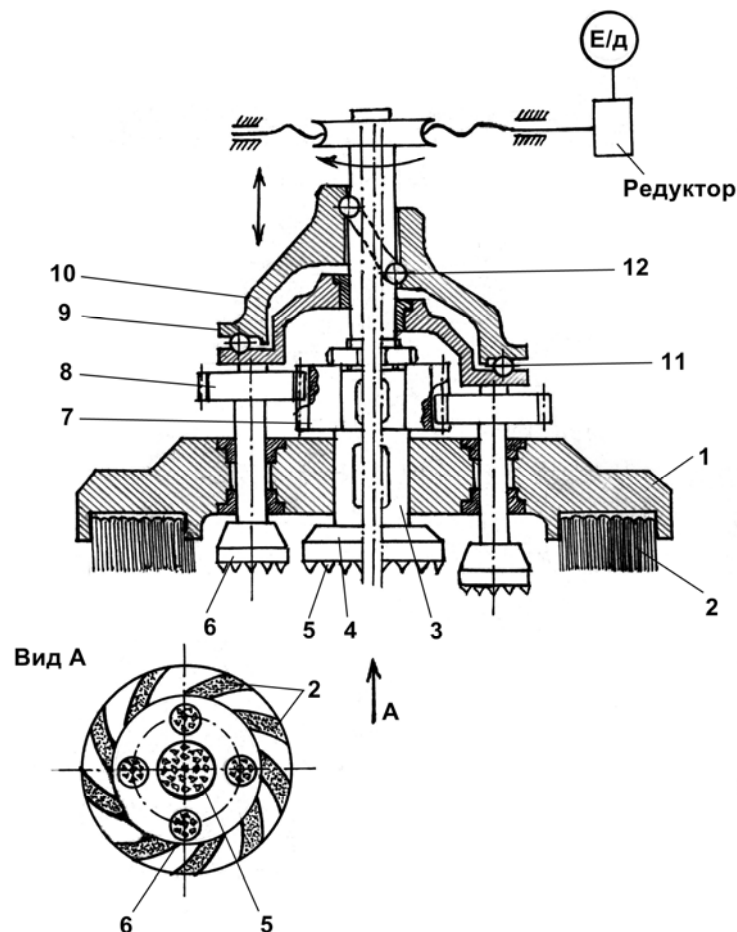


Рис. 3.4. Руйнівні-очищувальний інструмент для видалення із цистерн застиглих залишків речовин.

Таким чином, розроблений руйнівно-очищувальний інструмент для видалення із цистерн застиглих залишків речовин дозволяє розширити технологічні можливості, пов'язаних, зокрема, із створенням можливості руйнування монолітності затверділих нашарувань та їх відокремлення від внутрішньої поверхні металевих котлів залізничних цистерн, підвищивши ефективність підготовчих робіт.

3.2.2. Руйнівні шарошки

Для видалення із поверхні металевих деталей поверхневих затверділих відкладень, залишків ливникових систем із виливок, задирок, набризків після електрозварювання, вирівнювання нерівностей поверхні здійснюється слюсарним зачищуванням із використанням пневматичних і електричних машинок, які оснащені абразивними та металевими шарошками.

У розробленому і впровадженому у вагоноремонтному виробництві руйнівно-очисний інструмент для видалення із цистерн застиглих залишків речовин застосовується цілий комплекс руйнівних шарошок, які у процесі своєї роботи здійснюють як обертові рухи, так і вертикальні динамічні удари, що сприяє процесу ефективного руйнування застиглих залишків (рис. 3.5).

Довговічність механізмів та інструменту, що є визначальним критерієм, і які працюють у важких умовах, у більшості випадків забезпечується за рахунок застосування дефіцитних і дорогих матеріалів, у яких присутні вольфрам, кобальт та інші дефіцитні елементи. Застосування сучасної технології об'ємного або поверхневого армування високотносностійкими матеріалами дозволяє різко зменшити використання дефіцитних матеріалів. На даний час широко впроваджується технологія об'ємного армування шарошок при відцентровому литві.

Одним із найважливіших експлуатаційних показників шарошки є її стійкість до дії динамічних ударних навантажень. Найвідомішим напрямком у пошуку шляхів тріщиностійкості шарошок є встановлення характеру взаємодії структури, фізико-механічні властивостей і показників, що характеризують процес руйнування. На основі аналізу випробовування на удар, кочення і ковзання у праці [31] запропонований коефіцієнт W , який залежить від критеріїв: твердість (HRC), межа

міцності (σ_B), відносне звуження (Ψ). Виходячи з основних позицій механіки руйнування зміцнених сталей встановлено зв'язок між температурою відпуску і роботою руйнування, що дає досить надійні можливості прогнозувати експлуатаційні показники сталей для шарошок.

На основі здійснених досліджень у цьому напрямі в роботах [32,33] зроблено важливий висновок про механізм руйнування шарошкових сталей 14ХНЗМА та 16ХНЗМА, цементованих при 1220 К та 1320 К. Наведені марки сталей після їх цементування застосовуються для виготовлення високонавантажених деталей, які працюють при високих швидкостях і ударних навантаженнях. Виливки шарошок після їх очищування підлягають хіміко-термічній обробці: цементуванню при температурі (1220...1320) К протягом (17...20) год, першою – гартуванню при (1100...1190) К у маслі, другою – гартуванню при (880...900) К у маслі та відпуск при (430...450) К [37,38].

Фізико-механічні властивості сплавів наведені у табл. 3.2 [34].

Фізико-механічні властивості хромонікелевих сплавів (ГОСТ 4543-71)

Таблиця 3.2

Марка	Термічна обробка					Механічні властивості			
	Гартування			Відпуск		σ_T	σ_B	δ_5 , %	a_H $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2}$
	Температура, $^{\circ}\text{C}$		Сере- дови- ще охоло джен.	Тем- перату ра, $^{\circ}\text{C}$	Сере- дови- ще охоло джен				
	1-е гартув.	2-е гартув.				МПа			
14ХН3МА	880	770	Масло	180	Повіт.	884	980	10,0	783
16ХН3МА	860	-	Масло	680	Повіт.	786	884	10	882



Рис. 3.5. Комплекс руйнівних шарошок для видалення із цистерн застиглих залишків речовин

Відомо, що головною причиною руйнування цементованих деталей бувають дефекти цементування: різкі коливання концентрації вуглецю у поверхневому шарі та неможливість точного регулювання вмісту вуглецю у даному шарі матеріалу шарошки. Крім того, у процесі цементування можливе перенасичення сталі киснем.

При виготовленні експериментальної партії шарошок було виготовлено і випробувано на ударну в'язкість шість типів зразків. Отримані результати випробовувань наведені у табл. 3.3. Отримані дані засвідчили позитивний вплив на ударну в'язкість зразків, що були піддані як гартуванню, так і цементації. А для проведення експериментальних досліджень було підготовлено одиничну (елементарну) шарошку (рис. 3.6) з можливістю її закріплювання у шпинделях верстатів.



Рис. 3.6. Одинична (елементарна) шарошка.

Вплив параметрів термооброблення сталі марки 4ХНЗМА
на ударну в'язкість зразків

Таблиця 3.3

Номер партії зразків	Параметри термічної обробки	Ударна в'язкість КСУ, Дж / см ²
1	Вирізані із прокату пройшли: 1 – гартування 1173 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458 К.	14,0
2	Виготовлені із поковки (обтискування $\epsilon=40\%$)	17,8
3	Виготовлені із поковки (обтискування $\epsilon=40\%$) і пройшли: 1 – гартуван. 1173 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458 К.	15,3
4	Виготовлені із поковки (обтискування $\epsilon=40\%$) і пройшли: 1 – гартуван. 1173 К, високий відпуск 913 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458 К.	13,7
5	Виготовлені із поковки і пройшли: 1 – цементация і гартуван. 1173 К, високий відпуск 913 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458 К.	3,2
6	Виготовлені із поковки (обтискування $\epsilon=40\%$) і пройшли: цементация і гартування 1223 К, високий відпуск 913 К, 2 – гартування 1083 К, відпуск 458 К.	5,1

З метою порівнювання стійкості експериментальні шарошки відпрацьовували в однакових умовах при руйнуванні матеріалу категорії V із степінню міцності для середніх порід із коефіцієнтом міцності $f = 4$ за шкалою М.М. Протодьяконова [39]. Статистичний аналіз відпрацювання шарошок дав змогу встановити середнє значення руйнівного переміщення, при цьому середнє квадратичне відхилення вибірки для експериментальних шарошок становила $S = 170,384$. Оцінювання отриманих результатів відпрацювань здійснювали відповідно до рекомендацій [40].

3.2.3. Очищувальний інструмент торцевої конструкції

Інструментом для видалення залишків зруйнованої речовини та якісного формування металу внутрішньої поверхні цистерни слугує кільцева торцева металева щітка із евольвентним розташуванням щіткових секцій [168]. Крім формувальної функції, евольвентна конструкція даного інструменту передбачає також групування зруйнованих залишків у закритій кожухом зоні витяжної системи, що дозволить здійснювати цілковите видалення застиглих залишків із порожнини котла вагона-цистерни.

На етапах експериментальних досліджень використовувались конструкції різних торцевих щіток, що купували – серійного вітчизняного виробництва, так і виготовлених індивідуально (рис. 3.7). Матеріалом для виготовлення гнучких робочих елементів даного інструменту слугував пружний дріт діаметром $(0,8 \dots 1,2)$ мм II класу (ГОСТ 9389-60) із сталі марки 65Г (ГОСТ 1542-71). Хімічний склад і фізико-механічні характеристики матеріалу гнучких робочих елементів евольвентної торцевої щітки наведені у табл. 3.1.

Для витримування різної довжини вільного вильоту l щіткових робочих елементів, що у процесі експериментальних досліджень дозволяло встановити оптимальну і найбільш ефективну згинальну жорсткість дртинок, попередньо здійснювалось шліфування їх робочих торців. Процес шліфування проводився абразивними кругами та набором шліфувальних брусків із матеріалу 22А, зернистістю 20 та твердістю Т2 на керамічній основі.



Рис. 3.7. Інструменти з гнучкими робочими елементами торцевої конструкції.

3.3. Вибір факторів та планування експериментів

Перелік факторів, які впливають на параметри руйнівно-очищувального процесу, попередньо встановлений на основі апріорної інформації, а також виходячи

із аналізу літературних джерел [3,41,42]. Для кожного із вказаних раніше напрямів експериментальних досліджень остаточний вибір кількісних факторів, які змінюються, проводився на основі їх незалежності, детермінованості та значимості, які встановлені згідно попередньо проведених експериментів.

Як вже наводилось, технологічний процес руйнування та видалення із порожнин котлів залізничних цистерн застиглих залишків речовин є комплексним, оскільки крім видалення залишків одночасно відбувається якісне формування внутрішньої поверхні металу цистерни [121]. При детальному аналізі впливу кожного із видів та їх сумісного впливу застосовувались наступні загальні фактори: колова швидкість обертання кільцевої торцевої щітки $V_{щ}$; переміщення інструменту поверхнею обробки (подача) S ; ширина щіткового сегменту B ; діаметр одиничного гнучкого робочого елементу d ; жорсткість матеріалу одиничного гнучкого робочого елементу C , яка встановлюється згідно наступної залежності:

$$C = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \cdot \frac{E}{l^3}$$

де l – довжина вільного вильоту одиничного гнучкого робочого елементу;

E – модуль пружності матеріалу.

Для проведення розрахунків комплексного процесу обробки та при величині діаметру одиничного гнучкого елементу ($d = 0,8 \dots 1,2$ мм) задіяна величина l , яку приймаємо як наступний фактор процесу обробки, оскільки він суттєво впливає на жорсткість одиничного щіткового елементу C , яка в свою чергу впливає на формування якісних показників поверхні металу.

До наступних загальних факторів даного технологічного процесу слід віднести також частоту динамічних ударів робочих елементів центральної шарошок n та швидкість $V_{щ}$ обертання центральної шарошки навколо своєї осі. Рівні варіювання вибраних факторів наведені у табл. 3.4.

Реалізація проведення експериментальних досліджень здійснювалась при незмінній густині заповнення дротовим ворсом щіткового сегменту – $k_l = 0,13$.

Рівні варіювання факторів технологічного процесу

Таблиця 3.4.

Фактор технологічного процесу	Границі відхилення факторів		
	Нижнє	Середнє	Верхнє
Колова швидкість обертання торцевої щітки $V_{щ}, м/с$	7,55	12,985	18,42
Швидкість переміщення інструменту $S \times 10^{-3}, м/с$	4,2	8,85	13,5
Ширина щіткової секції $B \times 10^{-2}, м$	3,0	4,0	5,0
Діаметр одиничного гнучкого елемента $d \times 10^{-3}, м$	0,8	1,0	1,2
Жорсткість одиничного гнучкого елемента $C \times 10^{-12}, Н/м$	0,185	0,1425	0,1
Довжина вільного вильоту одиничного гнучкого елемента $l \times 10^{-2}, м$	3,0	4,5	6,0
Частота ударів шарошок $Z_0, хв.^{-1}$	210	425	850
Колова швидкість обертання центральної шарошки $V_{щ}, м/с$	2,356	4,058	5,76

3.4. Методика дослідження комплексного впливу параметрів процесу та його характер

Підвищення якісних характеристик поверхні металу внутрішньої порожнини котла вагона-цистерни вимагає рішення багатьох проблем у різних галузях [98]. Технологічні проблеми відносяться до найважливіших, оскільки успішне їх вирішення визначає наступні експлуатаційні показники. Під поняттям якісних характеристик поверхні металу слід розуміти наступне: оцінка впливу шорсткості, хвилястості, відхилення від форми поверхні, вплив внутрішніх залишкових напружень, твердість поверхні металу та його структура. Встановлення кожної із наведених характеристик проводиться шляхом проведення цілого комплексу

операцій із використанням контрольних вимірних та електронних приладів та пристроїв.

3.4.1. Встановлення рівня шорсткості шару металу внутрішньої поверхні вагона-цистерни

Загальновідомо, що шорсткість поверхні – це сукупність нерівностей поверхні із відносно малими кроками на певній базовій довжині, які вимірюються в мікрометрах (мкм). Шорсткість відноситься до мікрогеометрії твердого тіла і визначає його найважливіші експлуатаційні властивості. У першу чергу це зносостійкість від стирання, міцність, щільність (герметичність) з'єднань, хімічна стійкість, зовнішній вигляд тощо [44].

Вихідна шорсткість є наслідком технологічності обробки поверхні металу. У нашому випадку, коли ми розглядаємо вантажні залізничні вагони-цистерни, наслідком попередньої технологічності обробки їх поверхні є вальцеве формування циліндричної обичайки. Внаслідок тривалої експлуатації даного виду засобів транспорту відбувається зношування параметрів вихідної шорсткості поверхні металу, яка називається експлуатаційною рівноважною шорсткістю, показники якої регламентовані ГОСТ 2789-73. На рис. 3.8 наведений нормальний профіль і параметри шорсткості поверхні.

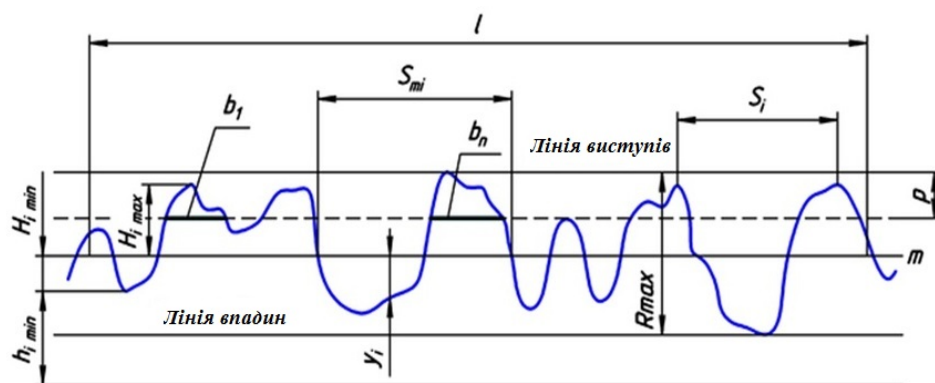


Рис. 3.8. Нормальний профіль і параметри шорсткості поверхні

де l – базова довжина; m – середня лінія профілю; S_{mi} – середній крок нерівності профілю; S_i – середній крок місцевих виступів профілю; $H_i \max$ – відхилення п'яти найбільших максимумів профілю; $H_i \min$ – відхилення п'яти найбільших мінімумів

профілю; $h_{i\ max}$ – відстань від вищих точок п'яти найбільших максимумів до лінії паралельної середній; $h_{i\ min}$ – відстань від нищих точок п'яти найбільших мінімумів до лінії паралельної середній; R_{max} – найбільша висота профілю [45].

Дослідно-експериментальні дослідження показників шорсткості поверхні проводились на контактному профілометрі-профілографі моделі ПП – 201 (рис. 3.9) щуповим методом вимірювання, де в якості щупа застосовується загострення алмазна голка, яка поступально переміщується по певній трасі відносно поверхні. Вісь голки розташована по нормалі до поверхні.

Контактуюча із поверхнею вісь голки опускаючись у впадини, а потім піднімаючись на виступи під час переміщення щупової головки поверхнею металу, голка коливається відносно головки відповідно поверхні вимірного профілю. Механічні коливання голки перетворюються в електричні за допомогою електромеханічного перетворювача. Знятий із перетворювача корисний сигнал підсилюється, а потім вимірюються його параметри, які характеризують нерівності вимірюваної поверхні.

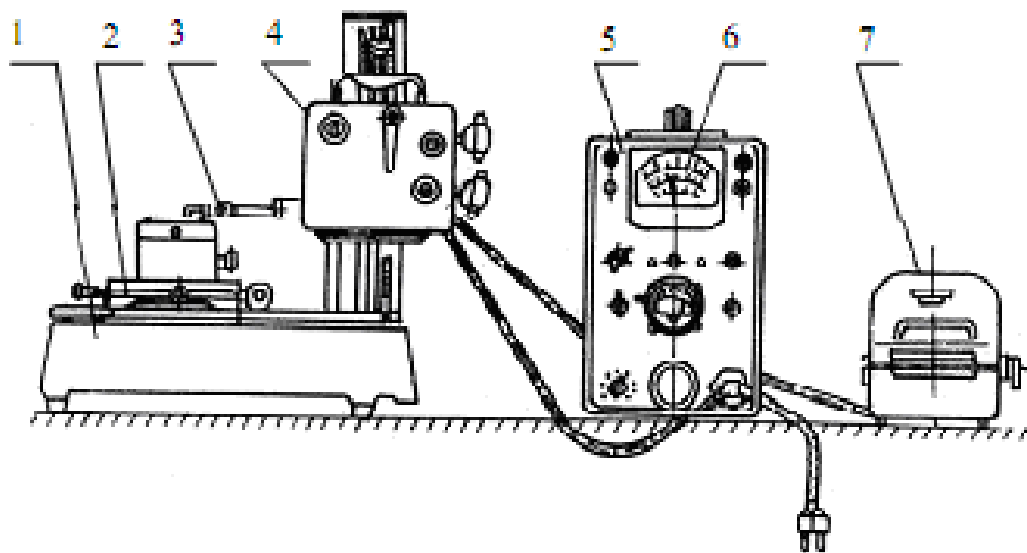


Рис. 3.9. Контактний профілометр-профілограф мод. ПП – 201:
1 – станина; 2 – привід; 3 – стійка; 4 – датчик; 5 – деталь;
6 – вимірний столик; 7 – електронний блок.

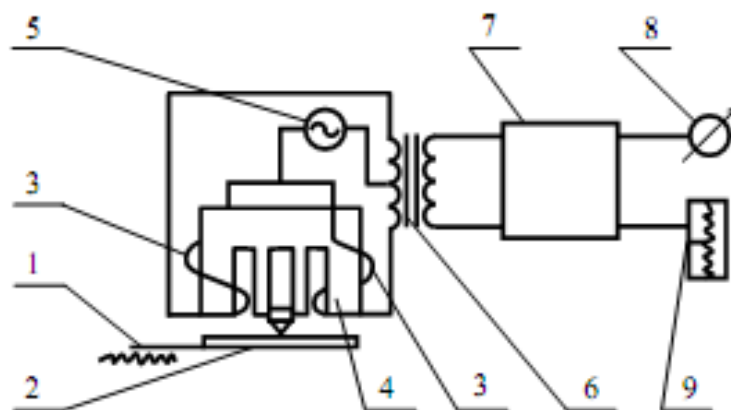


Рис. 3.10. Електрична схема профілометра-профілографа мод. ПП – 201.

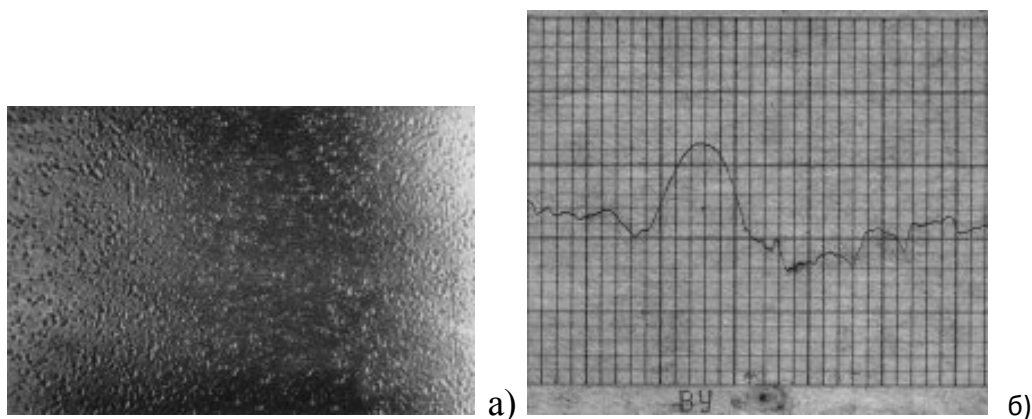


Рис. 3.11. Зразок обробленої поверхні металу а) та її профілографа б).

Принцип роботи електронного перетворювача, електрична схема якого наведена на рис. 3.10, полягає в тому, що сигнал показників шорсткості поверхні проходять через електронний блок 7, показуючий 8 та записуючий 9 прилади. Магнітна система датчика являє собою сердечник 2 із двома катушками 1. Катушка датчика та дві половини первинної обмотки диференційного вхідного трансформатора 6 утворюють балансний міст, який живиться від генератора звукової частоти 5. При переміщенні датчика відносно поверхні вимірювання алмазна голка 4, скануючи нерівності даної поверхні, приводить до коливного переміщення коромисла 3. При цьому змінюються повітряні зазори між якорем і сердечником, а відповідно, і напругу на виході диференційного трансформатора. Вона підсилюється електронним блоком 7, на виході якого під'єднані записуючий та показуючий прилади. В якості прикладу на рис. 3.11 наведено зразок обробленої поверхні металу цистерни та її профілограма.

Діапазони вимірювань показників шорсткості поверхні металу контактним профілометром-профілографом моделі ПП – 201 наведені у таблиці 3.5.

Діапазони вимірювань показників шорсткості поверхні металу

Таблиця 3.5

Тип					Діапазон вимірювань		Щуп		
	Діапазони	Траса, мм	Похибка, %	Допуст. відхил., мкм	Ra	Rz	Радіус мкм	Кут, град.	Матеріал
ПП 201	Ra, Rz, Ry	0,5... ...5,5	10,0	0,01	0,03... ...6,3	0,2... ...25	5,0	360 ⁰	ал-маз

3.4.2. Вимірювання зусиль обробки

Дійсні величини складових зусиль обробки визначались за допомогою динамометра УДМ-600 (рис. 3.12), розробленого як засіб вимірювання складових зусиль різання, блок-схема якого наведена на рис. 3.13. Вимірний засіб складається із динамометра-датчика моделі УДМ-600, плити балансуєчих опорів (ПБО), плити 16-канального підсилювача ЛА-УН16, пристрою збору даних (ПЗД) NI USB-6009, персонального комп'ютера. Плата ЛА-УН16, УСД NI USB-6009 зібрані в окремому корпусі блоку підсилення та перетворення сигналів.



Рис. 3.12. Динамометр УДМ-600 для вимірювання зусиль обробки

Комплексне поєднання ряду приладів полягає у безпосередньому використанні їх підсилювачів і кінематичних механізмів (на рис. 3.15 – блок ПБО) для відображення на дисплеї комп'ютера та запису на діаграмну стрічку зміни напруги, що виникає у схемі півмоста динамометра УДМ-600 [46].



Рис. 3.13. Блок-схема динамометра УДМ-600.

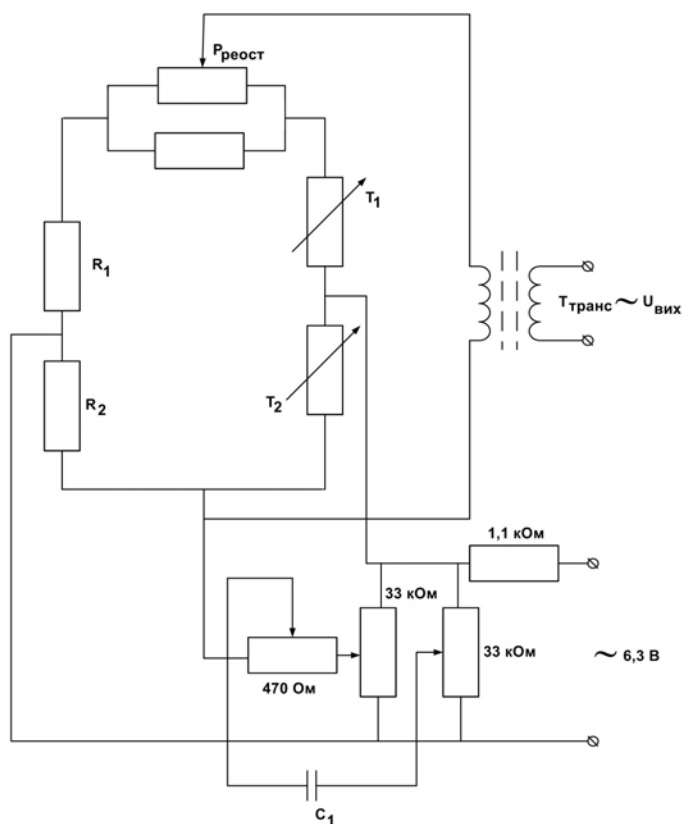


Рис. 3.14. Електросхема під'єднання динамометра УДМ-600 для вимірювання зусиль обробки

Зусилля, які сприймає універсальний динамометр, пружньо деформують його опорні елементи. Згадані деформації реєструються тензодатчиками опорів T_1 та T_2 , які під'єднані за схемою півмоста (рис. 3.14). Схема півмоста доповнюється постійними резисторами R_1 та R_2 . Величини їх опорів відрізняються на $\pm 0,2 \text{ Ом}$ від опорів тензодатчиків. Живлення даної схеми здійснюється від підсилювача напругою в $6,3 \text{ В}$. Зміни напруги проводились трансформатором і передавались на підсилювач. Остаточне балансування моста проводилось суміжними регулюваннями резисторами в 470 Ом та $33,0 \text{ кОм}$.

З метою отримання універсальних емпіричних залежностей після обробки результатів вимірювання, дійсні величини складових зусиль приводились до одиниці ширини контактуючих робочих елементів експериментального інструменту та визначались складові зусиль поверхневої обробки:

$$\left. \begin{aligned} G_Z &= \frac{P_Z}{B_0}; \\ G_Y &= \frac{P_Y}{B_0}. \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

де G_Z та G_Y – питомі зусилля контактної взаємодії;

P_Z та P_Y – відповідно горизонтальна та вертикальна складові дійсного показника зусилля;

B_0 – ширина контактуючої поверхні робочого елементу.

3.4.3. Визначення внутрішніх залишкових напружень

Експериментальне встановлення величин внутрішніх залишкових напружень I-го роду проводилось за заздалегідь підготовленими зразками елементарних заготовок металу донної частини залізничної цистерни. Зразки підготовлювались у вигляді смужок розміром $10 \times 6,0 \times 3,0 \text{ мм}$, зміцнений поверхневий шар котрих підлягав електрополіруванню, що проводилось на спеціально розробленій установці, на якій можна встановлювати величину та знак колових і осьових поверхневих напружень I-го роду у зразках і автоматично записувати діаграму розподілення

таких напружень в залежності від глибини шару, що розчиняється електрополіруванням.

Дана установка складається із оптико-механічного приладу ІЗП-17м та електролітичної ванни, яка під'єднана до низьковольтного селенового випрямляча ВСА-5 потужністю 1,5 кВт. В основу реєструючого приладу закладена автоколлімаційна схема.

При електрополіруванні зразків застосовується електроліт, процентне співвідношення якого до загального об'єму складових компонентів становить [2]: азотна кислота – 50%; плавикова кислота – 10%; вода – 40%. Об'єм електроліту встановлювався таким чином, щоб верхня межа зони травлення знаходилась нижче верхнього краю дослідного зразка на (10...12) мм.

Товщина травленого шару встановлювалась згідно наступної формули:

$$a = \frac{m_1 - m_2}{\gamma \cdot F},$$

де m_1, m_2 – маса дослідного зразка відповідно до і після кожного травлення г;

F – площа поверхні, яка підлягає травленню;

γ – густина матеріалу зразка ($\gamma = 7,814 \cdot 10^{-3}$ г/мм²).

По мірі віддалення напружених шарів відбувається деформація зразка, яка проявляється у його прогині. Переміщення, яке виникає при деформації, сприймається важелем та передається на профілограф-профілометр. При побудові кривої деформації зразків враховувались залишкові напруження згідно формули:

$$\sigma = -\frac{2E}{b_T^2} f_P \cdot \left(\frac{a}{2} - \Delta a \right) + \frac{E}{3b_T^2} \cdot \left[(a - \Delta a)^2 \cdot \frac{df_T}{da} - 4 \cdot (a - \Delta a) \cdot f_T + \Delta a \cdot f_T \right], \quad (3.1a)$$

де E – модуль пружності матеріалу дослідного зразка, МПа;

b_T – половина довжини ділянки травлення, мм;

Δa – товщина шару металу, який стравлений за період часу Δt , мм;

f_P – прогин смужки зразка після його розрізування, мм;

f_T – деформація дослідного зразка після усунення шару Δa , мм.

Прогини f_P та f_T є додатними, якщо вони направлені в сторону поверхні. Похідні df_T / da визначаються графічним диференціюванням кривих деформації.

3.4.4. Дослідження робочих елементів інструменту на довговічність

Довговічність експлуатації робочих елементів інструменту визначалась згідно терміну їх експлуатації та степені зношування. Процес встановлення степені зношування шипів шарошки проводився за допомогою заздалегідь підготовленою одиничної шарошки (рис. 3.15, *a*), яка своєю хвостовою частиною закріплювалась у шпинделі універсального горизонтально-фрезерувального верстату моделі 6P80 (рис. 3.1) з частотою обертання шпинделя $n = (31,5 \dots 1600) \text{ хв}^{-1}$ та швидкістю його зворотно-поступального переміщення $S = (25,0 \dots 1250) \text{ мм/хв}$ відносно довжини заготовки, рівної $L = 500 \text{ мм}$.



a)



б)

Рис. 2.15 Експериментальні шарошка (*a*) та торцева щітка (*б*) для випробовування на довговічність її робочих елементів.

У конструкції інструменту для руйнування застиглих залишків речовин встановлені шарошки з клиновидними косими шипами із кутами при вершині: кут атаки – $\alpha_1 = 32^\circ$; задній кут – $\alpha_2 = 40^\circ$ [48]. Степінь остаточного зношування таких шипів приймається лише тоді, коли їх задній кут становитиме $\alpha_2' \approx \pm 60^\circ$.

Випробовування на тривалість ефективної експлуатації гнучких робочих елементів евольвентних торцевих секцій кільцевої щітки проводиться на тому ж обладнанні, на якому випробовуються шарошки. В якості об'єкту дослідження приймається експериментальна торцева щітка (рис. 3.19, *б*) із різною довжиною вільного вильоту щіткового ворсу – $l = (3,0 \dots 6,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Степінь остаточного

зношування такого ворсу приймається за умови, що руйнується $1/4$ довжини вільного вильоту гнучких елементів.

3.5. Висновки до розділу 3.

Конструкція руйнівно-очищувального інструменту, режими процесу обробки та ефективність їх застосовування безпосередньо впливають на досягнення у вирішенні головної задачі – руйнування монолітності застиглих залишків речовин та їх видалення із порожнин котлів залізничних цистерн із одночасним якісним формуванням поверхневого шару металу донної їх частини. Крім того, суттєвим фактором даного технологічного процесу є тривалість і надійність ефективності експлуатації даного інструменту. Отже, основні висновки процесу обробки, які слід констатувати, полягають у наступному:

- результати руйнування та видалення із порожнин котлів залізничних цистерн залежать безпосередньо від степені та ефективності комбінованого впливу на поверхню обробки робочих елементів інструменту як окремо, так і в комплексі, тобто, як від впливу робочих елементів шарошки, так і від ефективності роботи елементів очищування;

- надана перевага в якості параметру, який характеризує механічні та експлуатаційні характеристики робочих елементів інструменту для руйнівних шарошок – міцність шипів, а для гнучких робочих елементів евольвентних очисних секцій – їх жорсткість;

- розширення меж використання результатів вимірювання силових характеристик комплексного впливу робочих елементів інструменту можливе лише за рахунок приведення до одиниці елементарної площі кожного із видів контактуючих із поверхнею обробки елементів до величини зусилля та потужності процесу;

- проведення експериментальних досліджень із застосовуванням теорії математичного планування експериментів дозволяє при мінімальних затратах виробничих потужностей та часу вивчити якісні та ефективні особливості даного процесу підготовчих робіт вантажних вагонів.

РОЗДІЛ 4.

ПОТУЖНОСТІ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ЗАСТИГЛОЇ РЕЧОВИНИ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНСТРУМЕНТІВ ОБРОБКИ

Домінуючою особливістю та важливістю впровадження у виробництво будь-якого технологічного процесу є його економічної ефективності. В першу чергу це стосується експлуатаційних енерговитрат, фінансових витрат на технологічне обладнання та інструмент, термін їх ефективної експлуатації тощо. Всі наведені економічні фактори технологічного процесу заздалегідь розраховуються ще на етапі початкового проектування і за їх результатами вносяться певні корективи в загальний проект майбутнього виробництва або окремого технологічного процесу.

Як вже наводилось у розділі 3, для ефективного та швидкого виконання технологічного процесу руйнування та видалення із порожнин залізничних вагонів-цистерн залишків застиглих речовин розроблено та впроваджено у виробництво на Дрогобицькому депо установку та інструмент очищення, схеми яких наведені на рис. 3.3. У кожному із виготовлених технічних засобів обробки (переміщення та коливання інструменту, безпосередньо роботи самого інструменту) передбачене встановлення електродвигунів різної потужності. Крім того, розроблений технологічний процес передбачає встановлення комплексу місцевої витяжної вентиляції, яка забезпечуватиме видалення за межі цистерни роздроблених залишків речовин та утвореного пилу.

У даному розділі дисертаційної роботи крім розрахунків необхідних потужностей технологічних обладнання, наведене також аналітичне визначення довговічності ефективної експлуатації робочих елементів технологічного інструменту. Приведені теоретичні дослідження дозволятимуть надавати даному технологічному процесу економічно об'єктивної оцінки при серійній експлуатації.

4.1. Енергетичні витрати на процеси руйнування та видалення залишків застиглих речовин

Як вже наводилось, технологічний процес руйнування та видалення із порожнин залізничних вагонів-цистерн залишків застиглих речовин розроблено на

основі комплексного впливу окремих елементів інструменту на поверхню обробки: операція руйнування шипами обертових шарошок і остаточного руйнування та видалення утвореного шламу евольвентними секціями гнучких робочих елементів кільцевою торцевою щіткою.

Попередня апробація даного розробленого техпроцесу вказала на те, що найбільше зусилля контактної взаємодії виникає при обробці застиглої маси торцевою щіткою. У даному випадку в контакт із поверхнею обробки одночасно вступають всі робочі торці дротинок секцій інструменту. Отже прикладання максимальної потужності даного процесу обробки розглядаємо як процес поверхневого шліфування.

Для всіх технологічних способів шліфувальної обробки головним переміщенням різання V_K (м/с) є обертання інструменту. При обробці поверхні по всій ширині слід також враховувати ширину b (мм) зони контактування та глибину різання t (мм). Ефективна потужність при шліфуванні розраховується згідно наступної емпіричної залежності [49]

$$N = C_N \cdot V^r \cdot t^x \cdot b^z, \quad (4.1.1)$$

де C_N – коефіцієнт шліфування;

r, y, z – показники степені.

Згідно даних з літературних джерел [50], коефіцієнт шліфування та показники степені будуть рівними: $C_N = 0,39$; $r = 0,5$; $x = 0,5$; $z = 0,6$. Підставивши у залежність (4.1.1) максимальні значення режимів обробки (див. табл. 3.4), отримуємо величину максимальної потужності технологічного процесу поверхневої обробки матеріалу:

$$N_{\max} = C_N \cdot V_{\max}^r \cdot t_{\max}^x \cdot b_{\max}^z = 0,17 \cdot 7,55^{0,7} \cdot 3^{0,5} \cdot 30^{0,6} = 9,32 \text{ кВт} \quad (4.1.1, a)$$

За рекомендаціями довідникової літератури [51], згідно встановленої потужності, приймаємо асинхронний електродвигун типу МТКФ 211-6 потужністю $N_i = 10,5 \text{ кВт}$ і частотою обертання ротора $n_i = 915 \text{ хв}^{-1}$.

Каретка із закріпленим механізмом інструменту обробки (рис. 3.3), переміщується за допомогою мотор-редуктора типу МЦЧ-63 [52] із потужністю на

швидкохідному валу $N_p = 1,5 \text{ кВт}$, номінальною частотою обертання вихідного валу $n_{ex.p} = 88 \text{ хв}^{-1}$ та номінальним передавальним числом $i = 16$.

Для забезпечення нормальних для роботи санітарно-гігієнічних умов і збереження відповідно санітарним нормам екологічних умов оточуючого середовища, зона роботи у вагоні-цистерні руйнівно-очищувального інструменту огорожена брезентовим кожухом, із внутрішньої порожнини якого шляхом вентиляції здійснюється процес видалення роздроблених часточок застиглих речовин та пилу. У даному технологічному процесі передбачене застосування автономної компресорно-вентиляційної установки для місцевої витяжної вентиляції, при якій швидкість витягу повітря в компресорно-вентиляційної установці для даного виду обробки визначається згідно залежності [53]:

$$V_x = \frac{V_0}{16 \cdot \left(\frac{x}{d}\right)^2} = \frac{8,5}{16 \cdot \left(\frac{0,2}{0,5}\right)^2} = 3,32 \text{ м/с}, \quad (4.1.2)$$

де V_0 – швидкість повітря в зоні обробки, ($V_0 = 8,5 \text{ м/с}$ [53]);

x – радіус зони обробки, м;

d – діаметр отвору витяжного вентилятора, м.

Згідно результатів отриманих розрахунків за рекомендаціями довідникової літератури приймаємо вентилятор осьовий моделі В 06-300 із потужністю електродвигуна $N_B = 0,12 \text{ кВт}$ та продуктивністю $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ [54].

Загальна потужність процесу руйнування залишків застиглих речовин становитиме:

$$N_{заг} = N_i + N_p + N_B = 10,5 + 1,5 + 0,12 = 12,12 \text{ кВт}$$

4.2. Довговічність ефективної експлуатації робочих елементів

До проведення досліджень був проведений попередній аналіз кількості залишків у залізничних цистернах застиглих вантажів (рідкий пек, рідка сірка, капролактамі, паста сульфонола, суперфосфорна кислота, жовтий фосфор, тощо), які перед повторним завантаженням необхідно видалити із порожнин котлів цистерн. Для проведення досліджень із тривалості ефективної експлуатації робочих

елементів інструменту обробки був вибраний матеріал пек, який після вивантаження рідкого пеку, залишався у цистерні у вигляді застиглого пеку, що підлягав видалення, яке на практиці проводилось на промивально-пропарювальній станції (ППС) вагонного депо (рис. 4.1). Складність технологічного процесу видалення застиглого пеку в першу чергу полягала у складності руйнування його монолітності та порушення адгезійності із металом внутрішньої поверхні цистерни.

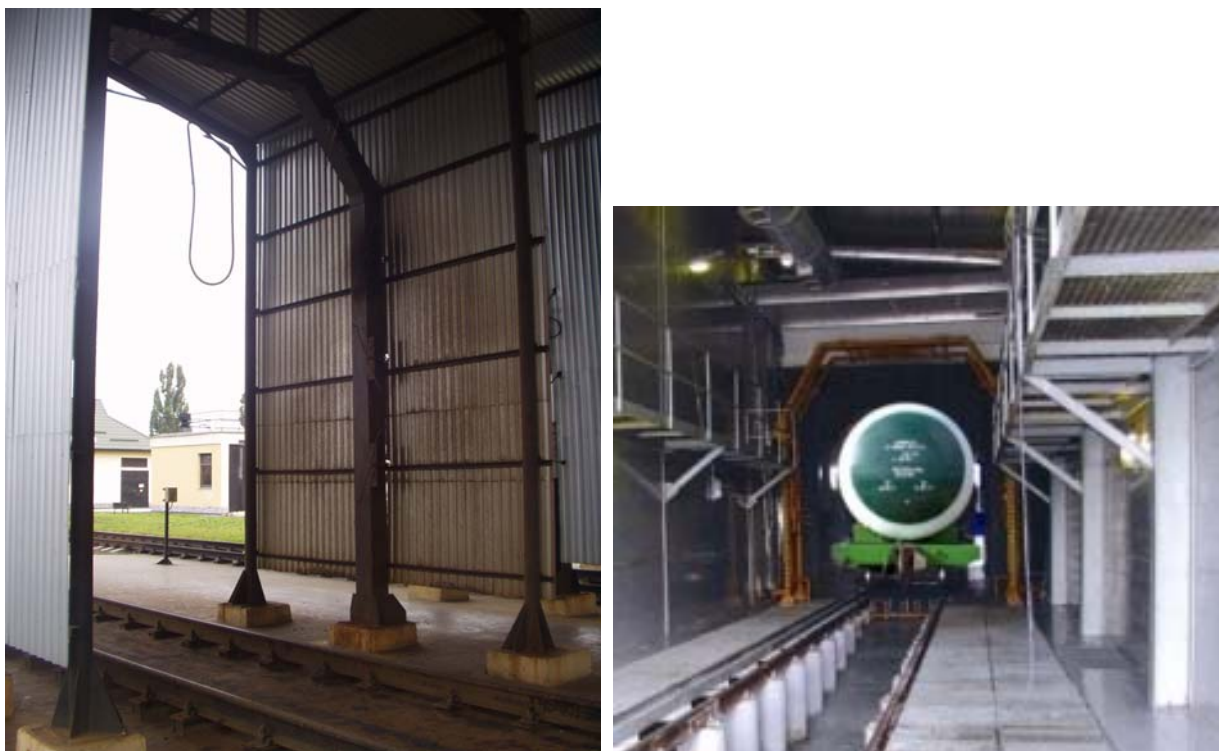


Рис. 4.1. Дільниця промивально-пропарювальної станції для очищення котлів цистерн у вагоноремонтному депо ВЧД-2 станції Дрогобич (Львівська залізниця).

На даний час для матеріалів, яким властиві міцностні та пружні характеристики, ще недостатньо розроблені, створені і впроваджені надійні методи, які дозволяють визначати умови руйнування таких матеріалів при складному напруженому стані. Потреби проектувальників задовольняли методи розрахунку умов пластичного руйнування при комбінованих навантаженнях. У проведеному дослідженні припускається, що енергія формозмінення являє собою розумну основу для опису пружнопластичної поведінки застиглого матеріалу для випадку, коли головні напруження за напрямом співпадають з осями матеріалу.

Введення у даній роботі співвідношення взаємодії пошкоджень відноситься головним чином до таких елементів конструкції інструменту, які внаслідок впливу широкосмугових гауссівських випадкових навантажень здійснюють коливання із своїми резонансними або навіколорезонансними частотами. При таких коливаннях напруження в робочих елементах являє собою вузькосмуговий гауссівський випадковий процес із наближеними до нуля середніми значеннями та із середньоквадратичним значенням σ . Густина ймовірності згинаючої кривої циклів (амплітуд) такого напруження наближено підпорядковується розподіленню Релея [55]. Такі закони зміни напружень по часові характеризуються порівняно незначною кількістю циклів напруження високої амплітуди у порівнянні із циклами невеликих амплітуд [56]. Цикл високої амплітуди приводить до перевантаження, тобто до підвищення деформації. Зв'язок між ефектами від таких циклів і більш частіших циклів менших амплітуд є причиною так званого явища послідовності (або чергування циклів) навантаження [57].

Далі розглядаємо максимальний пік напружень та модифіковане правило лінійного додавання. Величина максимального піку S_m вузькосмугових гауссівських випадкових напружень залежить від ширини спектру напруження та від тривалості навантаження. Чим ширшим є спектр напруження і тривалішим є процес навантаження, тим більшим є величина S_m . Типове значення S_m в 4...7 разів переважає σ [58].

Далі покажемо, як запропонована Морроу модель взаємодії [58], пов'язаної із роботою пластичного деформування, і відповідне правило додавання поширюється на ситуацію вузькосмугових гауссівських випадкових напружень. Пошкодження D_S від піку напружень S визначається:

$$D_S = \frac{n_S}{N_S} \cdot \left(\frac{S}{S_m} \right)^d, \quad (4.2.1)$$

де n_S – кількість циклів напруження з амплітудою S ;

N_S – кількість циклів до руйнування при амплітуді напружень S ;

d – показник роботи пластичного деформування.

Зауважимо, що $S \leq S_m$ і що (n_S / N_S) є відношення, яке використовується у правилах лінійного додавання. Ефект накопичення пошкоджень описується інтегруванням нелінійної функції (4.2.1) по всім рівням амплітуд напруження до S_m . Умова руйнування виражатиметься:

$$\int_0^{S_m} D_S dS = 1 \quad (4.2.2)$$

Співвідношення (4.2.1) та (4.2.2) будемо називати запропонованим модифікованим правилом лінійного додавання.

Довговічність стомленістю, тобто очікувана кількість циклів до руйнування N_M , можна встановити на основі запропонованого модифікованого правила лінійного додавання шляхом підстановки в (4.2.1) та (4.2.2) параметрів вузькосмугових гауссівських випадкових напружень. Внаслідок цього отримується степенева залежність довговічності від σ .

Крім того, виведена масштабована густина ймовірності руйнувань $G(S)_m$, яка характеризує розподілення пошкоджень від кожного циклу напруження.

Позначимо:

$$l = S_m / \sigma ; \quad (4.2.3)$$

$$P(S) = n_S / N_M , \quad (4.2.4)$$

де $P(S)$ – доля циклів напружень з амплітудою S ;

n_S – кількість таких циклів;

N_M – середня кількість циклів до руйнування.

Підставивши прийняті вирази в (4.2.1), отримуємо:

$$D_S = \frac{P(S)}{N_S} N_M \cdot \left(\frac{S}{l\sigma} \right)^d . \quad (4.2.5)$$

Зауважимо, що при $d = 0$ дана функція пошкодження відповідає правилу лінійного додавання.

Враховуємо вирази (4.2.2) та (4.2.5) у процесі руйнування:

$$1 = \int_0^{S_m} D_S dS = \frac{N_M}{(l\sigma)^d} \int_0^{l\sigma} S^d \frac{P(S)}{N_S} dS , \quad (4.2.6)$$

$$N_M = \frac{(l\sigma)^d}{\int_0^{l\sigma} S^d \frac{P(S)}{N_S} dS} \quad (4.2.7)7$$

Якщо напруження є вузькосмуговим гауссівським випадковим процесом, то густина ймовірності огибаючих амплітуд $P(S)$ підпорядковуються розподіленню Релея [55]:

$$P(S) = \frac{S}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right], \text{ де } S \geq 0, \quad (4.2.8)$$

причому $P(S) = 0$ при $S < 0$.

Застосовуючи рівняння кривої стомленості $S - N$ при синусоїдальному напруженні

$$N_S = \left[\frac{S}{2^{-1/\beta} \cdot \sigma_f'} \right]^{-\beta}; \quad (4.2.9)$$

$$\beta = -1/b, \quad (4.2.10)$$

де σ_f' , β та b – параметри стомленої міцності матеріалу при циклічному навантаженні.

Після чого – отримуємо:

$$N_M = \frac{(l\sigma)^d}{\frac{2}{\sigma^2 \cdot \sigma_f' \cdot \beta} \int_0^{l\sigma} S^{1+\beta+d_e-S^2/2\sigma^2} dS}, \quad (4.2.11)$$

звідки:

$$N_M = H_M \cdot \sigma^{-\beta}, \quad (4.2.12)$$

$$H_M = \frac{\sigma_f' \cdot \beta}{l^{-d} \cdot [2^{1+\beta/2+d/2}] \cdot \gamma \cdot \left[\left(1 + \frac{\beta}{2} + \frac{d}{2} \right) \cdot \frac{l^2}{2} \right]}, \quad (4.2.13)$$

де $\gamma(\alpha, \tau)$ – неповна гамма – функція [5]

$$\gamma(\alpha, \tau) = \int_0^\tau x^{\alpha-1} \cdot e^{-x} dx. \quad (4.2.14)$$

Формулу (4.2.12) можна переписати наступним чином:

$$\sigma = \tilde{C}_M \cdot N_M^{-1/\beta}; \quad (4.2.15)$$

$$\tilde{C}_M = H_M^{1/\beta}. \quad (4.2.16)$$

Вирази (4.2.12) і (4.2.13) разом із (4.2.15) та (4.2.16) визначають шукану залежність довговічності стомленістю від σ .

При застосовуванні правила лінійного додавання слід приймати $d = 0$. Тоді вираз (4.2.13) матиме наступний вигляд:

$$H_L = \sigma_f \cdot \beta \cdot \left\{ \left[2^{1+\beta/2} \right] \cdot \gamma \cdot \left[\left(1 + \frac{\beta}{2} \right) \cdot \frac{l^2}{2} \right] \right\}^{-1}, \quad (4.2.17)$$

де індексом L позначені результати, які ґрунтуються на основі правила лінійного додавання та отримані при $d = 0$ [55].

Для очікуваної (середньої) довговічності N_L отримуємо:

$$N_L = H_L \cdot \alpha^{-\beta}, \quad (4.2.18)$$

$$\frac{N_M}{N_L} = \frac{H_M}{H_L} = \left[\frac{1}{l^{-d/2}} \right] \cdot \left\{ \frac{\gamma \cdot \left[(1 + \beta/2) \cdot (l^2/2) \right]}{\gamma \cdot \left[(1 + \beta/2 + d/2) \cdot (l^2/2) \right]} \right\}. \quad (4.2.19)$$

Згідно виразів (4.2.6) та (4.2.11)

$$N_M \int_0^\infty G(S)_M dS = 1. \quad (4.2.20)$$

$$G(S)_M = \left[\frac{2^{1/\beta}}{\sigma^2 \cdot \sigma_f \cdot \beta} \right] \cdot \left(\frac{1}{l\sigma} \right)^d \cdot S^{1+\beta+d_e-S^2/2\sigma^2}. \quad (4.2.21)$$

У даних виразах $G(S)_M$ – масштабована густина ймовірності пошкоджень D_S із нормуючим множником N_M .

Підставивши в останній вираз (4.2.21) значення $d = 0$, визначаємо масштабовану густину ймовірності пошкодження $G(S)_L$ згідно правила лінійного додавання:

$$\frac{G(S)_M}{G(S)_L} = \left(\frac{S}{S_M} \right)^d. \quad (4.2.22)$$

Для практичного підтвердження наведеного теоретичного дослідження розглянемо приклад, в якому дано: $\sigma'_f = 1152 \text{ МПа}$; $\beta = 9,65$; $d = -0,207$. Необхідно визначити N_M / N_L при $l = 3, 5$ і 7 та побудувати графіки $G(S)_M$ і $G(S)_L$ при $l = 5$.

Розрахунки проводяться згідно наведених виразів (4.2.12)...(4.2.22), результати яких представлені у табл. 4.1. та 4.2.

Таблиці результатів проведених розрахунків

Таблиця 4.1.

l	N_M / N_L
3	0,97
5	0,90
7	0,85

Отримані результати свідчать про зниження розрахункової оцінки довговічності на (10...15) %.

Таблиця 4.2

S	S / S_m	$G(S)_M / G(S)_L$
σ	0,2	1,40
2σ	0,4	1,21
3σ	0,6	1,11
4σ	0,8	1,05
5σ	1,0	1,00

Отримані результати свідчать про зростання пошкоджень, які вносяться циклами із малими амплітудами напружень, із-за нелінійного ефекту взаємодії робочого елемента інструменту з матеріалом. На рис. 4.2 наведений масштабований графік густини ймовірності пошкоджень робочих елементів інструменту обробки згуслих залишків речовин згідно правила лінійного та нелінійного додавання [171].

Варто зауважити, що найбільше пошкоджень виникають циклами напружень з амплітудою від 2σ до 5σ . Цикли з амплітудою вище 5σ можуть викликати дуже значні пошкодження; однак такі цикли, якщо і виникають, то дуже рідко. Цикли з

амплітудою менше 2σ виникають доволі часто, однак будь-яких значних пошкоджень не спричиняють [170]. Максимум пошкоджень у наведеному прикладі припадає на цикли з амплітудою $3,23\sigma$.

На рис. 4.3 показані робочі руйнівні шарошки після їх тривалої експлуатації.

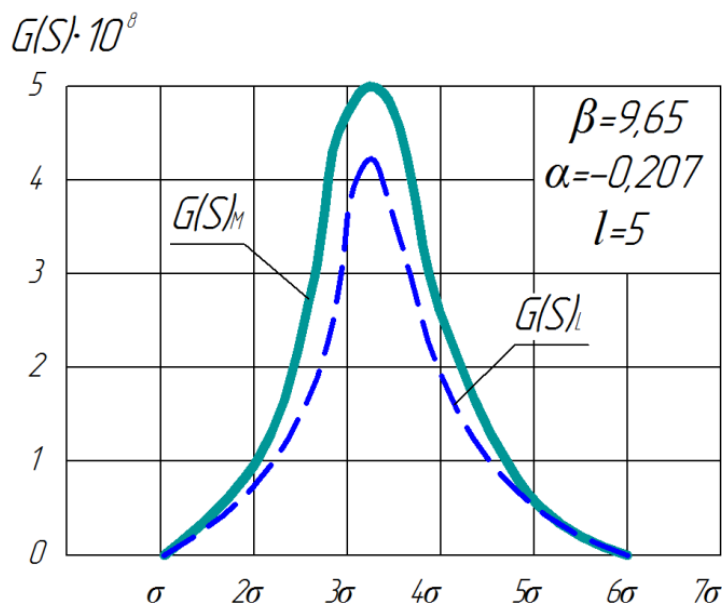


Рис. 4.2. Масштабована густина ймовірності пошкоджень згідно правила лінійного та нелінійного додавання.



Рис. 4.3. Стан робочої поверхні руйнівних шарошок після їх тривалої експлуатації.

4.3. Розрахунок економічної ефективності запропонованого механізму очищення цистерн

Економічний ефект від впровадження запропонованого механізму очищення цистерн виникає внаслідок значної економії матеріальних ресурсів, так як ручна праця замінюється механізованою. Це дозволяє скоротити фонд оплати праці,

витрати на матеріальні засоби, а також скороти час очищення цистерни, що в свою чергу прискорює результат якості роботи галузі.

Важливим показником при оцінці економічної ефективності будь-якого механізму є визначення його основних трудових показників: продуктивності, ефективності, ритмічності та трудомісткості праці. Це необхідно для того, щоб визначити чи доцільно застосовувати даний механізм, чи буде він ефективний, чи кращий він за існуючі аналоги.

4.3.1. Порівняльна характеристика очищення речовин існуючим методом та запропонованим механізмом.

За нормами, що взяті зі Збірника [138], які діють на Укрзалізниці, витрати часу на видалення 1т речовин складає 20,0537 люд/год. Під час випробування запропонованого механізму отримано наступні дані: при видаленні 2183 кг пеку було затрачено 2год 26хв. А це свідчить про те, що даний очисний механізм здатний очищувати 1 т речовин за 66 хв.

Визначаємо доцільність застосування даного механізму, порівнюючи його витрати з існуючими витратами за плановою вартістю видалення 1т смоли з цистерн.

При існуючому методі для очищення цистерн (≈ 32 т смоли) матеріальні витрати складають 8400 грн за місяць (на очищення однієї тони – 261,0 грн). В середньому за рік витрати складуть 100800 грн.

Матеріальні витрати очищення запропонованим методом в місяць складають 3232,00 грн, але при цьому видаляється ≈ 80 т смоли.

$$B_M = (B_{\text{щ}} + B_{\text{ш}}) \cdot n_M = (36 + 4,4) \cdot 80 = 3232,0 \text{ грн}$$

де $B_{\text{щ}}$ – матеріальні витрати на щітки, грн;

$B_{\text{ш}}$ – матеріальні витрати на шарошки, грн;

n_M – кількість очищеної речовини, т.

Вважаємо за необхідне, з метою розрахунку витрат на очищення 1т пеку запропонованим методом, визначити орієнтовну вартість очищення 1т пеку:

$$V = n_{uc} + \sum \frac{N_{ш}}{n_T} + C_{Г}, \quad (4.3.1)1$$

де n_{uc} – витрати на щітки для очищення 1 т пеку, грн

$N_{ш}$ – витрати на необхідну кількість шарошок за звітний період, грн

n_T – кількість органічної речовини, що видаляється з цистерни, т

$C_{Г}$ – годинна тарифна ставка робітника і-го розряду, грн/год

$$V = \frac{4 \cdot 18}{2} + \frac{350/80}{1} + 15,13 \cdot 2 = 36 + 4,4 + 30,26 = 82,01 \text{ грн}$$

З метою визначення продуктивності даного механізму доречно розрахувати показник ритмічності очищення цистерн. Для цього можна використати формулу визначення коефіцієнту ритмічності, переклавши його на нашу ситуацію.

$$K_{pn} = \frac{\sum q_{\phi}}{n \cdot q_n}, \quad (4.3.2)$$

де K_{pn} – коефіцієнт ритмічності очищення цистерни;

n – кількість періодів, які аналізуються;

q_n – нормативний запас;

q_{ϕ} – фактичний річний запас (у межах нормативного).

$$K_{pn} = \frac{27644}{12 \cdot 1159,3} = 1,98.$$

Згідно отриманого результату, можна зробити висновок про високий коефіцієнт ритмічності роботи очищення цистерн, а також вчасне забезпечення матеріальними ресурсами. Даний показник характеризує активність робочого процесу та можливість механізму до безперебійної роботи.

За допомогою запропонованого механізму можливо очищувати протягом року в середньому 480 цистерн (виходячи з розрахунку 2 цистерни за зміну).

Згідно даної таблиці, можна зробити висновок про значну економію матеріальних засобів при використанні запропонованого методу очищення цистерни: $1997,17 - 1159,3 = 837,87$ грн.; що складає 43%.

Порівняльна таблиця вартості видалення 1т смоли

Таблиця 4.3.

№п/п	Назва статті витрат	Витрати на існуючий метод, грн	Витрати на запропонований метод, грн
1	Прямі витрати:		
1.1	Матеріали	70,40	40,4
1.2	Фонд оплати праці	552,00	327,85
1.3	Відрахування на соціальні заходи (37,61%)	207,61	119,03
1.4	Паливо	22,30	15,6
2	Загальновиробничі витрати (207,4%)	1144,86	656,42
3	Всього виробнича собівартість	1997,17	1159,3
4	Адміністративні витрати		
5	Всього повна собівартість	1997,17	1159,3

Коефіцієнт реновації основних фондів при використанні нової техніки, визначають з урахуванням фактора часу, який розраховується за формулою [107]:

$$\rho_p = \frac{E_H}{(1 + E_H)^{t_{cl}} - 1}, \quad (4.3.3)$$

де t_{cl} – термін служби нової техніки;

E_H – норматив приведення різночасових витрат та результатів, чисельно рівний нормативу ефективності капітальних вкладень ($E_H=0,15$).

Розрахуємо коефіцієнт реновації основних фондів при використанні нової техніки за формулою (4.3.3):

$$\rho_p = \frac{0,15}{(1 + 0,15)^7 - 1} = 0,075.$$

Вартість закупівлі складових запропонованої нової техніки наведена у табл. 4.4. За відсутності гуртових цін на нову техніку вони встановлюються розрахунковим шляхом. На ранніх стадіях розробки і проектування нової техніки, коли відсутня

звітна або нормативна інформація, при визначенні економічного ефекту приймають розрахункові ціни, до складу яких включають витрати на розробку й виготовлення нової техніки (ціни, взяті на початок 2014 року).

Складові механізму для очищення цистерн

Таблиця 4.4.

№п/п	Назва складових приладу	Кількість, шт.	Вартість, одиниці, грн.	Вартість всього, грн.
1	Механізм	1	16 240	16 240
2	Електродвигун	1	3 200	3 200
3	Шарошки	60	70	4200
4	Щітки	1920	18	34 560
5	Сумарна вартість			58 200

Розрахуємо $T_{ок}$ (термін окупності) запропонованого методу за формулою:

$$T_{ок} = \frac{\sum K}{B \cdot N_{ц} \cdot 12}, \quad (4.3.4)$$

де $\sum K$ – сумарне інвестування за рік;

B – чистий дохід на одну тону, грн

$N_{ц}$ – кількість оброблених цистерн в місьць, шт.

Чистий дохід за рік становить $B \cdot N_{ц} \cdot 12 = 837,87 \cdot 40 \cdot 12 = 401841,6$ грн.

Термін окупності запропонованого механізму складе:

$$T_{ок} = \frac{58200}{401841,6} = 0,14 \approx 2 \text{ місяці}$$

4.3.2. Визначення продуктивності праці очищення цистерн запропонованим методом

Із праці [139], продуктивність праці – це показник трудової діяльності працівників, який характеризує кількість продукції, виробленої за одиницю часу, або витрати часу на виробництво одиниці продукції.

Окрім продуктивності праці використовують також інші показники, які характеризують якість та ефективність робочого процесу. Вихідними даними для

розрахунку продуктивності, виробітку та інших якісних показників є фактичний обсяг виконаних робіт.

У нашому випадку загальний виробіток продукції — це та кількість очищених цистерн, яку було проведено запропонованим механізмом за розрахунковий період. Але для оцінки роботи механізму та визначення його економічної ефективності та доцільності треба проаналізувати скільки цистерн буде очищено за певний період та порівняти результати розрахунків з існуючим на сьогоднішній день методом.

Визначення продуктивності праці в натуральних показниках

Показник, який характеризує продуктивність окремого працівника:

$$ПП_{\text{нат.ок}} = \frac{Q}{\chi_{\text{об}}} \quad (4.3.5)$$

де Q – кількість випущеної продукції в натуральних одиницях по підприємству або його структурному підрозділу;

$\chi_{\text{об}}$ – середньооблікова чисельність працюючих на цьому підприємстві .

Згідно існуючого методу очищення цистерн при використанні ручної праці, витрати часу на очищення однієї тони смоли складають 20,0537 люд-год., за місяць очищується таким методом 5 цистерн, за рік 60 цистерн. Звідси продуктивність 1 методу складає:

$$ПП_{\text{нат.ок}} = \frac{10000}{4} = 2500 \text{ кг}$$

Це означає, що продуктивність праці окремого працівника складає 2,5 т за місяць.

За допомогою запропонованого механізованого методу можливо очистити за місяць – 40 цистерн, за рік 480 цистерн.

Отже, продуктивність одного працівника в 2 методі складе:

$$ПП_{\text{нат.ок}} = \frac{80000}{2} = 40000 \text{ кг}$$

Продуктивність праці одного працівника складає 40 т в місяць, в рік – 480 т.

Результати продуктивності праці одного працівника за методами 1 і 2 дають підстави для висновку про явну економічну доцільність запропонованого механізованого методу очищення цистерн.

Показники продуктивності праці мають бути наскрізними, зведеними, порівняльними, мати високий ступінь узагальнення, бути універсальними у застосуванні.

Продуктивність праці вимірюється відношенням обсягу виробленої продукції до затрат праці (середньооблікової чисельності персоналу). Залежно від прямого або оберненого відношення існують два показники: виробіток і трудомісткість.

Виробіток — це кількість виробленої продукції за одиницю часу або кількість продукції, яка припадає на одного середньооблікового працівника чи робітника за рік, квартал, місяць. Він вимірюється відношенням обсягу виробленої продукції до величини робочого часу, затраченого на його виробництво:

$$B = \frac{Q}{T}, \quad (4.3.6)$$

де B — виробіток;

Q — обсяг виробленої продукції;

T — затрати робочого часу.

Виробіток за місяць одного працівника за першим методом складе:

$$B = \frac{10000}{160} = 62,5 \text{ кг}$$

За запропонованим механізованим методом виробіток за місяць становить:

$$B = \frac{40000}{160} = 250 \text{ кг}$$

При розрахунку відношення кількості залишків вантажу в цистерні до затрат часу (в нашому випадку — місяць), результати розрахунку виробітку одного працівника свідчать, про доцільність запропонованого механізованого по відношенню до існуючого методу очищення.

Стимулом підвищення продуктивності праці також є удосконалення форм систем оплати праці, відтворення робочої сили та розв'язання соціальних проблем суспільства. Підвищення продуктивності праці створює умови для зростання заробітної плати, і навпаки, збільшення заробітної плати стимулює її продуктивність.

4.3. Висновки до розділу 4.

Апробація розробленого технологічного процесу руйнування монолітності застиглих залишків речовин вказала на то, що найбільше зусилля контактної взаємодії виникає при обробці застиглої маси торцевою щіткою, тобто на етапі остаточного руйнування утвореного шламу, його видалення із зони обробки та якісного формування поверхневого шару металу внутрішньої порожнини котла вагона-цистерни.

Наведена методика розрахунку потужності процесу обробки, згідно якої отримані результати розрахунків вказали, що загальна потужність даного технологічного процесу становить $N_{\text{заг}} = 12,12 \text{ кВт}$.

Для наведеного прикладу розрахована довговічність стомлюваністю, згідно уточненої оцінки, виявилась зниженою на (10...15) %. Зниження на 10 % відповідає максимальній амплітуді напруження 5σ , а зниження на 15 % – максимальній амплітуді 7σ . Криві напруження – довговічність експлуатації в логарифмічних координатах мають однаковий кутовий коефіцієнт.

Густина ймовірності пошкоджень ілюструє вплив нелінійної взаємодії на різних рівнях взаємодії; найбільше підвищення рівня руйнування за рахунок цього ефекту спостерігається в області малих амплітуд напруження. Основна частина пошкодженості утворюється циклами напружень з амплітудою від 2σ до 5σ .

При аналізі роботи існуючого та запропонованого методу очищення цистерн можна констатувати про економічну доцільність та ефективність запропонованого механізму. Показник ефективності праці запропонованого методу свідчить про те, що механізм здатний очистити 1 т речовин за 66 хв. Це говорить про те, що очищується за місяць 40 цистерн завдяки механізованій установці, яка замінює ручну працю, що використовується сьогодні. Ефективність від запровадження нового методу очищення доводить про значну економію матеріальних засобів, що складає 43%. Чистий дохід за рік склав 401841,6 грн. Даний результат говорить про очевидну економічну ефективність запропонованого механізму.

РОЗДІЛ 5.

ЯКІСНЕ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ

Технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей елементів вантажних засобів залізничного транспорту нерозривно пов'язане із забезпеченням якісних параметрів стану поверхневого шару матеріалу, із якого вони виготовлені. У даному випадку ми розглядаємо якісні параметри металу внутрішньої поверхні котла цистерни, оскільки дана поверхня безпосередньо контактує із заповненими в цистерні матеріалами, і від стану якісних характеристик цієї поверхні залежать умови транспортування, тривалого і надійного збереження вантажу, та його швидкого і ефективного вивантажування.

Під поняттям якісного формуванням поверхневого шару металу слід розуміти такі наслідки впливу технологічних процесів механічної обробки із руйнуванням та видаленням застиглих залишків вантажів, що пов'язані із контактуванням робочих елементів інструменту безпосередньо як із залишками вантажу, так і з металом внутрішньої поверхні котла цистерни. Комплекс технологічних задач із якісного формування поверхні металу об'єднує в собі такі чинники процесу, як формування шорсткості поверхні, зміцнення поверхневого шару металу, виникнення внаслідок механічної обробки внутрішніх залишкових напружень та зміни внаслідок неї структури металу.

Для успішного вирішення цієї задачі необхідно розглядати теоретичні аспекти взаємозв'язків параметрів стану поверхневого шару виробу з умовами їх обробки. Доцільно розглядати не загальні аспекти зв'язків окремих параметрів стану металу внутрішньої поверхні котла цистерни з умовами її обробки [33,59,60], а конкретний взаємозв'язок системи параметрів стану поверхневого шару, які визначають експлуатаційні властивості даного виду вантажних засобів залізничного транспорту із умовами їх обробки.

Технологічний процес механічної обробки та інструмент його виконання, як вже наводилось у попередніх розділах даної роботи, пов'язаний із певним динамічним впливом шарошок інструменту та його гнучких робочих елементів,

комплексний вплив яких здатний частково змінювати якісні показники матеріалу внутрішньої поверхні котла цистерни. У даному розділі ми розглянемо формування таких якісних показників поверхні металу, як формування шорсткості поверхні, зміцнення поверхневого шару металу, виникнення внаслідок механічної обробки внутрішніх залишкових напружень. Змінами в структурі металу ми знехтуємо, оскільки вважаємо їх незначущими та несуттєвими в даному технологічному процесі.

5.1. Формування шорсткості поверхні металу

Аналіз результатів досліджень з формування висоти профілю шорсткості при обробці різними за характерами робочими елементами інструменту [22,61,62,63,64] дозволяє зробити висновок, що у формуванні шорсткості поверхні впливають наступні фактори: глибина проникнення робочої поверхні робочої частини інструментів (шипів шарошок і гнучких елементів щітки); кінематика їх робочих переміщень; коливне переміщення інструменту відносно поверхні обробки; пружні та пластичні деформації матеріалу в зоні безпосереднього контактування із робочими елементами інструменту.

В залежності від умов обробки порожнини котла цистерни степінь впливу кожного із цих факторів на формування шорсткості буде різною. Наведені фактори викликають утворення систематичної складової профілю шорсткості, яку можна описати математично.

$$R_z = h_1(h'_1) \mp (h_2 + h_3 + h_4), \quad (5.1.1)$$

де h_1 , h_2 , h_3 та h_4 – складові профілю шорсткості поверхні, які обумовлені, відповідно: глибиною проникнення робочої поверхні робочої частини шипів шарошок, кінематики їх робочих переміщень, коливне переміщення інструменту відносно поверхні обробки, пружні та пластичні деформації матеріалу в зоні безпосереднього контактування із робочими елементами інструменту;

h'_1 – глибина проникнення поверхні робочої частини гнучких елементів інструменту обробки.

При ударно-обертовому переміщенні шарошок, руйнування h_1 спочатку застиглих залишків речовин, а далі – формування профілю шорсткості внутрішньої поверхні котла цистерни, відбуваються під впливом певного ударного навантаження, а також у перервах між ударами за рахунок обертового моменту, хоча потужність механізму обертання є значно меншою ударного. Осьове навантаження слугує для компенсації сил віддачі. Схема прикладання зусиль при ударі наведена на рис. 5.1.

Руйнування відбувається під впливом зусилля удару P_Y , яка перевищувати сили опору руйнування:

$$F_T = \mu_1 \cdot N, \quad (5.1.2)$$

де F_T – сили тертя робочої поверхні шипа шарошки із поверхнею матеріалу обробки;

μ_1 – коефіцієнт тертя контактуючих матеріалів;

N – нормальні складові зусилля впливу бокової поверхні шипа, які визначаються згідно наступної залежності

$$N = \frac{\sigma_{CT} \cdot d \cdot h_1}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (5.1.3)$$

де σ_{CT} – границя міцності матеріалу обробки при одновісному стиску;

d – діаметр шарошки;

h_1 – глибина проникнення шипа шарошки в матеріал обробки.

T – горизонтальна складова сили руйнування, що розраховується:

$$T = N \cdot \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (5.1.4)$$

Зусилля удару визначається:

$$P_Y = 2 \cdot d \cdot h_1 \cdot \sigma_{CT} \cdot \left(\tan \frac{\alpha}{2} + \mu_1 \right) \cdot K_{3T}, \quad (5.1.5)$$

де K_{3T} – коефіцієнт затуплення робочих елементів шарошки [65].

Після певних математичних перетворень, глибина проникнення шипа шарошки в матеріал обробки становитиме:

$$h_1 = \frac{P_Y}{2 \cdot d \cdot \sigma_{CT} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu_1 \right) \cdot K_{3T}}. \quad (5.1.6)_6$$

Для руйнування всієї площини контакту шарошки необхідно здійснити Z_0 число ударів:

$$Z_0 = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu_1 \right) \cdot K_{3T} \cdot \sigma_{CT}}{2 \cdot P_Y}. \quad (5.1.7)$$

Глибина проникнення h'_1 робочої поверхні робочої частини інструменту, що складається зі гнучких елементів щітки розраховується згідно відомої залежності [44,66]:

$$h'_1 = 2 \cdot (1 - \cos \varphi_a) + S \cdot \sin \varphi_a \cdot \cos \varphi_a - \sin \varphi_a \cdot \sqrt{S \cdot \sin \varphi_a \cdot (2r - S \cdot \sin \varphi_a)}, \quad (5.1.8)$$

де r – радіус формуючої поверхні одиничного гнучкого елемента (рис.5.2);

φ_a – задній кут втискування дротинки у поверхню обробки.

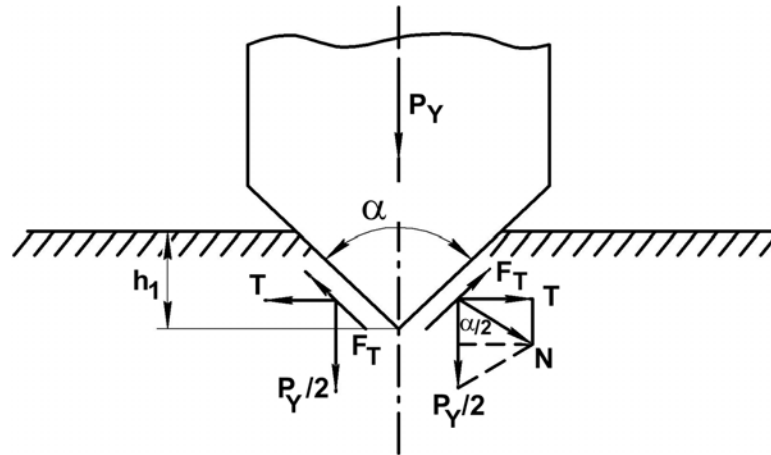


Рис. 5.1. Схема діючих зусиль та глибина лунки при формуванні шорсткості поверхні шарошки.

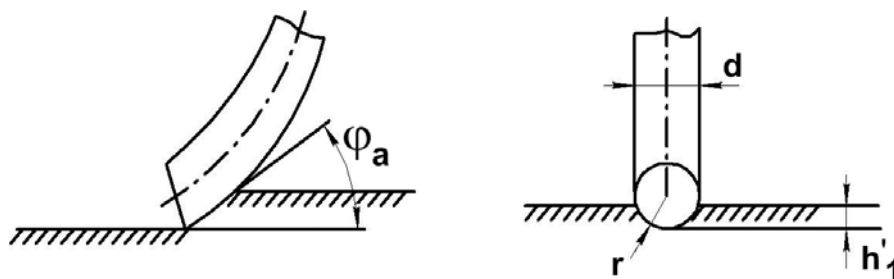


Рис. 5.2. Схема формування профілю шорсткості поверхні елементарним гнучким елементом.

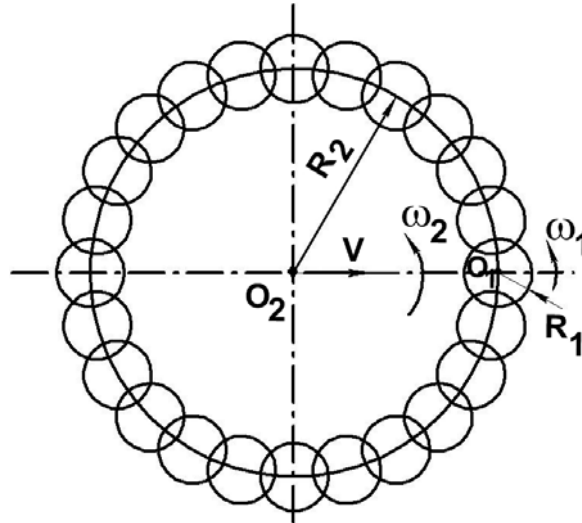


Рис. 5.3. Схема обертально-поступальних переміщень шарошки у процесі обробки поверхні.

Найбільш суттєвим впливом на формування профілю шорсткості поверхні металу, що залежать від кінематики переміщень робочих елементів, h_2 є контактування із даною поверхнею шипів шарошок, оскільки крім динамічного удару вони у процесі обробки здійснюють ще й складне обертово-поступальне переміщення (рис. 5.3). Далі встановимо координати переміщення одиничної точки A , яка розташована на ободі шарошки (рис. 5.4).

Із останнього рисунку: $\angle \alpha_1$ – кут повороту точки A ; $\angle \alpha_2$ – кут повороту ланки O_1O_2 ; V – швидкість переміщення системи із центром O_2 . Вводимо полярні координати (r, φ) із їх початком у точці O_2 . Розв’язок проводимо за методом – від простого до складного.

Нехай початок координат проходить через точку O_1 . Тоді координата точки A буде:

$$\begin{cases} r = R_1; \\ \varphi = \alpha_1, \end{cases} \text{ або } (R_1, \alpha_1).$$

Далі припускаємо, що початок центру координат проходить через точку O_2 , яка є нерухомою. Із рис. 5.5 встановлюємо, що:

$$\angle ABO_1 = 90^\circ; \angle AO_1B = \alpha_1; \angle AO_2B = \alpha_2.$$

$$\text{Тоді: } r = O_2O_1 + O_1B; O_1B = O_1A \cdot \cos \alpha_1 = R_1 \cdot \cos \alpha_1; O_2B = r = R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1.$$

Із рис. 5.5 : $\angle O_1 O_2 A = \text{Arctg}\left(\frac{AB}{O_2 B}\right) = \text{Arctg}\left(\frac{R_1 \cdot \sin \alpha_1}{R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1}\right)$.

Нехай міжцентрова відстань $O_2 O_1 = R_2$ здійснює додатковий поворот на кут α_2 .

Тоді повний кут повороту буде рівним:

$$\begin{cases} \varphi = \alpha_2 + \text{Arctg}\left(\frac{R_1 \cdot \sin \alpha_1}{R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1}\right); \\ r = R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1. \end{cases} \quad (5.1.9)$$

Якщо точка O_2 здійснює горизонтальне переміщення із швидкістю V , тоді координати переміщення точки A будуть:

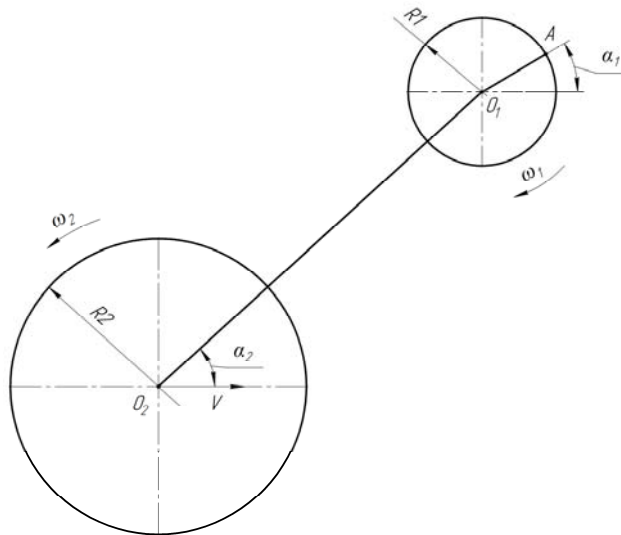


Рис. 5.4. Координати переміщення точки A .

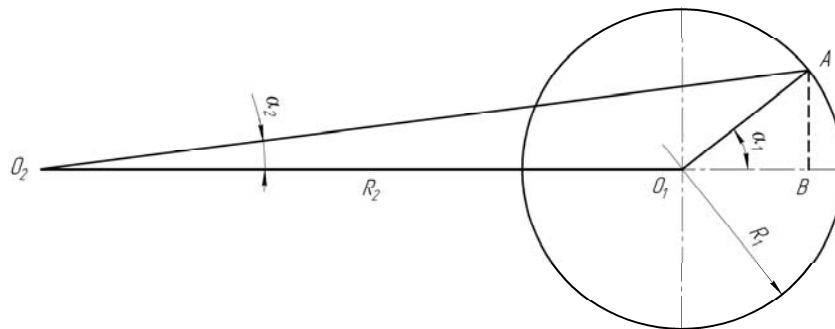


Рис. 5.5. Схема системи при нерухомому центрі O_2 .

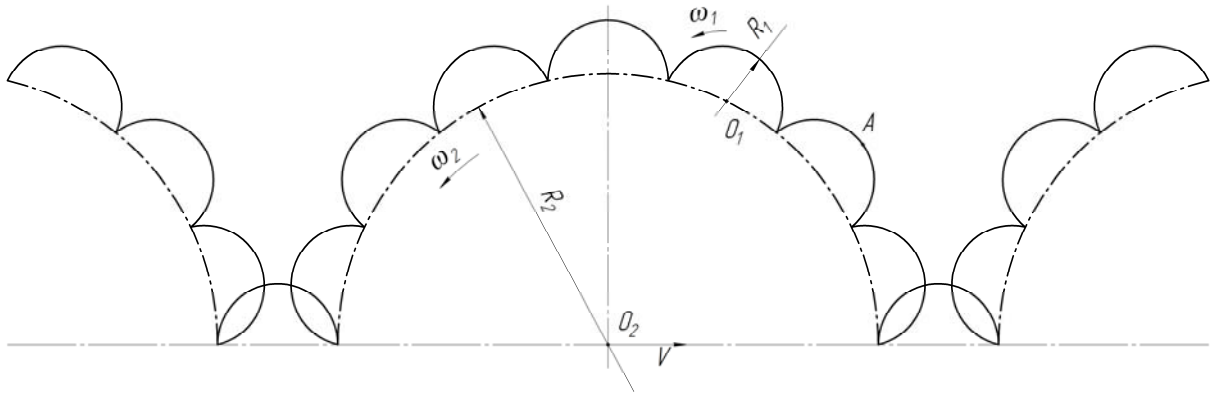


Рис. 5.6. Траєкторія обертально-поступального переміщення точки A .

$$\begin{cases} \varphi = \alpha_2 + \text{Arctg}\left(\frac{R_1 \cdot \sin \alpha_1}{R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1}\right); \\ r = V + R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1. \end{cases} \quad (5.1.10)$$

Остаточно координати обертово-поступального переміщення точки A виглядатимуть у вигляді наступних рівнянь:

$$h_2 = \begin{cases} \varphi = \text{Arctg}\left[\frac{(R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1) \cdot \sin\left(\alpha_2 + \text{Arctg}\frac{R_1 \cdot \sin \alpha_1}{R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1}\right)}{(R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1) \cdot \cos\left(\alpha_2 + \text{Arctg}\frac{R_1 \cdot \sin \alpha_1}{R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1}\right) + V}\right]; \\ r = \frac{(R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1) \cdot \sin\left(\alpha_2 + \text{Arctg}\frac{R_1 \cdot \sin \alpha_1}{R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1}\right)}{(R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1) \cdot \cos\left(\alpha_2 + \text{Arctg}\frac{R_1 \cdot \sin \alpha_1}{R_2 + R_1 \cdot \cos \alpha_1}\right) + V}. \end{cases} \quad (5.1.11)$$

Графік обертово-поступального переміщення точки A наведено на рис. 5.6.

Вплив коливного переміщення інструменту відносно поверхні обробки на формування складової висоти її мікропрофілю h_3 визначається амплітудою коливання від частоти λ збуджуючого зусилля, викликаного різницею припуску при проходженні вершини шипа шарошки або впадини вихідної шорсткості та нерівномірністю твердості поверхні обробки [67].

При обробці поверхні металу із застосуванням шарошок їх коливні переміщення відносно поверхні викликають утворення хвилястості. Однак на складову профілю шорсткості впливають пружні коливання контактних переміщень

одиночного шипа шарошки, викликані зусиллям удару P_Y . Величина утвореної складової мікропрофілю розраховується згідно наступної залежності [69]:

$$h_3 = \frac{P_Y \cdot [E_2 \cdot (1 - \mu_1^2) + E_1 \cdot (1 - \mu_2^2)]}{\pi \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right) + T_h^2 \cdot \lambda^2}}, \quad (5.1.12)$$

де E_1 і E_2 – модуль пружності матеріалу шарошки та поверхні обробки;

μ_1 і μ_2 – коефіцієнт Пуассона відповідно матеріалу шарошки та поверхні обробки;

T_h – стала часу демпфування [70];

λ – амплітуда коливань від частоти збуджуючого зусилля;

ω – частота власних коливань.

Вплив пружних та пластичних деформацій матеріалу в зоні безпосереднього контактування із робочими елементами інструменту на величину утвореної складової мікропрофілю h_4 характеризується частковим пластичним деформуванням поверхневого шару основного металу котла цистерни та відносних зсувів даного пластично деформованого шару. Розрахунок складової h_4 проводиться згідно залежності

$$h_4 = R_Z - (h_{\text{пл}} - h_{\text{пр}}), \quad (5.1.13)$$

де R_Z – висота мікрориступів на вихідній поверхні металу до обробки;

$h_{\text{пл}}$ – глибина пластичного проникнення в поверхневий шар матеріалу гнучких робочих елементів інструменту, як основних формуючих мікропрофіль поверхні;

$h_{\text{пр}}$ – величина пружного відновлення поверхні обробки.

Пластична компонента складової h_4 встановлена шляхом експериментальних досліджень при динамічних випробовуваннях, згідно методики [71], що ґрунтується наступною залежністю:

$$h_{\text{пл}} = \chi_1 \cdot (P_Y - N_S), \quad (5.1.14)$$

де χ_1 – коефіцієнт, що враховує розміри контактної робочої поверхні одиночного щіткового елемента та пластичні властивості матеріалу;

P_Y – зусилля формуюче мікропрофіль поверхні, визначене за (5.1.5);

N_s – критичне навантаження, яке відповідає початку зародження пластичної деформації.

Коефіцієнт розміру контактної робочої поверхні встановлюється згідно залежності [72]

$$\chi_1 = (0,5 \cdot \pi \cdot R_{np} \cdot HD_d)^{-1}. \quad (5.1.15)$$

де HD_d – число динамічної пластичної твердості, встановлене згідно емпіричної залежності:

$$HD_d = 0,5 \cdot HD \cdot \left\{ 1 - 137 \cdot (HD)^{-1} + \left[1 + 2250 \cdot (HD)^{-1} \right]^{0,5} \right\}, \quad (5.1.16)$$

де $HD = \frac{23}{49} \cdot HB^{100/89}$ – число статичної пластичної твердості (HB – твердість за Бринелем).

Критичне навантаження N_s , яке відповідає початку зародження пластичної деформації встановлене в результаті динамічних експериментальних досліджень [73]:

$$N_s = 0,207 \cdot 10^5 \cdot R_{np} \cdot \exp \left[1,9 \cdot (10^{-3} \cdot HD_d - 1)^{0,668} \right]. \quad (5.1.17)$$

Підставляючи всі наведені вище залежності у вираз (5.1.14) та провівши ряд математичних спрощень – одержуємо пластичну компоненту складової h_4 :

$$h_{nl} = 3,52 \cdot 10^5 \frac{d \cdot h_1 \cdot \sigma_{CT} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu_1 \right) \cdot K_{3T} \cdot \exp \left[1,9 \cdot (10^{-3} \cdot HD_d - 1)^{0,668} \right]}{1 - 231,5 \cdot HB^{100/89} + \sqrt{1 + 3801,7 \cdot HB^{100/89}}}. \quad (5.1.18)$$

Пружне деформування h_{np} описується теорією місцевих контактних напружень, які підвласні закону Герца

$$h_{np} = k_1 \cdot P_Y^{2/3}, \quad (5.1.19)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує пружні властивості робочого елемента інструменту та матеріалу котла цистерни, значення якого визначається за наступною формулою:

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt[3]{\left(\frac{37,7 \cdot R_{PP}}{\frac{1-\mu_1^2}{\pi \cdot E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi \cdot E_2}} \right)^2}}. \quad (5.1.20)0$$

Всі теоретично отримані значення підставляємо у рівняння (5.1.13) і одержуємо шукану складову формування шорсткості поверхні комплексної обробки.

Остаточню, підставивши у початково встановлену залежність (5.1.1) отримані вирази складових шорсткості (5.1.6), (5.1.11), (5.1.12) та (5.1.13), одержуємо математичну залежність для визначення показника шорсткості R_Z .

5.1.1. Експериментальне встановлення шорсткості поверхні.

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу обробки на середнє арифметичне відхилення мікропрофілю матеріалу внутрішньої поверхні котла цистерни проводилось для різних низьколегованих сталей даного виду вантажних засобів залізничного транспорту, згідно основи теорії планування багатofакторних експериментів.

Методика проведення експериментальних досліджень, інструмент, дослідні зразки та фактори процесу обробки наведені у розділі 3. Математична обробка результатів дозволила скласти наступну емпіричну залежність:

$$Ra = a_{1(2)}^{(')} \cdot V_{\text{ш1(2)}}^{(')} \cdot S_{1(2)}^{(')} \cdot B_{1(2)}^{(')} \cdot d_{1(2)}^{(')} \cdot C_{1(2)}^{(')} \cdot l_{1(2)}^{(')} \cdot Z_{01(2)}^{(')} \cdot V_{\text{ш1(2)}}^{(')}, \quad (5.1.21)$$

де індексам 1 і 2 відповідають встановлені значення Ra для гнучких робочих елементів очищувального органу інструменту та робочих елементів руйнівних шарошок, а індекси (') та (``) вказують на показник шорсткості при поздовжньому та поперечному замірі відхилення мікропрофілю поверхні.

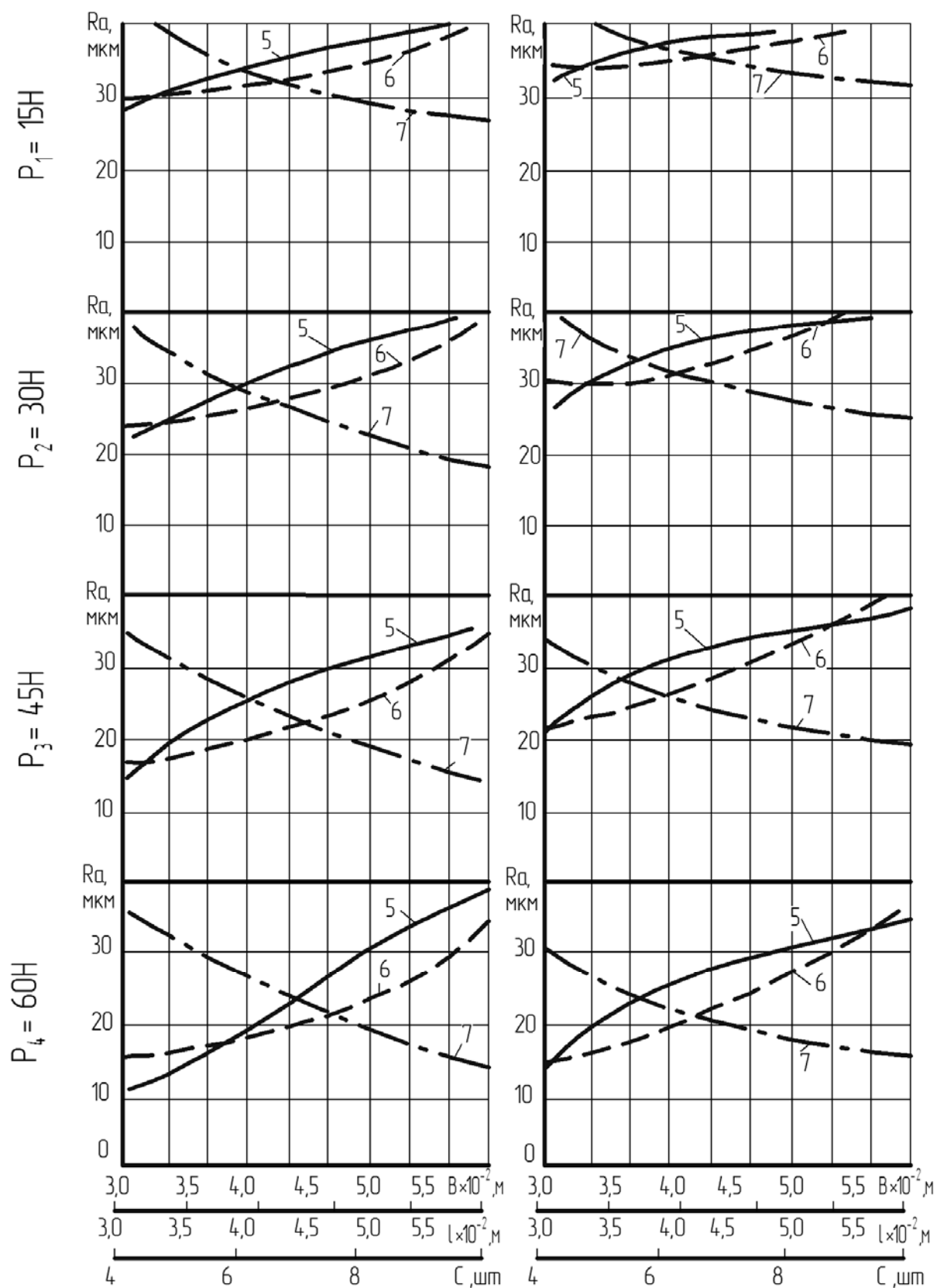


Рис. 5.7. Залежність шорсткості поверхні металу в залежності від технологічних режимів обробки

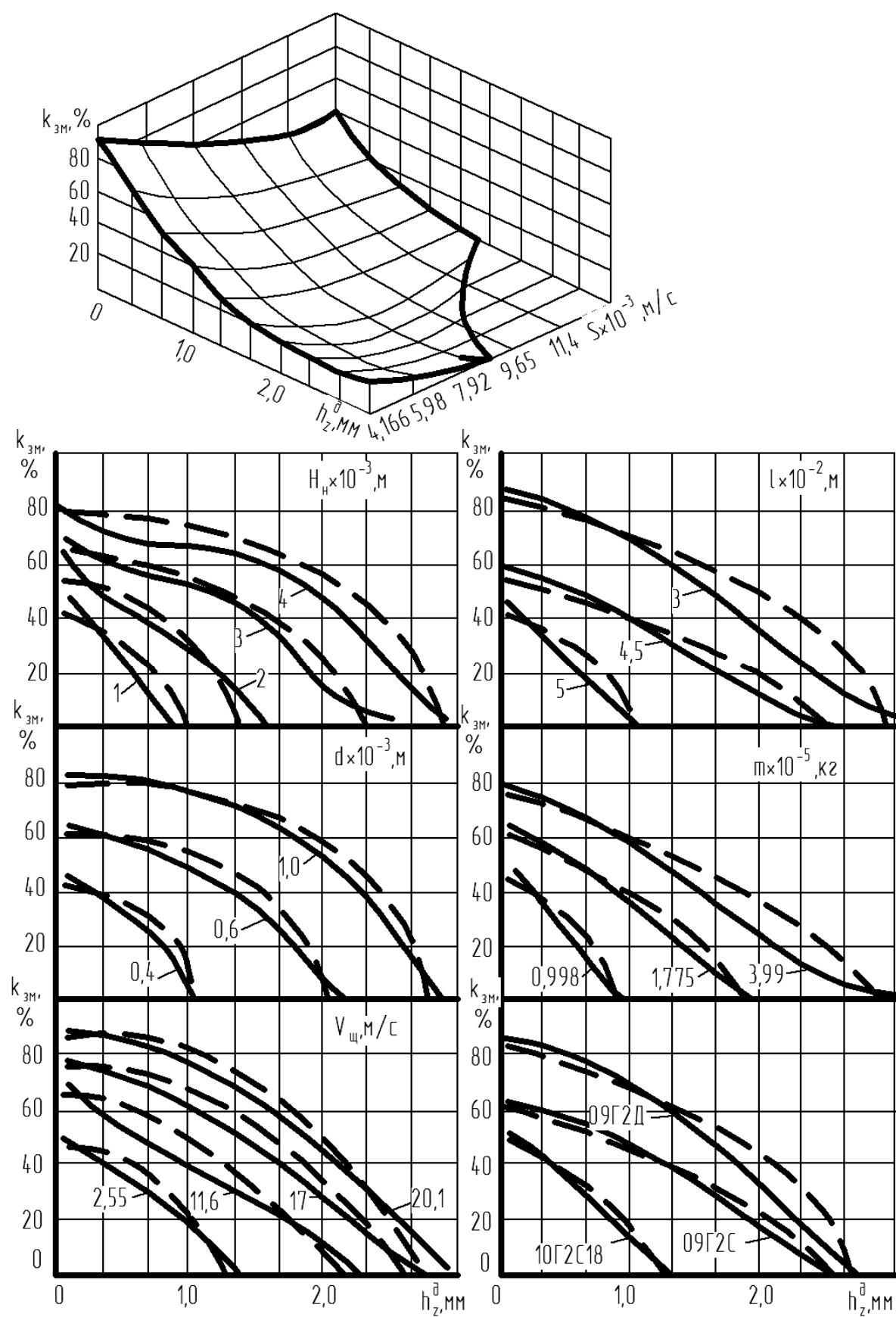


Рис. 5.8. Коефіцієнт зміни шорсткості поверхні металу в залежності від технологічних режимів обробки

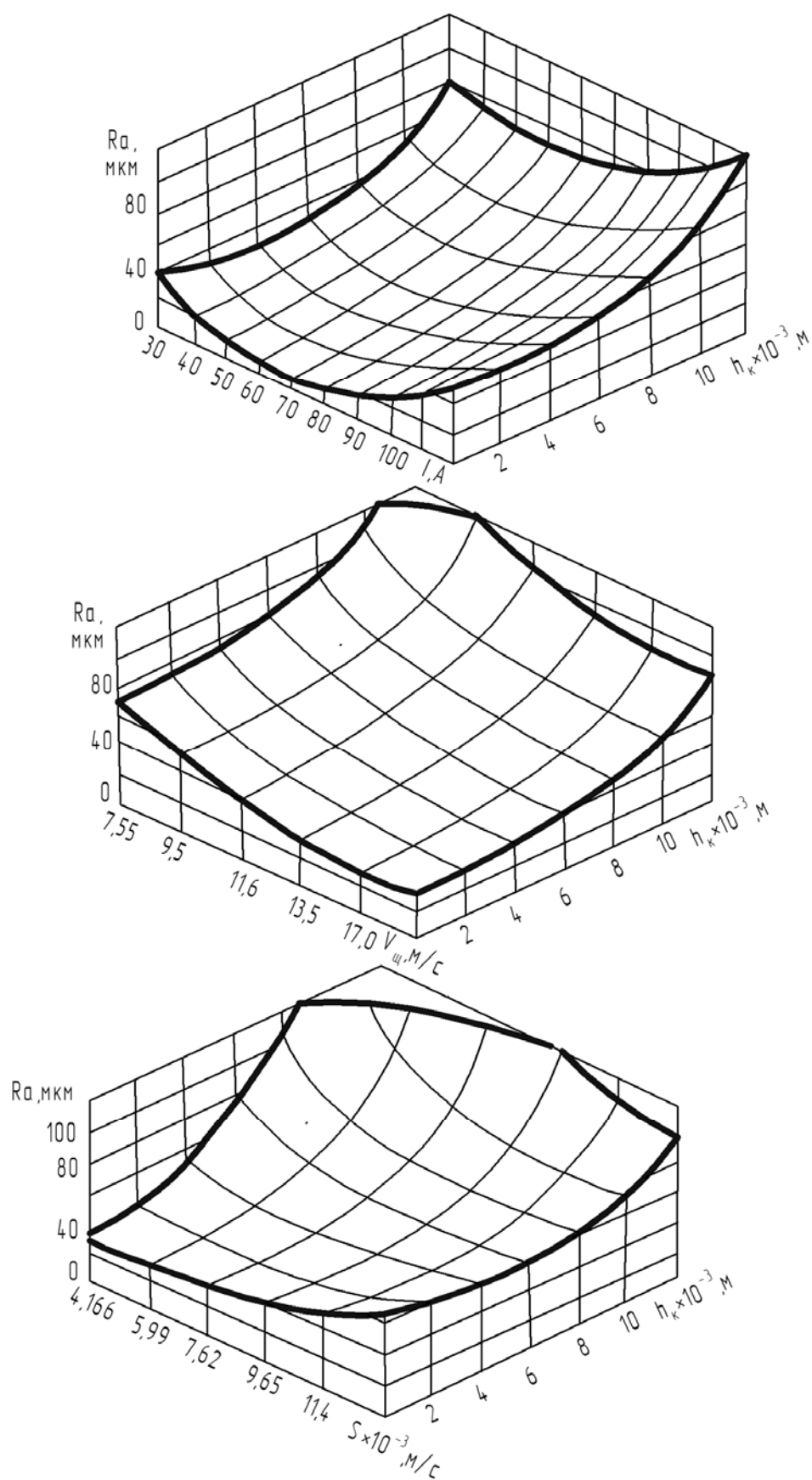


Рис. 5.9. Залежність шорсткості поверхні цистерни з сталі 09Г2С від технологічних режимів у процесі очищення

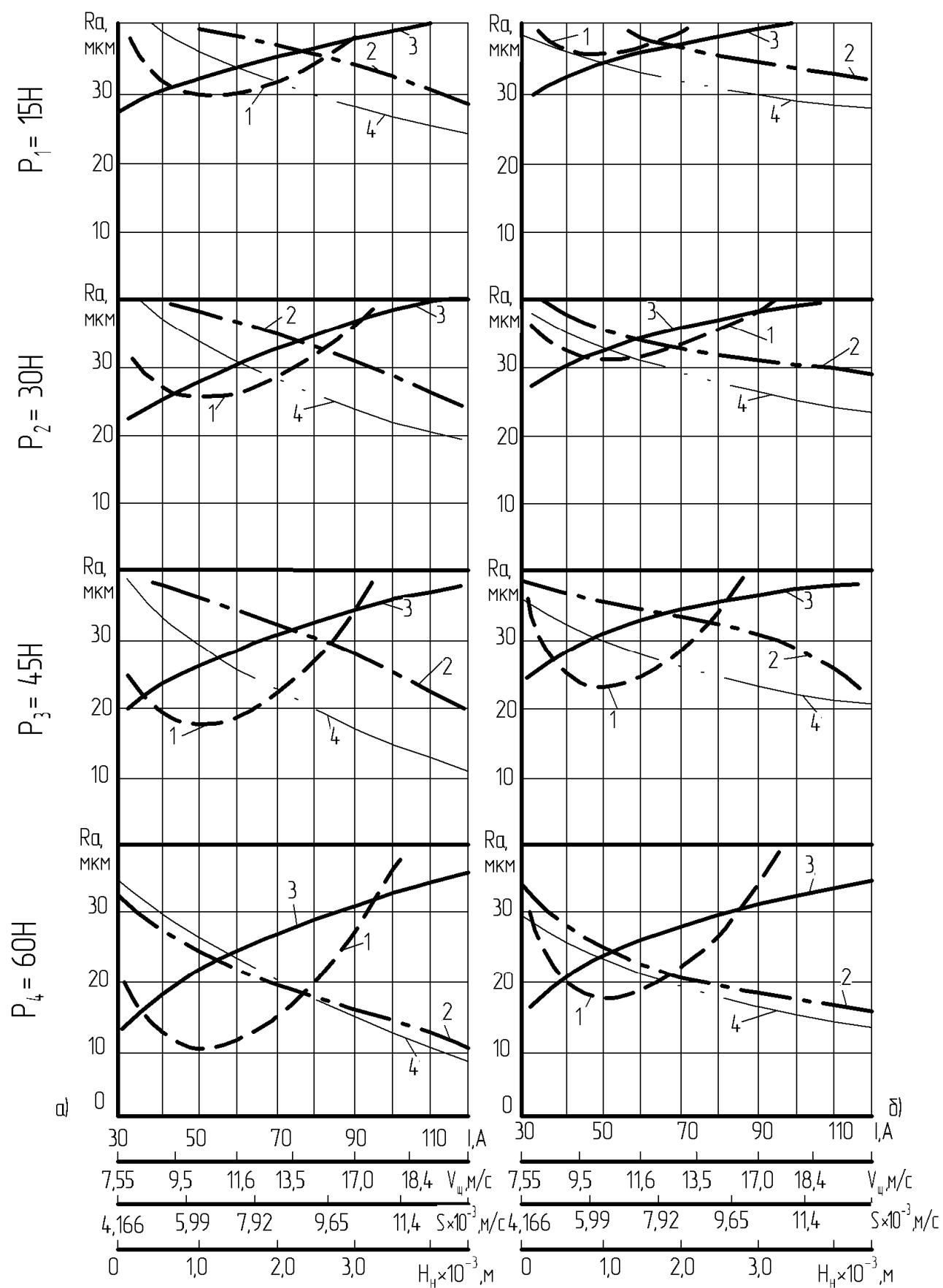


Рис. 5.10. Залежність шорсткості поверхні заготовки з сталі 09Г2Д від технологічних режимів ТМО при початковому значенні поверхні основного металу: $R_a = 50 \mu\text{m}$.

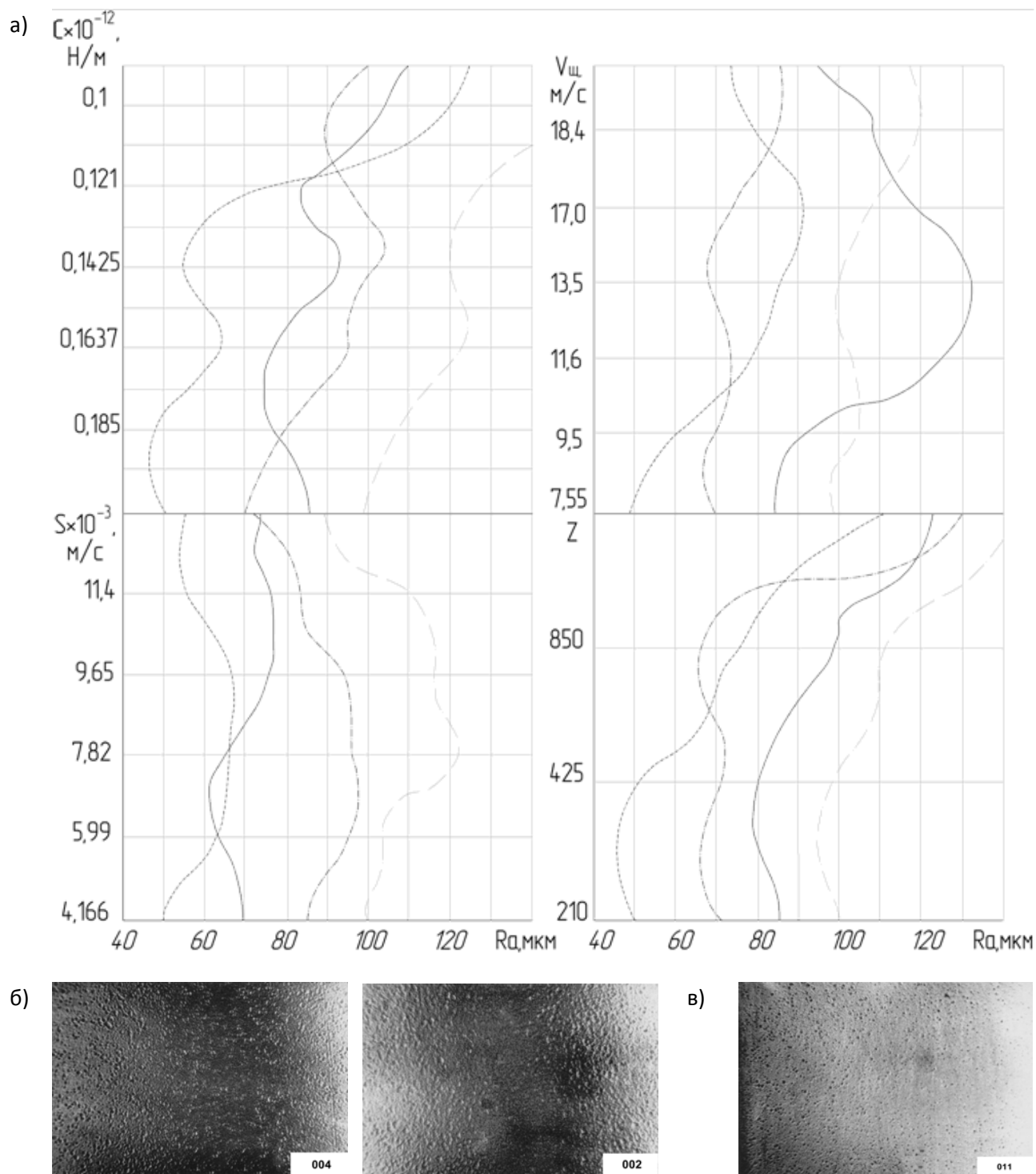


Рис. 5.11. Вплив технологічних режимів на показники шорсткості R_a при взаємодії контактуючих елементів (а) за умови початкового значення поверхні основного металу: 1) $R_a=50$ мкм; 2) $R_a=70$ мкм; 3) $R_a=85$ мкм; 4) $R_a=100$ мкм; зображення поверхні після обробки шарошками (б) та вид цієї поверхні після остаточної механічної обробки ДСЦ (в).

Показники степенів та коефіцієнти залежностей впливу технологічних параметрів процесу обробки
та геометричних характеристик елементів інструментів на шорсткість поверхні Ra

Таблиця 5.1

Матеріал	$a_{1(2)}^{(')}$	$V_{ш1(2)}^{(')}$	$S_{1(2)}^{(')}$	$B_{1(2)}^{(')}$	$d_{1(2)}^{(')}$	$C_{1(2)}^{(')}$	$l_{1(2)}^{(')}$	$Z_{01(2)}^{(')}$	$V_{ш1(2)}^{(')}$
Гнучкі робочі елементи очисного механізму інструменту									
Сталь:									
09Г2Д	$2,0 \cdot 10^6$	-0,4812	-0,0614	0,5696	0,4120	$-(1,662-0,386 \ln l)$	-0,7451	-	-
09Г2С	$8,23 \cdot 10^5$	-0,2714	-0,4288	0,8221	0,5704	$-(1,208-0,281 \ln l)$	-0,6234	-	-
10Г2С18	$6,12 \cdot 10^5$	-0,7714	-0,8250	0,1229	0,6993	$-(1,404-0,508 \ln l)$	-0,5508	-	-
Робочі елементи руйнівних шарошок									
Сталь:									
09Г2Д	$1,17 \cdot 10^4$	-	-0,7449	-	-	-	-	0,8990	0,2207
09Г2С	$2,29 \cdot 10^3$	-	-0,5067	-	-	-	-	0,8794	0,5133
10Г2С18	$0,963 \cdot 10^3$	-	-0,6334	-	-	-	-	0,7241	0,6018

Показники степенів та коефіцієнти залежностей впливу технологічних параметрів процесу обробки

та геометричних характеристик елементів інструментів на внутрішні залишкові напруження поверхневого шару σ .

Таблиця 5.2

Матеріал	$b_{1(2)}^{(')}$	$V_{ш1(2)}^{(')}$	$S_{1(2)}^{(')}$	$B_{1(2)}^{(')}$	$d_{1(2)}^{(')}$	$C_{1(2)}^{(')}$	$l_{1(2)}^{(')}$	$Z_{01(2)}^{(')}$	$V_{ш1(2)}^{(')}$
Гнучкі робочі елементи очисного механізму інструменту									
Сталь:									
09Г2Д	1,5824	0,2308	0,1792	1,442	0,5687	$(3,15-0,6461 \ln l)$	-0,082	0,3096	0,0339
09Г2С	1,4347	0,6382	0,1608	1,627	0,6208	$(2,74-0,4921 \ln l)$	-0,1044	0,3608	0,071
10Г2С18	1,2919	0,1555	0,8250	1,694	0,6913	$(2,13-0,4261 \ln l)$	-0,1307	0,3875	0,094
Робочі елементи руйнівних шарошок									
Сталь:									
09Г2Д	0,1433	0,6192	0,4808	-	-	0,083	-	0,3516	0,6567
09Г2С	0,1818	0,8316	0,643	-	-	0,1386	-	0,4808	0,709
10Г2С18	0,2054	0,9407	0,7094	-	-	0,2112	-	0,5395	0,8947

Значення показників степені та постійних коефіцієнтів наведені у таблицях 5.1 та 5.2. Степені факторних впливів на показник шорсткості R_a технологічних параметрів процесу обробки наведені на рис. 5.7. ... 5.11.

Аналіз отриманих результатів показав, що показники шорсткості металу марки 09Г2Д внутрішньої поверхні цистерни зростають із збільшенням величини зусилля удару комплексу шарошок (рис. 5.7). Це можна пояснити тим, що із зростанням даного зусилля збільшується глибина проникнення робочих шипів шарошок у поверхневий шар металу і наступний, згідно техпроцесу, етап якісного формування мікропрофілю поверхні торцевим інструментом із евольвентно набраними гнучкими робочими елементами вже нездатний завалюю вати утворені впадини.

Аналогічна ситуація складається і у випадках обробки матеріалу котла цистерн із сталей марок 09Г2С та 10Г2С18 (рис. 5.8 та 5.10).

На рис. 5.9 наведені показники утвореної шорсткості поверхні металу в залежності від швидкості подачі робочого інструменту відносно поверхні застиглих залишків та товщини даного утвореного накопиченого шару. Згідно експериментальних досліджень, отримані результати формування шорсткості поверхневого шару металу вказують на те, що дані показники погіршуються із зростанням подачі та товщиною застиглого накопичення.

Суттєві зміни в якісному формуванні мікропрофілю поверхні металу спостерігаються при збільшенні кількості Z шарошок у комплексі інструменту обробки (рис. 5.11), швидкості $V_{\text{ш}}$ обертання торцевого інструменту із евольвентно набраними гнучкими робочими елементами та кількості його набраних секцій B . Збільшення показників наведених факторів технологічного процесу у будь-якому випадку спричиняє погіршенню показників шорсткості поверхні металу.

5.2. Встановлення степені внутрішніх залишкових напружень

Технологічний процес руйнування та видалення застиглих залишків речовин і остаточного якісного формування поверхні металу внутрішньої порожнини вагона-цистерни методом поєднування динамічних ударів робочих елементів шарошок і одночасним контактуванням гнучких робочих елементів комбінованого інструменту

супроводжується виникненням температурних полів у поверхневих шарах металу. Такий термомеханічний вплив на поверхню металу викликає виникнення внутрішніх поверхневих залишкових напружень, характер і розподілення яких в деталях однотипної геометричної форми, як у даному випадку циліндричної досліджені і наведені у роботі [1]. У даній роботі робиться спроба привести загальне рішення задач з встановлення рівня концентрації поверхневих внутрішніх напружень не лише для сферичних поверхонь, а і для можливих виїмок і впадин прямокутної і клиновидної форми, застосовуючи інтегральні рівняння і підтвердивши теоретичні викладки числовими результатами.

В теорії концентрації напружень розтягнення півплощини з розташованими на ній виїмками, виступами або іншими змінами суцільності місцевого рельєфу розглядається як гранична задача для плоских стержнів і валів при збільшенні відношення поперечного розміру деталі до розмірів концентратора [2]. Для рішення поставленої задачі пропонується застосовувати спеціально складені інтегральні рівняння Фредгольма другого роду, у яких невідомими є безпосередньо напруження, що накопичуються біля поверхні матеріалу. Такий підхід до вирішення задачі дозволяє позбутися втрат точності при числовому диференціюванні.

Наведені рівняння отримані згідно загальної теорії в комплексних змінних. Далі приводиться виведення рівнянь у дійсних змінних. Як проміжний результат застосовується рівність інтегралів по контуру кінцевої області

$$\oint \left(\sigma \frac{\partial \omega}{\partial n} + \bar{\sigma} \frac{\partial \omega}{\partial s} \right) ds = \oint \left(p_x \frac{\partial \Phi}{\partial y} + p_y \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) ds, \quad (5.2.1)$$

де σ – сума нормальних напружень (інваріант тензора напружень);

$\bar{\sigma}$ – спряжена із сумою σ гармонійна функція;

p_x, p_y – складові зовнішнього навантаження, розподілені по осям X та Y ; n, s – напрями, відповідно, по зовнішній нормалі та по дотичній до контуру;

ω і Φ – функції у межах області, що задовольняють наступні умови

$$\Delta \Phi = 0; \quad \Delta \omega = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}, \quad (5.2.2)$$

де Δ – оператор Лапласа.

Для переходу до рівняння Фредгольма [3] застосовуємо наступні пари функцій, які задовольняють умову (5.2.2):

$$\Phi_1 = \gamma; \quad \omega_1 = 0,25 \cos 2\gamma; \quad (5.2.3)$$

$$\Phi_2 = \ln \rho; \quad \omega_2 = 0,25 \sin 2\gamma + 0,5\gamma.$$

де γ і ρ – полярний кут та радіус.

Вісь X співпадає із зовнішньою нормаллю до контуру, а початок координат розміщений поза контуром з наступним поступовим її переходом до точки на контурі. Наведені функції (3) при граничному переході мають такі ж властивості, що й інтеграл (1) у межах гранично малої ділянки контуру Δs та зберігають своє кінцеве значення:

$$\lim_{\Delta s} \int \frac{\partial \omega_1}{\partial n} ds = \lim_{\Delta s} \int \frac{\partial \omega_2}{\partial s} ds = -\frac{\pi}{2}; \quad (5.2.4)$$

$$\lim_{\Delta s} \int \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} ds = \lim_{\Delta s} \int \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} ds = -\pi.$$

Внаслідок таких визначень, для кінцевої області буде властивою наступна система інтегральних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_k - \frac{2}{\pi} \oint \frac{\cos \gamma \cdot \sin \gamma}{\rho} (\sigma \cdot \sin \alpha - \bar{\sigma} \cdot \cos \alpha) ds &= 2p_{xk} - \frac{2}{\pi} \oint \left(p_x \frac{\cos \gamma}{\rho} - p_y \frac{\sin \gamma}{\rho} \right) ds; \\ \bar{\sigma}_k + \frac{2}{\pi} \oint \frac{\cos^2 \gamma}{\rho} (\sigma \cdot \sin \alpha - \bar{\sigma} \cdot \cos \alpha) ds &= 2p_{yk} - \frac{2}{\pi} \oint \left(p_x \frac{\sin \gamma}{\rho} + p_y \frac{\cos \gamma}{\rho} \right) ds, \end{aligned} \right\} \quad (5.2.5)$$

де α – кут між нормаллю до контуру і радіусом-вектором;

k – індекс, яким відмічені значення функції у точці K , від якої відраховуються розміри γ і ρ .

При кожному з положень точки K на контурі під p_x та p_y слід розуміти як складові сили зовнішнього навантаження вздовж і поперек зовнішньої нормалі у точці K . Система координат XOY зв'язана з точкою K і зовнішньою нормаллю у цій точці.

З метою надання даній теоретичній викладці зрозумілішої форми і можливості відображення напрямів дії сил зовнішнього впливу та нормалей, впадина показана у

плані на рис.5.12 зображена у вигляді довільної овальної фігури, а не традиційно прийнятої круглої або прямокутної форми, що є наслідком механічної обробки металорізальним інструментом.

Далі виконується перехід до напівнескінченої області – півплощини з певним місцевим рельєфом, який розтягується напруженням p (рис. 5.13). Для цього описується півколо достатньо великого радіуса, прикладається зовнішнє навантаження p , яке розкладається на складові $p_x = p \cdot \sin(\beta_k + \gamma) \cdot \sin\beta_k$ та $p_y = p \cdot \sin(\beta_k + \gamma) \cdot \cos\beta_k$, які у свою чергу є еквівалентними напруженням розтягу при переході до вертикальних площинок, і розраховуються інтеграли у правій частині рівнянь (5.2.5). У лівій частині наведених рівнянь достатньо замінити інтегрування по замкненому контуру на інтегрування по розімкненій границі області (на півколі $\alpha=0$, а функція $\bar{\sigma}$ визначена з точністю до константи і у нескінченності прагне до 0).

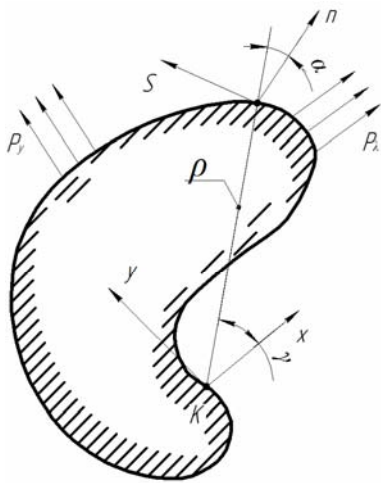


Рис. 5.12. Схема сил зовнішнього впливу.

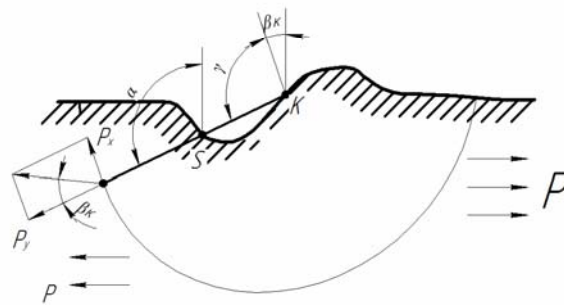


Рис. 5.13. Півплощина з рельєфом який розтягується напруженням p .

Рівняння для випадку розтягу півплощини з місцевим рельєфом у формі впадини матиме наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_k &= -\frac{2}{\pi} \int_r \frac{\cos \gamma \cdot \sin \gamma}{\rho} (\sigma \cdot \sin \alpha - \bar{\sigma} \cdot \cos \alpha) ds = p \cdot \cos 2\beta_k; \\ \bar{\sigma}_k &+ \frac{2}{\pi} \int_r \frac{\cos^2 \gamma}{\rho} (\sigma \cdot \sin \alpha - \bar{\sigma} \cdot \cos \alpha) ds = -p \cdot \sin 2\beta_k. \end{aligned} \right\} \quad (5.2.6)$$

Отримані функції σ та $\bar{\sigma}$ є шуканими, де перша з них є напруженням біля поверхні (у загальному випадку – сума нормальних напружень), а друга виражає нормальну похідну суми головних напружень

$$\frac{\partial}{\partial n}(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial s}. \quad (5.2.7)$$

Величини ρ , γ та α визначаються точками K і S і нормальми у цих точках. При даному положенні точки K (див. рис. 5.13) точка S переміщується по всій нескінченній контурній кривій в якості змінної інтегрування. Значення шуканих функцій в точці K позначені через σ_k та $\bar{\sigma}_k$. У правих частинах рівнянь (5.2.6): p – напруження, що розтягує півплощину; β_k – кут нахилу нормалі у точці K .

Розв’язування наведених рівнянь (5.2.6) здійснювалось шляхом заміни інтегралів сумами, що приводить задачу до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Застосовувалась квадратурна формула Гауса [4] з п’яти ординатами, що застосовуються на кожній ділянці контуру, незалежно від його форми – прямого відрізка чи дуги кривої. Напівнескінчена ділянка попередньо перетворюється у кінцеву за допомогою підстановки $s=(l/t)$, після чого застосовується формула Гауса. У випадках, коли визначення величини внутрішніх напружень у місцях їх концентрації не вимагає високої точності, рекомендується застосовувати простіші для розрахунків формули Ньютона-Коутса [4].

У процесі проведення експериментальних досліджень розглядалися виїмки прямокутного і клиновидного перерізу. Зовнішні кромки впадин заокруглювались з радіусом, що відповідав 0,05 радіуса внутрішніх кутів, які в свою чергу отримані у результаті механічного різання металорізальним інструментом. Результати досліджень представлені у вигляді теоретичних коефіцієнтів концентрації

напружень $\alpha_\sigma = (\sigma_{\max} / p)$ і добутків $(r \cdot \bar{G})$, де r – радіус заокруглення концентратора; $\bar{G}$ – відносний градієнт першого головного напруження $\left(\bar{G} = \frac{1}{\sigma_{\max}} \frac{\partial \sigma_1}{\partial n} \right)$.

Теоретична методика визначення величин залишкових напружень підтверджена результатами експериментів, проведених за розробленою моделлю впливу технологічних параметрів процесу, наведеної у вигляді адекватних степеневих виразів, розроблених для кожного з способів обробки.

В основну задачу дослідів входило встановлення оптимальних технологічних режимів та конструкцій інструментів при яких отримуються найбільш сприятливі в експлуатаційному відношенні залишкові напруження.

5.2.1. Експериментальне встановлення внутрішніх залишкових напружень

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу обробки на показники внутрішніх залишкових напружень матеріалу внутрішньої поверхні котла цистерни проводилось для різних марок сталей даного виду вантажних засобів залізничного транспорту, згідно основи теорії планування багатofакторних експериментів. Методика проведення експериментальних досліджень, інструмент, дослідні зразки та фактори процесу обробки наведені у розділі 3. Математична обробка результатів дозволила скласти наступну емпіричну залежність

$$\sigma = b_{1(2)}^{(')} \cdot V_{\text{ш1(2)}}^{(')} \cdot S_{1(2)}^{(')} \cdot B_{1(2)}^{(')} \cdot d_{1(2)}^{(')} \cdot C_{1(2)}^{(')} \cdot l_{1(2)}^{(')} \cdot Z_{01(2)}^{(')} \cdot V_{\text{ш1(2)}}^{(')} \quad (5.2.8)$$

де індексам 1 і 2 відповідають встановлені значення σ для гнучких робочих елементів очищувального органу інструменту та робочих елементів руйнівних шарошок, а індекси (') та (``) вказують на показник показники внутрішніх залишкових напружень матеріалу при поздовжньому та поперечному замірі поверхні оброблення.

В режимі оброблення, коли одночасно на поверхню металу цистерни впливають всі робочі секції інструменту, величина їх впливу супроводжується зменшенням товщини шару залягання та значенням стискуючих внутрішніх напружень. Так,

наприклад, у зразку із сталі 09Г2Д із границею текучості матеріалу $\sigma_T=245$ МПа (рис.5.14), максимальна величина напружень ($\sigma_x=210$ МПа) не досягає межі текучості металу, а це означає, що при нагріванні металу у процесі обробки в ньому відбуваються лише пружні деформації і після повного охолодження зразка залишкові напруження в поверхневих шарах відсутні. З поступовим підвищенням швидкості обертання інструменту зростають відповідно і зусилля динамічного впливу, що супроводжується підвищенням температури поверхневого шару металу. За умови незмінності решти факторів технологічних режимів процесу оброблення, внутрішнє напруження розтягу досягає свого максимального значення – $\sigma_x=960$ МПа, а напруження стиску становитиме $\sigma_x=610$ МПа, переходячи у залишкове (на глибині $l=1,2$ мм – $\sigma_x=440$ МПа).

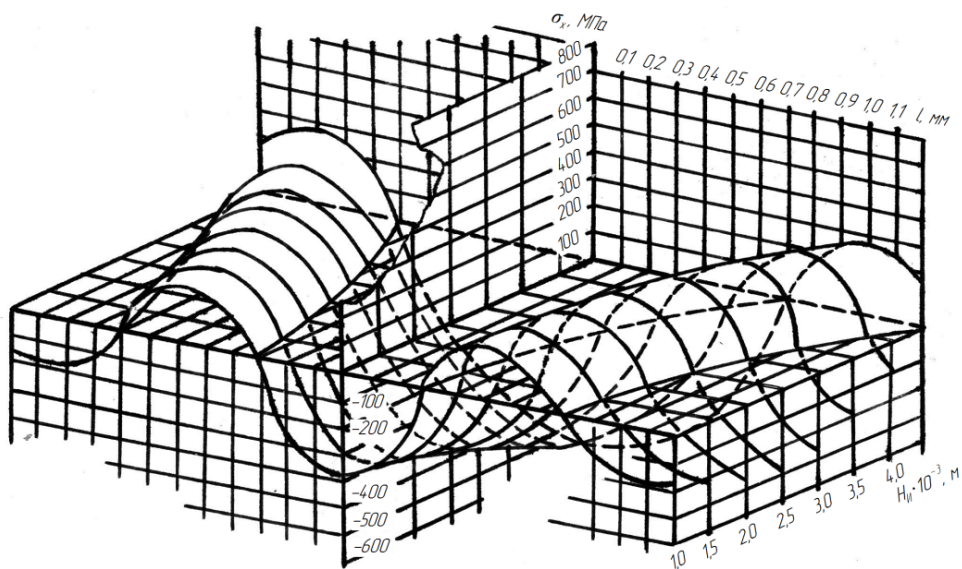


Рис. 5.14. Залежність внутрішніх напружень від вільного вильоту ГРЕ

Таке явище пояснюється тим, що зростання температури нагрівання матеріалу зразка робить його більш пластичним і сприяє витягуванню зерен поверхневого шару в напрямі дії сил тертя процесу контактування робочих елементів інструменту.

При зростанні подачі (S) інструменту (рис.5.15) напруження стискування та їх залишкові величини в зразку із сталі 09Г2С ($\sigma_T=353$ МПа) зменшуються з 270 МПа до 95 МПа за наступних факторів процесу: $V_{ш}=16,42$ м/с; $H_n=1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $B=4,5 \cdot 10^{-2}$ м; $l=5,0 \cdot 10^2$ м; $Z=210$ хв $^{-1}$. Такі зміни значень напружень пояснюються послідовним зменшенням тривалості впливу теплового джерела на поверхню, що в свою черг не

сприяє утворенню значних за величиною стискуючих внутрішніх напружень.

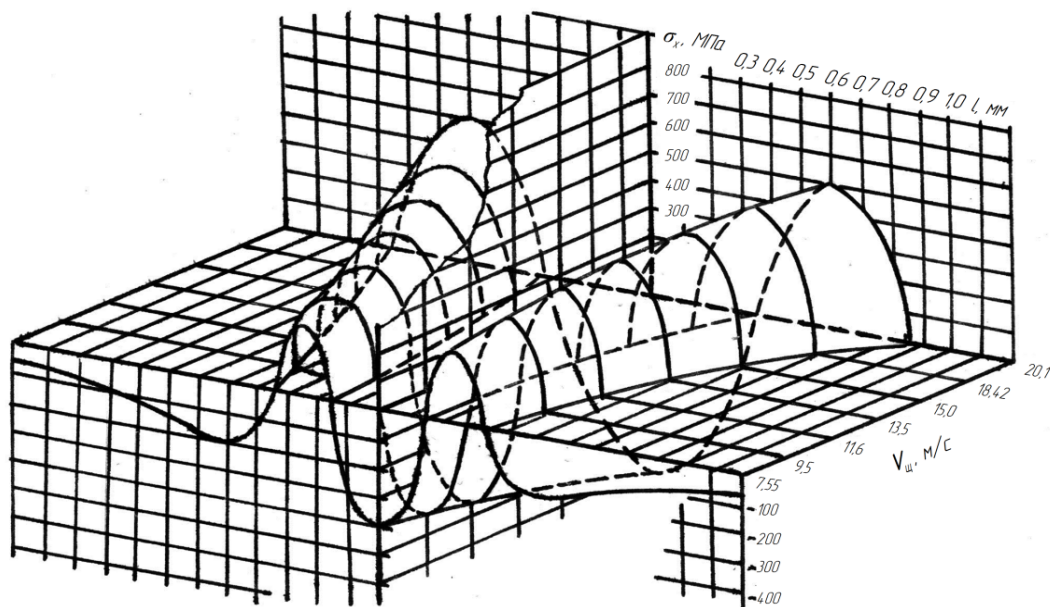


Рис. 5.15. Залежність внутрішніх напружень від швидкості обертання інструменту

Збільшення частоти ударів робочих елементів шарошок інструменту (рис.5.16) позитивно впливає на зростання глибини залягання (h) в матеріалі зразка з сталі 09Г2С ($\sigma_T=786$ МПа) значень як розтягуючих (при $V_{ш}=9,5$ м/с; $S=9,65 \cdot 10^{-3}$ м/с; $B=6,0 \cdot 10^{-2}$ м; $l=6,5 \cdot 10^{-2}$ м; $H_H=2,0 \cdot 10^{-3}$ м) з 320 МПа до 1110 МПа, стискуючих (з 560 МПа до 940 МПа) так і залишкових стискуючих (від 0 до 230 МПа) внутрішніх напружень, що пояснюється зростанням частоти контактування даних елементів з поверхнею та інтенсивністю теплового впливу.

Аналізуючи в загальному даний етап процесу поверхневої обробки, тобто, коли одночасно на поверхню металу цистерни впливають всі робочі секції інструменту, слід зауважити, що тепловий вплив сприяє в більшості випадків до утворення домінуючих внутрішніх напружень розтягу.

Дослідження етапу поверхневого оброблення лише механічним контактуванням секцій з гнучкими робочими елементами показало, що за умови будь-яких збільшень показників технологічних режимів процесу та змін в конструкції інструменту відбувається зростання величин залишкових напружень стискування (для сталі 10Г2С18 – з 0 до 185 МПа; для сталі 09Г2С – з 110 до 320 МПа; для сталі 09Г2Д – з 145 до 275 МПа), хоча (у порівнянні з попереднім способом взаємодії

елементів з поверхнею) й на значно меншу глибину – з 0,08 до 0,32 мм. Такому позитивному впливові на утворення стискуючих залишкових напружень не сприяє лише збільшення величини вільного вильоту дротинки, із зростанням якої збільшується еластичність кожного елемента і, відповідно, зменшується зусилля динамічної дії на поверхню обробки. Розтягуючі напруження при такому способу взаємного контактування виникають на незначній глибині – (0,04...0,15) мм і компенсуються напруженнями стиску.

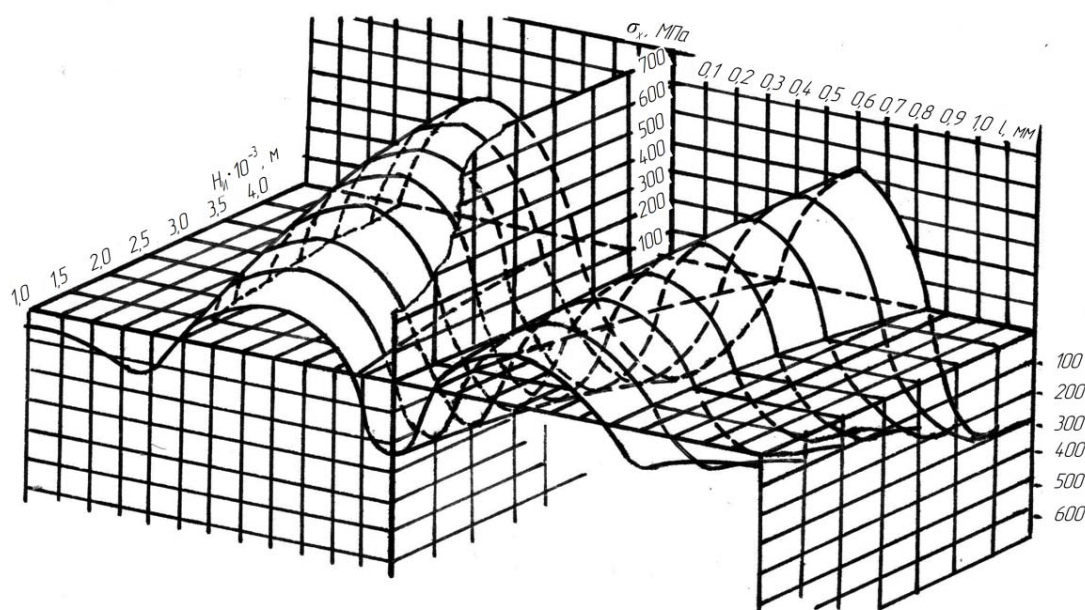


Рис. 5.16. Залежність внутрішніх напружень від частоти контактування елементів шарошок

Результати експериментальних досліджень, які проведені на етапі комбінованої термомеханічної обробки, графічно відображені на епюрі (рис.5.16), що дозволяє візуально встановити фактичну компенсацію внутрішніх напружень розтягу, утворених внаслідок теплового фактору, стискуючими від динамічної дії робочих елементів інструменту, і які частково фіксуються у вигляді залишкових напружень стиснення, так необхідних деталям, що працюють із значним динамічним навантаженням, що є характерним при експлуатації завантажених вагонів-цистерн.

Порівнювання результатів концентрації напружень згідно наведеної теоретичної викладки та експериментального визначення становив розбіжність

менше 5%. Результати теоретичних досліджень повністю узгоджуються з результатами експериментальних замірів, що дає ґрунтовну підставу для впровадження практичних рекомендацій в умовах призначення раціональної послідовності обробки виробів із застосуванням даних методів та керування напружено-деформованим станом поверхневого шару матеріалу котла цистерни.

У практиці застосовування технологічних операцій очищення інструментом з гнучкими робочими елементами поверхні, наприклад залізничних цистерн, представлена методика розрахунку дозволяє попередньо скласти довідникові дані з концентраторів напружень у місцях виїмок і впадин як на поверхні котла цистерни, так і деталях робочих вузлів, що виконують технологічне і експлуатаційне призначення.

5.3. Висновки до розділу 5.

На основі розробленої математичної моделі, яка полягає у визначенні зв'язків між вхідними та вихідними даними за допомогою математичних співвідношень з урахуванням існуючих обмежень на вхідні, проміжні та вихідні дані, одиниці їх виміру та діапазони змін, сформовані алгоритми розв'язу задач прогнозування основних якісних показників процесів очисної обробки, на основі чого було розроблена стадія підготовки технологічних процесів ремонтного виробництва вантажних залізничних вагонів.

Розроблена методика прогнозування оптимальних показників шорсткості поверхні, необхідних для ефективної експлуатації та надійного зчеплення з шарами антикорозійного покриття металу внутрішніх порожнин котлів вагонів-цистерн в залежності від вихідного стану поверхні оброблення та її фізико-механічних характеристик, що дозволяє встановлювати оптимальні та енергозощаджуючі технологічні режими процесу руйнування та видалення швидкотверднучих вантажів, транспортованих засобами залізничного транспорту.

Розроблена модель процесу поверхневої обробки дозволяє прогнозувати якісні показники шорсткості поверхні шляхом досліджень у вигляді поліному другої степені згідно теорії планування багатофакторних експериментів, приведені основні

фактори технологічних процесів та обґрунтовані рівні їх варіювання.

Результатами досліджень визначена залежність отриманої у процесі обробки шорсткості поверхневого шару від напрямів взаємного контакту елементів з поверхнею (зустрічна або попутна обробки), напрями взаємодії яких сприяють як для якісної обробки (у випадку зустрічного контактування), так і лише для процесу поверхневого очищення та підготовки поверхні для нанесення шару захисного антикорозійного покриття (попутне оброблення).

Розроблена методика прогнозування впливу технологічних параметрів процесів очисної обробки конструкцій, вузлів і деталей вантажних засобів залізничного транспорту на формування внутрішніх залишкових напружень поверхні.

Теоретично досліджено і експериментально підтверджено, що величину і характер утворених внутрішніх залишкових напружень слід розглядати як комплекс напружень викликаних температурним впливом, що виникає внаслідок як комплексного процесу обробки (робочі елементи шарошок – набір секцій гнучких робочих елементів), процесом охолодження даного матеріалу та динамічним деформуванням його поверхневих шарів. Комплексні дослідження якості поверхні дозволили встановити взаємозв'язок технологічних факторів обробки з величиною залишкових напружень.

Різні способи взаємного контактування секцій інструменту з внутрішньою поверхнею вагону-цистерни показали, що від динамічного впливу ударів та нагріванням тертям у поверхневих шарах металу виникають в більшості значні внутрішні напруження розтягу. Так, наприклад, в сталі 09Г2Д з границею текучості $\sigma_T=245$ МПа, виникли тимчасові напруження розтягу величиною в $\sigma_X=960$ МПа з глибиною поширення до $0,8 \cdot 10^{-3}$ м, а в Сталі 09Г2С ($\sigma_T=353$ МПа) – $\sigma_X=670$ МПа на глибині до $0,6 \cdot 10^{-3}$ м. В свою чергу, процес обробки поверхні лише механічною взаємодією супроводжується утворенням залишкових напружень стиску (для Сталі 09Г2Д – до $\sigma_X=185$ МПа на глибині в $0,15 \cdot 10^{-3}$ м; для Сталі 09Г2С – $\sigma_X=320$ МПа на товщині шару в $0,28 \cdot 10^{-3}$ м; для Сталі 10Г2С18 – до $\sigma_X=275$ МПа на глибині в

$0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

Поєднування у процесі обробки двох наведених способів впливу на поверхню приводить до кінцевого суміщення величин розтягуючих і стискуючих внутрішніх напружень, які компенсуючи одні одних, приводять до виникнення позитивних стискуючих внутрішніх залишкових напружень, що підтверджується наведеною математичною моделлю, адекватною результатам експериментів.

Розроблена принципова схема і математична модель одержання даним техпроцесом внутрішніх напружень стиску, що підтверджено дослідями, і дозволяє розробити рекомендації із забезпечення енергетичної рівноваги залишкових напружень з наданням певних властивостей даному матеріалу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі на основі виконаних досліджень розв'язано важливу науково-технічну задачу удосконалення технології очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн при підготовці їх до ремонту. Отримані результати в сукупності мають суттєве значення для вагонного господарства залізничного транспорту України. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають в наступному:

1. На основі проведеного аналізу вітчизняних і зарубіжних технологічних процесів проведення підготовчих робіт виявилось, що в основному очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн ґрунтується на роботах, які проводяться на промивально-пропарювальних станціях вагоноремонтних депо із застосуванням ручної праці та теплового впливу води і пару, що суттєво обмежує можливості широкого, швидкого, якісного, а головне – ефективного проведення даних видів робіт. Крім того виявлено, що у більшості випадках при проведенні ремонтних робіт на етапах технічної підготовки вантажних вагонів задіяна значна кількість робітників і практично відсутні засоби механізації.

2. Детально досліджені характер та особливості кристалізованої застиглої маси, що залишається у порожнинах котлів цистерн після їх розвантаження, складності руйнування їх монолітності та порушення зчеплення із металом внутрішньої поверхні даного виду транспорту. Для чого була розроблена математична модель руйнівного та якісного очищення внутрішньої поверхні котла вагона-цистерни, яка ґрунтується на методах визначення умов руйнування, коли гранична величина енергії формозмінення є постійною при всіх комбінаціях напружень σ_x , σ_y та σ_z , для того необхідно мати шість пружних констант і одне значення границі міцності при простому розтягу, яке дозволяє визначити величину граничної енергії. Досліджена динамічна модель, яка враховує суттєво нелінійний характер процесу контактної взаємодії робочих елементів інструменту із поверхнею застиглих залишків речовин. Дослідження представлені двома методами, якими показано, що при певних значеннях параметрів системи можна отримати її переміщення із періодом, який є кратним періоду вимушеного чого зусилля удару.

Теоретично досліджена стійкість «простих» несинхронних усталених рішень та визначаються границі усталеності у просторі параметрів.

3. Розроблена технологія та комплекс механізмів та інструментів, що сприяє ефективному руйнуванню монолітності шару залишків застиглої речовини. Конструкція руйнівно-очищувального механізму, який обертається, являє собою суміщений комплекс, що складається із шарошок і торцевих інструментів із набором гнучких робочих елементів. Принцип установки та закріплення на консольній штанзі механізму ґрунтується по схемі, як модель механізму з гнучких тіл, які обертаються.

4. Розроблені загальні технічні вимоги ефективних технологічних режимів механічного руйнування та видалення із внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн залишків застиглих транспортovаних речовин, на основі чого було розроблена стадія підготовки технологічних процесів ремонтного виробництва вантажних залізничних вагонів.

5. Удосконалено методику прогнозування впливу технологічних параметрів процесів очищувальної обробки внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн на формування внутрішніх залишкових напружень даної поверхні. Теоретично досліджено і експериментально підтверджено, що величину і характер утворених внутрішніх залишкових напружень слід розглядати як комплекс напружень викликаних температурним впливом, що виникає внаслідок як комплексного процесу обробки (робочі елементи шарошок – набір секцій гнучких робочих елементів), процесом охолодження даного матеріалу та динамічним деформуванням його поверхневих шарів. Різні способи взаємного контактування секцій інструменту з поверхнею виробу показали, що від динамічного впливу ударів та нагрівання тертям у поверхневих шарах металу виникають значні внутрішні напруження розтягу. Так, наприклад, в Сталі 09Г2Д з границею текучості $\sigma_T = 245$ МПа, виникли тимчасові напруження розтягу величиною в $\sigma_X = 960$ МПа з глибиною поширення до $0,8 \cdot 10^{-3}$ м, а в Сталі 09Г2С ($\sigma_T = 353$ МПа) – $\sigma_X = 670$ МПа на глибині до $0,6 \cdot 10^{-3}$ м. В свою чергу, процес обробки поверхні лише механічною взаємодією

супроводжується утворенням залишкових напружень стиску (для Сталі 09Г2Д – до $\sigma_x=185$ МПа на глибині в $0,15 \cdot 10^{-3}$ м; для Сталі 09Г2С – $\sigma_x=320$ МПа на товщині шару в $0,28 \cdot 10^{-3}$ м; для Сталі 10Г2С18 – до $\sigma_x=275$ МПа на глибині в $0,2 \cdot 10^{-3}$ м).

6. Аналіз отриманих результатів показав, що показники шорсткості металу марки 09Г2Д внутрішньої поверхні цистерни зростають із збільшенням величини зусилля удару комплексу шарошок. Це можна пояснити тим, що із зростанням даного зусилля збільшується глибина проникнення робочих шипів шарошок у поверхневий шар металу і наступний, згідно технологічного процесу, етап якісного формування мікропрофілю поверхні торцевим інструментом із евольвентно набраними гнучкими робочими елементами вже нездатний завалюювати утворені впадини.

7. При аналізі роботи існуючого та запропонованого методу очистки цистерн можна констатувати про економічну доцільність та ефективність запропонованого механізму. Ефективність від запровадження нового методу очистки доводить про значну економію матеріальних засобів, чистий дохід за рік склав 401841,6 грн.

8. Розроблені практичні рекомендації із забезпеченням ефективності технології очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн перед постановкою їх в ремонт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1.Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов / Фесик С.П. – 2-е изд. – Київ: Будівельник, 1982. – 280 с.
- 2.Куліченко А.Я. Термомеханічна поверхнева очисно-зміцнююча обробка металу. – Львів: «Кобзар», 1997. – 216 с.
- 3.Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
- 4.Jchuson A.W., Sallberg J.R. Factors That Influence Field Compaction of Soils. Highway Research Board Bulletin 272, – Washington, D. C., 1987.
- 5.Forsssblad L. Investigation of Soil Compaction by Vibration. ASTA Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Const. Series 34, – Stockholm, 1995.
- 6.Волков Г.А., Разрушение сплошных сред при высокочастотном вибрационном воздействии // Акустический журнал, 2007, том 53, № 2, С. 149-152.
- 7.Lauterborn W., Kurz T., Geisler R., Schanz D., Lindau O., Acoustic cavitation, bubble dynamics and sonoluminescence, Ultrasonic Sonochemistry (2007), vol. 14, pp. 484-491.
- 8.Sato E., Sun X.W., Odagava M. et al., An investigation on the behavior of laser induced in cryogenic liquid nitrogen // Journal of Fluids Engineering-Transactions of the 118 (4); 850, 1996.
- 9.Лесин А.Д., Вибрационное измельчение материалов. Элементы теории и методика расчета основных параметров виброуплотнителей / Под.ред. Л.И. Белкина. – М.: Машиностроение, 1987. – 114 с.
10. Седов Л.И., Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1973. – Т. 2.
11. Трефилов В.И., Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1987. – 248 с.
- 12.Бабичев А.П., Вибрационная обработка деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
13. Бабичев А.П., Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательство центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
14. Childs Dara W., «Dynamics inengineering practice», EMRL TR-1032. The University of Texas, Austin, – Texas, Dec. 2013
15. Childs Dara W., «Simulation Models for Flexible Bodies», Simulation, June 1989.
16. Ликинз «Метод расчета свободного вращения механизма, рассматриваемого в

виде податливой системы», Ракетная техника и космонавтика, № 7, 1967. – С. 111.

17. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. – М.: Наука, 1980. – 974 с.

18. Волощенко-Климовицкий Ю.Я. Динамический предел текучести. – М.: Наука, 1965. – 179 с.

19. Кильчевский Н.А., Логинова А.О. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. – Киев: Наукова думка, 1976. – 315 с.

20. Демкин Н.Б., Рыжев Ж.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

21. Гольдсмит В. Удар, теория и физические свойства соударяющихся тел. – М.: Стройиздат, 1965. – 448 с.

22. Мілянйч А. Р. Параметри гідроабразивної обробки великогабаритних циліндричних резервуарів / Джус В.С., Куліченко А.Я., Лаушник І.П., Мілянйч А. Р. // Науковий вісник НЛТУ, Вип.13.1, – Львів, 2003. с. 121-126.

23. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

24. Черепанов Г.П. О распространении трещин в сплошной среде. /Черепанов Г.П. – М.: Изд-во «Мир», 1979. – 232 с.

25. Борисов В.С., Айвазян С.А. Решение задачи о маломасштабном пластическом течении в вершине трещины / Борисов В.С., Айвазян С.А. – «Теоретические основы инженерных расчетов», № 2, 1986, - 58 с. – М.: Изд-во «Мир».

26. Чжань Лу. Моделирование процесса распространения трещины при динамическом нагружении. «Конструирование и технология машиностроения», № 2, 1983, - 63 с. – М.: Изд-во «Мир».

27. Von Mises R. Mechanik der plastischen Formänderung der Krystallen. Z. Angew. Math. Mech., Vol. 8, 1948, pp. 151 – 185.

28. Chan K. W. The Study of Dynamic Fracture Problems Using Finite Element Method. Ph. D. dissertation, Clarkson College of Technology, – Potsdavi, N. Y., May 1982.

29. Панасюк В.В., Сушинский А.И., Кацов К.Б. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами. / Панасюк В.В., Сушинский А.И., Кацов К.Б. – Киев:

«Наук.думка», 1991. – 172 с.

30. Мизес Р. Механика твердых тел в пластически деформированном состоянии. – В кн.: Теория пластичности. – М.: Изд-во «Иностран. литература», 1958. – С. 48 – 56.

31. Справочник металлиста / Под.общ. ред. П.Н. Орлова, Е.А. Скороходова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 960 с.

32. Справочник по обработке металлов резанием / Абрамов Ф.Н., Матвеев В.В. Отв. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.

33. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Касиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

34. Чернець М. До питання про аналітичну оцінку стійкості озброєння шарошкових доліт / М. Чернець, П. Яремек // Машинознавство. – 2002. – № 39 (63). – С. 38–41.

35. Майстренко А.Л. Прогнозирование износостойкости хрупких материалов по твердости и трещиностойкости / А.Л. Майстренко, С.Н. Дуб // Зав. лаб. – 1991. – № 2 – С. 52–54.

36. Перетолчин И.В. Породоразрушающий инструмент для станковвращательного бурения / И.В. Перетолчин. – Иркутск : Восточно – Сибирское книжное изд-во, 1985.

37. Петрина Ю.Д. Розробка науково-прикладних основ підвищення довговічності бурових доліт шляхом раціонального використання матеріалів: дис. доктора техн. наук: 05.15.07./ Петрина Юрій Дмитрович. – Івано-Франківськ, 1996. – 356 с.

38. Петрина Ю.Д. Теоретичні основи технологічного забезпечення довговічності відповідальних деталей обладнання нафтогазової промисловості / Ю.Д. Петрина, Р.С. Яким, А.В. Швадчак // Машинознавство. – 2008. - № 12 (138). – С. 32-36.

39. Геологический словарь: в 2-х томах. – М.: Недра. / Под ред. К.Н. Пеффенгольца и др./, 1978.

40. Игнатов В.И. Организация и проведение эксперимента в бурении / В.И. Игнатов. – М.: Недра, 1978. – 94 с.

41. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техника, 1975. - 268 с.

42. Дружинин Н.К. Выборочное наблюдение и эксперимент. – М.: Статистика, 1977, 176 с.

43. Мілянйч А. Р. Механізми та інструменти для очищення залізничних цистерн / Мілянйч А. Р. // Залізн. транспорт України. – 2004. - № 6. - с. 61-62

44. Хусу А.П., Виттенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 343 с.
45. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры, характеристика. – Введ. 01. 07. 82. – М.: Изд. стандартов, 1982. – 14 с.
46. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие / Под ред. Р.А.Макарова.– М.: Машиностроение, 1975.– 288 с.
47. Мілянйч А. Р. Визначення максимальної жорсткості при пружному контактуванні між елементами голкофрези і поверхнею застиглого пеку / Мілянйч А. Р. // Науковий вісник НЛТУ, Вип.24.4, – Львів, 2014. с. 358-365
48. Травкин В.С. Породоразрушающий инструмент для вращательного бескернового бурения скважин. – М.: Недра, 1976. – 216 с.
49. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. – Санкт-Петербург: Политехника, 2007. – 425 с.
50. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В., Резание материалов. – М.: Машиностроение, 2007. – 304 с.
51. Борисов Ю.М., Соколов М.М., Электрооборудование подъемно-транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 582 с.
52. Редукторы. Справочное пособие. – Л-д: Машиностроение, 1975. – 216с.
53. Костюков В.А. Вентиляция. – Подольск: Стройиздат, 1962. – 200 с.
54. Калинушкин М.П. Вентиляционные установки. – Киев: Вища школа, 1979. – 286 с.
55. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
56. Lambert R.G. Analysis of Fatigue Under Random Vibration. The Shock and Vibration Bulletin.№ 46, Naval Research Laboratory. – Washington, D.C., Aug. 1996.
57. Lambert R.G. Fracture Mechanics Applied to Step-Stress Fatigue Under Sine/Random Vibration. The Shock and Vibration Bulletin.№ 48, Naval Research Laboratory. – Washington, D.C., Sept. 1997.
58. Lambert R.G. Computation Methods. Technical Report AD A 103211. Defense Technical Information Center, Cameron, Alexandria, Va., Mar. 1989.
59. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966, 193 с.

60. Силин С.С. Метод подобия при резании металла. – М.: Машиностроение, 1979, 153 с.
61. Аврутин Ю.Д. Формирование шероховатости поверхности деталей при шлифовании / Станки и инструмент. 1979, № 7. – С. 21-26.
62. Безъязычный В.Ф. Назначение режимов резания по заданным параметрам качества поверхностного слоя. – Ярославль: Машиностроение, 1978. – 86 с.
63. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 252 с.
64. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняющее-калибрующей и формирующей обработки металла. – М.: Машиностроение, 1981. – 208с.
65. Подэрни Р.Ю. Горные машины для открытых горных работ. В 2-х ч. – М.: МГИ, 1999. – 224 с.
66. Демкин Н.Б., Рыжов Ж.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
67. Симонов В.В. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента / В.В. Симонов, Е.К. Юнин. – М.: Недра, 1977. – 216 с.
68. Милянч А. Р. Определение оптимального заполнения железнодорожных цистерн по критерию напряжения в логистических цепях перевозок / Милянч А. Р. // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт №1(28) 2014, – Беларусь, г.Гомель. с.96-97
69. Блекеттер Д.О., Кристенсен Х.Д. Контактное напряжение между двумерными упругими телами // Труды американского общества инженеров-механиков, Сер. Е, 1966, № 3. – С. 75-82.
70. Гринвуд Д.А., Трип Д.Х. Упругий контакт шероховатых сфер. // Прикладная механика, 1987. Т. 34. № 4. – С. 7-13.
71. Fisher E.P. Power driven brushes // American. Math.– 1991, 105. - № 10. – Р. 42-49.
72. Папшев Д.Д., Кургузов Ю.И. Упрочнение закаленных поверхностей вращающимися металлическими щетками. – Куйбышев: КАИ, 1987. – 138 с.
73. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 3. Инерционные нагрузки. Колебания и ударные нагрузки. Выносливость. / Пономарев С.Д., Бидерман В.М., Лихарев К.К. и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 1118 с.
74. Губенко В.К. Исследование процесса эксплуатации и рекомендации по

усовершенствованию цистерн для серы / В.К. Губенко, Г.С. Ольский, Щ.Н. Карпенко // Рефератив. информ. о закон. НИР в вузах УССР. – К., 1977. – Вып. 18. – С. 35-36.

75. Спирюгова М.А. Организация работы вагоносорочных участков грузовых депо: Учеб. пособие. – Самара: СамИИТ, 1996. - 52 с.

76. Мілянйч А. Р. Зміцнення поверхні деталей транспортних засобів інструментом з гнучкими робочими елементами / Куліченко А.Я., Мілянйч А. Р. // Залізничний транспорт України : науково-практичний журнал. – 2008. - № 3. - с. 29-31

77. Stock R., Lambert M. Douglas. Strategic Logistics Management McGraw-Hill, Irwin, 2001.

78. Бенсон Д., Уайтхед Д. Транспорт и доставка грузов / Пер. с англ. – М.: Транспорт, 1990. 278 с.

79. Резер С.М. Управление транспортом за рубежом. М.: Наука, 1994. -315с.

80. Железнодорожный транспорт. Энциклопедия / Гл. ред. Н.С. Конарев. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 496 с.

81. Вагоны. Проектирование, устройство и методы испытаний. / Под. ред. Л.Д. Кузьмича. – М.: Машиностроение, 1978. – 376 с.

82. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР. Альбом. – М.: «Транспорт», 1989. – 210 с.

83. Губенко В.К. Цистерна для жидкого пека / В.К. Губенко, А.М. Берестовой, С.С. Ткаченко // Пром. Транспорт. – 1975. - № 9. – С. 8-9.

84. Губенко В.К. (и др.) Цистерны. Устройство, эксплуатация, ремонт. Справочное пособие. – М.: «Транспорт», 1990. – 151 с.

85. Мілянйч А. Р. Теорія руйнування ортотропних матеріалів у вигляді залишків застиглого пеку в котлах залізничних цистерн / Куліченко А.Я., Мілянйч А. Р. // Вісник ДНУЗТу. – Д., 2012. - Вип. 41. - с. 64-70

86. Бахтизин Н.Т. Проблемы перевозки нефтепродуктов железнодорожным транспортом // Мсжиуз. сб. научи, трудов «Экономические проблемы нефтегазового комплекса в условиях перехода к рынку». – Уфа: Уф. гос. нефтяной техн. ун-т, 1995. С. 115-120.

87. Бахтизин Н.Т. Вывоз нефтепродуктов с предприятий нефтепереработки железнодорожным транспортом // Матер, научн.-техн. конф. "Проблемы нефтегазового комплекса России". – Уфа: Уф. гос. нефтяной техн. ун-т, 1995. - С. 144.

88. Вест А. Химия твердого тела. Ч. 1,2. – М.: Мир, 1988.
89. Мелихов И. В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. – М.: Бином, 2006. – 309с.
90. Дж. Гопалакришнан, Новые направления в химии твердого тела, 1990, “Наука”, Сибирское отделение.
91. Вредные вещества в промышленности, т. 1 – Органические вещества. Справочник / под ред. Н. В. Лазарева / 7 изд., т. 1, – Л-д: Наука, 1976. – 165 с.
92. Сухоруков И.Ф. Производство и потребление нефтяного кокса. – Челябинск, НИИЭП, 1970. 69 с.
93. Collin G., Zopder M. "Erdolund Kohle Erdgas Petrochem. ver. Brennstoff Chem." 1972, Bd 25, № 6, -S. 305-309.
94. Привалов В.Е., Степаненко М.А. "Кокс и химия", 1976, №9 2, с. 51-55.
95. Степаненко М.А., Брон Я.А., Кулаков Н.К. Производство пекового кокса. – Харьков, Metallurgizdat, 1961. 311 с.
96. Авдеенко М.А., Белогорский В. Д., Богров Г.Н. и др. Конструкционные материалы и изделия на основе углерода. – М., Metallurgiya, 1970.- 64 с.
97. Мілянйч А. Р. Поширення теплових потоків у матеріалі котлів залізничних цистерн/ Джус В.С., Куліченко А.Я., Мілянйч А. Р. // Наукові нотатки. – Луцьк, 2004, № 15. – с. 75-84
98. Мілянйч А. Р. Розрахунок гранично допустимих відхилень параметрів деталей в засобах залізничного транспорту / Куліченко А.Я., Мілянйч А. Р. // Залізничний транспорт України : науково-практичний журнал. – 2009. - № 2. - С. 51-53
99. SchiiferH., WetzelsP. "Gliickauf.-Forschungshefte", 1977, Bd 38, № 3, S. 121-129.
100. Белкина Т.В., Крысин В.Л., Улановекий М.Л. и др. "Вопросы технологии улавливания и переработки продуктов коксования". – М., «Металлургия», 1977, с. 42.
101. Зайцева С.С., Филимонов В.А., Багров Г.Н. "Конструкционные материалы на основе графита". Сб. № 4. – М., "Металлургия", 1969, с. 29-34.
102. Филимонов В.А., Антонова Р.С., Гилязединова В.С., Багров Г.Н. "Конструкционные материалы на основе графита» Сб. № 8. – М., "Металлургия", 1974, с. 10-15.
103. Лапина Н.А., Островский В.С., Аверина М.А. и др. "Кокс и химия", 1975, № 12,

с. 28-32.

104. Schoendoerffe. M. – "Circulaired' Informations Techniques", 1970, № 3, p., 723-727.
105. Кекин Н.А., Белкина Т.В., Палагута Т.С. "Химия твердого топлива", 1975, №2, с. 106-116.
106. Mochida I., Kud K., Takeshita K. et al. – "Fuel", 1974, V 53, № 4, p. 253-257.
107. Цеховольская Д.Н. «Химия твердого топлива», 1970, № 5, с. 125-129.
108. Obercobusch R. "Erdol und Kohle – Erdgas - Petrochem. ver. Brennstoff - Chem.", 1975, Bd 28, № 12, S. 558-562.
109. Конструкционные углеграфитовые материалы в цветной металлургии. Каталог-справочник. – М., «Цветметинформация», 1970. - 72с.
110. Фиалков А.С., Тян Л.С., Фалеева Г.С. "Химия твердого топлива" , 1967, № 2. - с. 108-110.
111. Мессерле П.Б., Бикбулатова Л.А. – «Химия твердого топлива», 1973, № 2. - с. 129-134.
112. Itoh H., Nomura K., Takeya G. - "J.FuelSoc. Jap.", 1974, v. 53, №572.- p.121.
113. Грунвальд В.Р. Технология газовой серы. – М.: Химия, 1992. 272 с.
114. Мілянйч А. Р. Оптимальне призначення допусків на механічну обробку деталей вагонів у процесі ремонтно-відновлювальних робіт / Куліченко А.Я., Лаушник І.П., Мілянйч А.Р. // Залізничний транспорт України – 2010, № 1. - с. 21-23
115. Лапина Н.А., Островский В.С., Стариченко Н.С., Сысков К.И. – «Химия твердого топлива», 1978, № 3, с. 129-134.
116. Лапина Н.А., Островский В.С. "Химия твердого топлива", 1977, № 4. -С. 63.
117. Лапина Н.А., Бутурин Г.М., Аверина М.В. и др. "Химия твердого топлива", 1974, № 5. - с. 92-97.
118. Производство капролактама /Под ред. В.И.Овчинникова и В.Р.Ручинского/ – М.: «Химия», 1977. – 324 с.
119. Современные методы синтеза мономеров для гетероцепных полимеров. Сб. статей/под ред. И. Л. Кнунянца/ – М.: «Химия», 1961. – 168 с.
120. Kemal T. Saracoglu, Ahmet H. Acar, Tamer Kuzucuoglu, SezerYakupoglu White phosphorus burn (англ.) // The Lancet. — 2010. — Т. 376. — № 9734. — С. 68.
121. Патент №44175А. Щітка для очищення металу / Куліченко А.Я., Лаушник

І.П., Мілянйч А. Р. // опублік. 15.01.2002, Бюл. ДП УІПВ № 1/2002.

122. Поверхностно-активные вещества. Справочник, под ред. А. А. Абрамзона, Г. М. Гаевого, Л., 1979 "Журнал всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева", 1980, т. 25, № 5. - с. 573-580.

123. Шейхети Ф.И. Материаловедение химикатов, красителей и моющих средств. – М.: «Химия», 1969. – 324 с.

124. Казакова Л.П. Твердые углеводороды нефти. – М.: Химия, 1986. - 176 с.

125. Гершвальд А.С., Мовчиков И.И., Булахов Д.И. Нефтепродукты: управление погрузочными ресурсами "Ж.д. транспорт" №11, 1999. – с. 40-43.

126. Караваяев И.И. Горская Н.Ф. Механизированная обработка цистерн на промывочно-пропарочных станциях. – М.: Транспорт, 1964. – 164 с.

127. Голубок М.А. Подготовка цистерн под налив нефтепродуктов. – М.: Транспорт, 1960. - 72 с.

128. Комарова Т.А., Моисеев В.И. и др. Модельное изучение процессов остывания вязких жидкостей в ж.д.цистернах. Отчет НИР №168Ф КБСМ – С.-Пб.: 2003.-46с.

129. Патент на изобретение № 2092418. Устройство для разогрева вязких продуктов в емкости / Добрынин В. Е. – М.: Госпатент РФ, 1997. – 6 с.

130. Румянцева З.П. Общее управление организацией. Теория и практика – М: Инфра-М, 2004. - 303 с.

131. Патент на изобретение № 2139209. Способ мойки вагонов-цистерн с металлическим кожухом / Сканска Ой (FI) – М.: Госпатент РФ, 1999. – 5 с.

132. Погрузочно-разгрузочные работы с насыпными грузами./ Под ред. Д.С. Плюхина. – М. Транспорт, 1989. - с. 216-219.

133. Авторское свидетельство № 2435685. Способ мойки наружных поверхностей железнодорожных вагонов-цистерн / Петровский В. М. – М.: Госпатент РФ, 2011.

134. Ширяев С.А., Гудков В.А., Миротин Л.Б. . Погрузочно-разгрузочные средства на железнодорожном транспорте. / Под ред С.А. Ширяева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 848 с.

135. Батищев И.И. Организация и механизация погрузочно-разгрузочных работ на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 1988. – 367 с.

136. Примак Т.О. Економіка підприємства: Навч. посіб. – 2-ге вид. – К.: Вікар, 2002. – 176 с.

137. Номенклатура витрат по основній діяльності підприємств залізничного транспорту України – К.: ВАТ ІКТЛ-Центр, 2000.

138. Збірник "Технологічний процес роботи залізничних станцій з наливу та зливання нафтовантажів і промивально-пропарювальних станцій з очищення та підготовки цистерн для перевезення вантажів", м. Київ, 2005р.

139. Економіка, організація і планування виробництва на залізничному транспорті. Частина 1: Навчальний посібник / Кобець О.В., Пивовар Т.Г., Тимофєєва Г.Т. та ін. – К.: «Дельта», 2008. – 206 с.

140. Коробов М.Я. Фінансово-економічний аналіз діяльності підприємств: Навч. посіб. – 2-ге вид. – К.: Т-во «Знання», КОО, 2001. – 378 с.

141. Бойчик І.М., Харів П.С., Хопчан М.І., Піча Ю.В. Економіка підприємства. Навчальний посібник. – К.: Каравела, 2001.

142. Сенько В. И. Техническое обслуживание вагонов.: учеб.пособие / Сенько В.И., Чернин И.Л., Бичек, И.С. – Гомель: БелГУТ, 2002. - 371с.

143. Герасимов В. С., Скиба И. Ф., Кернич Б. М. Технология вагоностроения и ремонта вагонов: Уч. для вузов— 2-е изд.,— М.: Транспорт, 1988.—381 с.

144. Бугаев В. П. Теоретические основы и пути повышения эффективности организаций ремонта грузовых вагонов: автореф. дис. д-ра техн. наук: МИИТ. – М., 1989. – 46с.

145. Козлов Ю.С., Кузнецов О.К., Тельнов А.Ф. Очистка изделий в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. - 260 с.

146. Гридюшко В.И., Бугаев В. П., Криворучко Н.З. Вагонное хозяйство. – М. : Транспорт, 1988.-296 с.

147. Струйно-абразивная обработка (обзор). – М.: НИИМАШ, 1968. - 56 с.

148. А. В. Стукало Організаційно-технологічні заходи розвитку вагонного господарства в умовах його реформування // Збірник наукових праць ДЕТУТ «Транспортні системи і технології». – Київ, ДЕТУТ, 2013 Вип. 23. с. 42-46

149. І.Д. Борзилов. Забезпечення якості ремонту вагонів в умовах реформування галузі//Збірник наукових праць УкрДАЗТ – Харків, 2013, вип. 139 с. 87-94.

150. Кельріх М. Б. Основи надійності вагонів / Укр. держ. акад. залізничного трансп., Держ. екон.-технол. ун-т трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. - 106 с.
151. Тельнов Н.Ф. Технология очистки машин. – М.: Колос, 1983.
152. Козлов Ю.С., Кузнецов О.К., Тельнов А.Ф. Очистка изделий в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. - 260 с.
153. Юдин В.М. Применение современных ресурсосберегающих технологий очистки машин. (Практ. рекомендації). – М.: Информагротех, 1998. - 48 с.
154. Воропай В. С. Підвищення ресурсних можливостей парку вагонів-цистерн промислових підприємств : автореф. дис. канд. техн. наук : ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т". – Маріуполь, 2013. - 20 с.
155. Быков Б.В., Пигарев В.Е. Технология ремонта вагонов: Уч. для учебных заведений ж.-д. трансп. – М.: Желдориздат, 2001. – 559 с.
156. Берестовой А. М. Выявление трещин в котле цистерны после перевозки затвердевающей жидкости / А. М. Берестовой // Захист металург. машин від поломок. – Маріуполь, 1999. - Вип. 4. - С. 228-230.
157. Мартинов І. Е., Равлюк В. Г. Вагоноремонтні машини та обладнання: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2011.
158. Технологічний процес роботи промивально-пропарювальної станції вагонного депо Дрогобич. Затверджено заступником начальника Львівської залізниці 21 березня 2005р.
159. Никодимов А. П. Цистерны промышленных предприятий: Справ.пособие. Ч. 2. Техническое обслуживание / А. П. Никодимов. – Мариуполь : ПГТУ, 2001. - 89 с.
160. Галкин В. Г., Парамзин В. П., Четвергов В. А. Надежность тягового подвижного состава: Учебн. пособие для ВУЗов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
161. Войнов К. Н. Надежность вагонов . – М.: Транспорт, 1989. – 110 с.
162. WO 2001076781 A1 Cleaning equipment for the cleaning of tanks / Jepsen Erik Lund, Sie Gunner Monrad 18.10.2001. Електронний ресурс: Сайт Patentscope, Espacenet.
163. М. Kratzsch-Leichsenring Современный парк грузовых вагонов железных дорог Германии // Железные дороги мира: Научно-техн. журнал. - 2010. № 3. С. 62.
164. Патент RU 2519375 C2 / Богданов В. С. / Система очистки резервуаров для хранения и транспортировки нефтепродуктов 12.07.2012.

165. Патент №45834А. Пристрій для очистки внутрішньої поверхні ємності (залізничної цистерни) / Куліченко А.Я., Міляннич А. Р. // 15.04.2002, Бюл. ДП УПВ № 4/2002.
166. Патент №54896А. Механізм для очистки внутрішньої поверхні цистерни / Куліченко А.Я., Лаушник І.П., Міляннич А. Р. // 17.03.2003, Бюл. ДП УПВ № 3/2003.
167. Патент №59706А. Пристрій для очистки внутрішньої поверхні цистерни / Куліченко А.Я., Міляннич А. Р. // опублік. 15.09.2003, Бюл. ДП УПВ № 9/2003.
168. Патент №59746А. Установка для очистки зовнішньої поверхні залізничних цистерн / Куліченко А.Я., Лаушник І.П., Міляннич А. Р. // 15.09.2003, Бюл. ДП УПВ № 9/2003.
169. Патент №67531А. Механізм для очистки внутрішньої поверхні котла цистерни / Джус В.С., Куліченко А.Я., Міляннич А. Р. // 15.06.2004, Бюл. ДП УПВ № 6/2004.
170. Міляннич А. Р. Пошкодження робочих елементів інструменту, пов'язані з пластичним деформуванням затверділих органічних речовин / Міляннич А. Р. // Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТу – Д., 2014. - Вип. 53. - С. 48-55
171. Міляннич А. Р. Метод та інструмент руйнування залишків застиглого пеку в залізничних цистернах / Міляннич А. Р. // Залізничний транспорт України: науково-практичний журнал. – 2015. - № 1. - С. 50-52
172. Богашев В.Д., Волосатов А.И. и др. Литейные машины и оборудование в капиталистических странах / Сб. статей под ред. Егорова. – М.: ЦинТИАМ, 1963, с. 43.
173. Круглов, В. Ф. Технология наружной очистки нефтебензиновых цистерн с применением пенообразующих моющих рецептур (ВНИИЖТ) / В.Ф. Круглов, И.М. Мейлихов // Ж.-д. трансп. Ремонт вагонов : ОИ/ЦНИИТЭИ. - 2004. - Вып.1/2. - с. 37.
174. Очистка вагонов-цистерн // Ж.-д. трансп. за рубежом. Подвижной состав. Локомотивное и вагонное хоз-во : ЭИ /ЦНИИТЭИ. - 2004. - Вып.4. - с. 32-33.
175. Яковлев В. С. Особенности динамики процесса промывки железнодорожных цистерн // Прогрессивные методы очистки: сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. – М., 1992. - с. 76.
176. Патент UA№96846U. Пристрій для видалення з поверхні затверділих нашарувань / Міляннич А. Р. // опублік. 25.02.2015, Бюл. ДП УПВ № 4/2015.
177. Сметанин Л.М. Новые моечные машины для ремонтных предприятий // Тезисы докладов научно-техн. конференции "Современное оборудование и техпроцессы восстановления деталей машин". – М.: ГосНИТИ, 1988. - с. 50 - 53.

ДОДАТОК А
ПАТЕНТ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ



ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **96846** (13) **U**
(51) МПК (2015.01)
A46B 7/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 08028**
(22) Дата подання заявки: **16.07.2014**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.02.2015**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.02.2015, Бюл.№ 4**

(72) Винахідник(и):
Мілянич Андрій Романович (UA)
(73) Власник(и):
**ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В.
ЛАЗАРЯНА,
вул. Ак. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ-10,
49010 (UA)**

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ З ПОВЕРХНІ ЗАТВЕРДІЛИХ НАШАРУВАНЬ

(57) Реферат:

Пристрій для видалення з поверхні затверділих нашарувань містить встановлений на валу циліндричний корпус, довкола якого з можливістю обмеженого переміщення встановлені ударні елементи із зубцями. На нижній поверхні корпусу колом встановлені евольвентно закріплені торцеві щіткові секції. Ударні елементи закріплені у корпусі з можливістю їх періодичного вертикального переміщення з одночасним обертанням навколо своєї осі при посередництві зубчастих коліс та кульки, яка вільно встановлена у зовнішній поверхні вала з можливістю її вільного переміщення гвинтовим пазом, розташованим у внутрішній поверхні корпусу.

UA 96846 U

ДОДАТОК Б

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ



МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ТЕРИТОРІАЛЬНО-ГАЛУЗЕВЕ ОБ'ЄДНАННЯ «ЛЬВІВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

**ВІДОКРЕМЛЕНИЙ ПІДРОЗДІЛ
«РЕМОНТНЕ ВАГОННЕ ДЕПО «ДРОГОБИЧ»**

82100, м.Дрогобич, провулок Вокзальний, 11

тел./факс: (03244) 38-081

e-mail: vagonne_depo@ukr.net

«16» жовтня 2014 р.

№ 690



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник ВЧДР-2

Львівської залізниці

Косован М.К.

« » 2014 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідної, експериментально-конструкторської і технологічної робіт

Даним актом підтверджується, що результати проведеної роботи з очищення внутрішньої поверхні котлів вагонів-цистерн від залишків вантажів, що тверднуть та якісної підготовки очищеної поверхні для подальшої їх ремонту та експлуатації, які розроблені А.Р. Міляничем у кандидатській дисертації «Удосконалення технології очищення котлів вагонів-цистерн при підготовці їх до ремонту» впровадженні у практику очищення вагонів-цистерн, які проходять плановий вид ремонту у вагонному депо ВЧДР-2.

Для якісного та ефективного проведення підготовчих робіт для повторної експлуатації вантажних засобів залізничного транспорту, для видалення та очищування від залишків транспортованих вантажів, було розроблено, експериментально перевірено та впроваджено у вагоноремонтному депо станції Дрогобич (Львівська залізниця) комбінований руйнівно-очищувальний інструмент для руйнування монолітності залишків речовин, які тверднуть.

Основна суть комбінованої конструкції інструменту обробки полягає у суміщеному впливі на застигли матеріали динамічного удару набором шарошок і очищування від зруйнованих залишків металу внутрішньої поверхні котла вагону-цистерни.

Форма впровадження: робочі креслення з виготовлення механічної установки закріплення і переміщення внутрішньою поверхнею котла вагона-цистерни інструменту обробки та практичні рекомендації із забезпеченням ефективності технології очищення внутрішніх поверхонь вагонів-цистерн перед постановкою їх в ремонт.

Характеристика масштабу впровадження – підготовчі роботи для виконання ремонту вагонів-цистерн.

Начальник виробничо-технічного
відділу ВЧДР-2

Зорійчук О.В.

000543

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна,
професор

Б.Є. БОДНАР

« 16 » 2017 р.



Довідка

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Мілянича А.Р.
«Удосконалення технології очищення котлів вагонів-цистерн при підготовці їх
до ремонту» представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних
наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дані теоретичні положення сформульовані у дисертаційній роботі
Мілянича Андрія Романовича «Удосконалення технології очищення котлів
вагонів-цистерн при підготовці їх до ремонту» впровадженні у лекційному
курсі дисциплін «Вагоноремонтні машини та обладнання» та «Основи
експлуатації та відновлення вагонів», які викладаються студентам за
напрямком підготовки «Вагони та вагонне господарство».

Завідувач кафедри
«Рухомий склад і колія»
Львівської філії ДНУЗТу, к.т.н., доц.

О.М. Баль