

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

*магістр*

на тему: «Вивчення особливостей термомеханічного  
зміцнення гільз циліндрів поршневих двигунів»

КРМ.133ГМмд\_21.07.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
«*Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва*»  
спеціальності 133 «*Галузеве  
машинобудування*»  
ступеня вищої освіти *магістр*  
групи 133ГМмд\_21  
РУДЧЕНКО Владислав

Керівник: канд. техн. наук, доцент  
ПОПОВ Станіслав

**Полтава – 2022 року**

## ЗМІСТ

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                   | 6  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....                                    | 7  |
| 1.1 Характер зношування гільз циліндрів поршневих двигунів .....             | 7  |
| 1.2 Матеріали для гільз циліндрів .....                                      | 15 |
| Висновки до розділу 1 .....                                                  | 22 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....                                        | 23 |
| 2.1 Ремонтопридатність деталей після різних способів зміцнення .....         | 23 |
| 2.2 Ефективний спосіб підвищення якості деталей .....                        | 28 |
| Висновки до розділу 2 .....                                                  | 33 |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....                                          | 34 |
| 3.1 Обґрунтування вибору матеріалу дослідження .....                         | 34 |
| 3.2 Методика термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра ... | 35 |
| 3.3 Методика дослідження зносостійкості зміцненої поверхні .....             | 40 |
| Висновки до розділу 3 .....                                                  | 55 |
| РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ .....                                     | 56 |
| 4.1 Загальні відомості про планування експерименту .....                     | 56 |
| 4.2 Повний факторний експеримент .....                                       | 58 |
| 4.3 Метод руху за градієнтом.....                                            | 64 |
| 4.4 Ортогональний план другого порядку .....                                 | 65 |
| 4.5 Дослідження зносостійкості матеріалу після термомеханічного зміцнення .. | 71 |
| Висновки до розділу 4 .....                                                  | 81 |
| РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК.....                                 | 82 |
| 5.1 Безпечна робота на технологічному обладнанні .....                       | 82 |
| 5.2 Техногенно-екологічна безпека: світлове маскування.....                  | 83 |
| 5.3 Собівартість продукції.....                                              | 85 |
| Висновки до розділу 5 .....                                                  | 87 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                | 88 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....                                                | 90 |

|           |             |          |        |      |                          |  |       |         |
|-----------|-------------|----------|--------|------|--------------------------|--|-------|---------|
|           |             |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ |  |       |         |
| Зм.       | Арк.        | № докум. | Підпис | Дата | Кваліфікаційна робота    |  |       |         |
| Виконав   | Рудченко В. |          |        |      |                          |  |       |         |
| Перевірив | Попов С.    |          |        |      |                          |  |       |         |
| Керівник  | Попов С.    |          |        |      |                          |  |       |         |
| Н. контр. | Попов С.    |          |        |      |                          |  |       |         |
| Затверд.  | Попов С.    |          |        |      |                          |  |       |         |
|           |             |          |        |      | Літера                   |  | Аркуш | Аркушів |
|           |             |          |        |      | н                        |  | 5     | 89      |
|           |             |          |        |      | ПДАУ, 2022 р.            |  |       |         |

## ВСТУП

Довговічність двигуна внутрішнього згорання, стабільність його робочих характеристик і економічність при експлуатації значною мірою залежать від строку служби і стану гільз циліндрів. Для цих деталей, що працюють в умовах постійних динамічних і циклічних навантажень, високих температур і тисків, досить важливими показниками, що визначають їх експлуатаційні властивості, є рівень технології та технічна оснащеність виробництва, механічні характеристики і стан робочих поверхонь деталі, а також її ремонтпридатність. Підвищення даних показників дозволить збільшити ресурс як самої деталі, так і двигуна в цілому, а також значно скоротити витрати на закупівлю запасних частин.

Вирішення цих важливих питань залежить від створення та освоєння способів підвищення якості поверхонь деталей вузлів і сполучень.

Існуючі способи виготовлення, ремонту гільз циліндрів сільськогосподарської техніки і зміцнення їх робочої поверхні не забезпечують виконання усіх вимог, що висуваються до даної деталі. Крім того, досвід показує, що в переважній більшості випадків при надходженні двигуна на капітальний ремонт дані деталі вибраковуються внаслідок зносу робочої поверхні, що становить не більше 1% від вихідної маси деталі.

Відомо, що будь-який технологічний процес ремонту, відновлення деталі (агрегату) передбачає не тільки відновлення порушених у процесі експлуатації параметрів, але і, головним чином, стримування тих руйнівних процесів, що закономірно протікають. Тому в сформованих умовах при достатньо великій кількості способів відновлення деталей актуальним завданням є пошук нових ефективних технологій зміцнення гільз циліндрів. Таким технологічним процесом є поєднання в єдиному технологічному процесі термічного і механічного зміцнюючого впливу на робочу поверхню чавунних гільз циліндрів, тобто використання високотемпературного термомеханічного зміцнення.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 6     |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Характер зношування гільз циліндрів поршневих двигунів

Виходячи із функціонального призначення, гільзи циліндрів відносяться до головних елементів поршневих двигунів і є найбільш відповідальною деталлю циліндропоршневої групи. Стінки внутрішньої порожнини гільзи служать напрямними для поршня при його переміщеннях між крайніми положеннями й стикаються із полум'ям і гарячими газами, що досягають температури 1500-2500°C (рисунок 1.1, [1]). Гільза циліндра працює в умовах різкозмінних тисків у надпоршневій порожнині. Поршень при переміщенні діє на гільзу із бічною силою  $N_\delta$  і наприкінці кожного ходу, перекладаючись із ударом об стінку гільзи, змінює напрям свого руху. Причому у мертвих точках швидкість дорівнює нулю, а потім зростає до максимуму, що становить до 25 м/с при номінальній частоті обертання колінчастого валу і знову зменшується до нуля у суміжній мертвій точці.

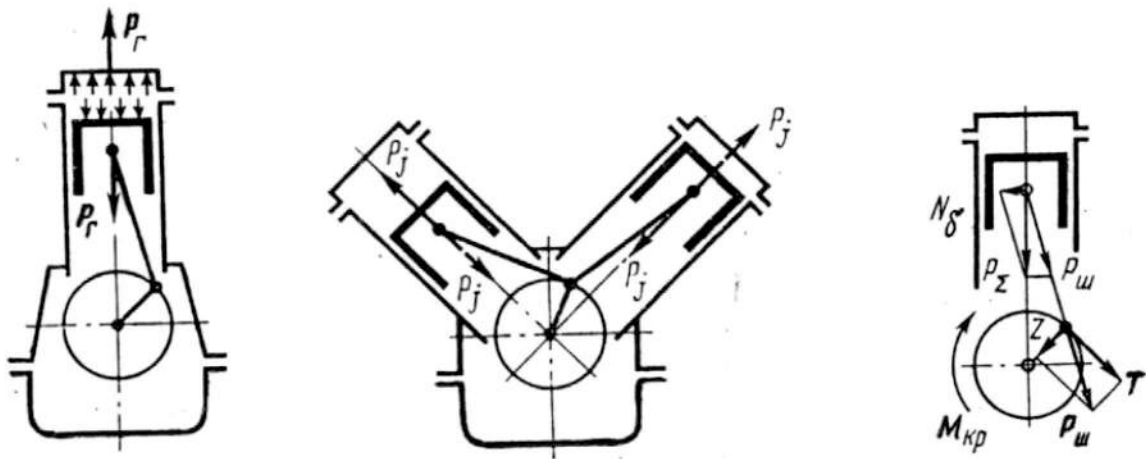


Рисунок 1.1 – Сили, що діють на деталі циліндропоршневої групи

Такий нерівномірний рух поршня і пов'язаного з ним комплексу рухомих деталей породжує змінні за величиною і напрямом сили інерції  $P_j$  зворотно-рухомих мас, що діють вздовж осі циліндра. Сили тиску газів  $P_z$  в надпоршневій порожнині однаково діють як на поршень, так і на головку блоку і стінки

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | KPM.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 7     |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

циліндра. При цьому завжди, маючи рівну собі величину і напрямок, ці сили взаємно врівноважуються всередині системи.

На частку гільз циліндрів з-за впливу високих механічних і теплових навантажень (таблиця 1.1) припадає значна частина відмов двигунів.

Таблиця 1.1 – Складові експлуатаційного зносу гільз циліндрів, %

| Складові зносу                                                 | Марка двигуна |            |            |            |             |
|----------------------------------------------------------------|---------------|------------|------------|------------|-------------|
|                                                                | ЗМЗ-53        | ЗІЛ-130    | ЯМЗ-236    | ЯМЗ-238    | КамАЗ-740   |
| Загальний експлуатаційний знос                                 | 100           | 100        | 100        | 100        | 100         |
| Від нормального теплового режиму без потрапляння пилу у двигун | 17,8-30,8     | 15,2-32,1  | 19,8-29,7  | 19,3-29,0  | 20,3 - 33,1 |
| Від заниженого теплового режиму без потрапляння пилу у двигун  | 5,3 - 10,3    | 5,0 - 10,7 | 4,2 - 6,3  | 4,1 - 6,1  | 4,7 - 7,9   |
| Від міжзмінних пусків                                          | 5,4 – 9,7     | 10,9-18,4  | 8,4 - 12,7 | 8,9 - 13,3 | 9,8 - 12,1  |
| Від потрапляння пилу у двигун                                  | 49,2-71,5     | 38,8-68,9  | 51,3-67,6  | 51,6-67,7  | 46,9-65,2   |

Знос пари тертя гільза циліндра – поршневе кільце виявляється в складному різноманітті форм і залежить від великої кількості одночасно діючих факторів: умов експлуатації двигуна, наявності граничних умов змащення, агресивності середовища, якості очищення повітря, палива і мастильного матеріалу, поєднання матеріалів елементів пари тертя, їх механічних і теплофізичних властивостей,

характеру мікрорельєфу, якості їх покриття, умов припрацьовування і т. д. [2]. Результати багатьох досліджень [2-6] дозволяють стверджувати, що при зворотно-поступальному русі в парі відбуваються інтенсивні пластичні деформації, які призводять до спотворення кристалічної решітки металу та прискорення дифузійних процесів. Крім того, зовнішня поверхня гільз піддається явищам корозії і кавітації. Тому гільзи циліндрів повинні володіти великою механічною міцністю, підвищеною жорсткістю і добре протистояти різним видам зношування (рисунок 1.2, [7, 8]).



Рисунок 1.2 – Види зношування гільз циліндрів

Кожен із видів зношування рідко зустрічається в чистому вигляді. Зазвичай вони проявляються комплексно. Слід сказати, що кожен з них може виявитися відповідно ведучим або супутнім в залежності від умов і режимів роботи двигуна при експлуатації автомобіля.

Незважаючи на те, що питання про ведучий вид зношування гільз циліндрів автомобільних двигунів є дискусійним, дані результатів різних дослідників показують велику роль абразивного зношування для даної деталі при експлуатації [1, 2, 4, 6, 8-13 та ін.]: абразивне зношування, якщо воно має місце, не може виступати в ролі супутнього. Абразивне зношування гільз має загальні закономірності із даним видом зношування у інших деталей машин.

У переважній кількості випадків максимальний знос гільз циліндрів має місце в зоні зупинки поршневих кілець і, зокрема, положення першого поршневого кільця у верхній мертвій точці (ВМТ). Тривалість роботи циліндрів визначається величиною її зносу. Нижче цієї зони величина зносу знижується і залишається практично постійною по всій довжині гільзи [4, 10-15]. Інтенсивне зношування цієї зони викликається великим впливом режимів роботи двигуна, значно гіршими умовами змащування, температури повітря на впуску і т. д. Тому, досить часто зі зміною зовнішніх умов, динамічних параметрів займання і згорання палива зона максимального зносу зміщується вниз по ходу поршня, що викликано збільшенням періоду затримки запалення палива, віддаленням від ВМТ моменту появи максимального тиску в циліндрі і притиснення поршневого кільця до її стінки цим тиском [13].

Крім цих факторів, на абразивне зношування деталі також впливає джерело проникнення абразивних частинок: від пилових частинок, що надходять з повітрям і паливом, відбувається зношування у верхній частині, а в разі їх потрапляння з моторним маслом – максимальний знос має середня частина гільз циліндрів і епюра зносу приймає бочкоподібний характер (рисунк 1.3, а).

Вплив концентрації абразивних частинок, що надходять у циліндри двигуна із паливом на величину і форму епюри зносу показано на рисунку 1.3, б.

При розгляді системи "деталь - абразивна частка - деталь" відзначається взаємний вплив твердості спряжених деталей на їх зносостійкість [2, 6, 8, 10, 11]. З практики експлуатації автомобільних двигунів добре відомо, що застосування хромового покриття (до 200 мкм) робочої поверхні поршневих кілець або підвищення твердості гільз циліндрів (загартування їх робочої поверхні до 40-50 HRC) призводить до одночасного зниження зносу і кільця, і гільз циліндрів [16-19], особливо при абразивному зношуванні. Крім того, автори роботи [11] при дослідженні 50 дизелів КамАЗ-740 встановили: найбільшу кількість натирів (72%) дає перше поршневе кільце, 20 % - друге і лише 8% - маслоз'ємне.

Дослідження [17, 19-21] за оцінкою зносостійкості гільз циліндрів,

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 10    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

виготовлених з різних матеріалів, в умовах абразивного зношування показують, що зносостійкість збільшується в наступному порядку: гільзи із сірого чавуну, з нирезистою вставкою, з легованих чавунів. Ці результати свідчать про те, що твердість не є єдиною характеристикою механічних властивостей матеріалів, що визначає їх зносостійкість, так як твердість нирезисту навіть дещо нижче (156-197 НВ), ніж сірого чавуну (180-230 НВ).

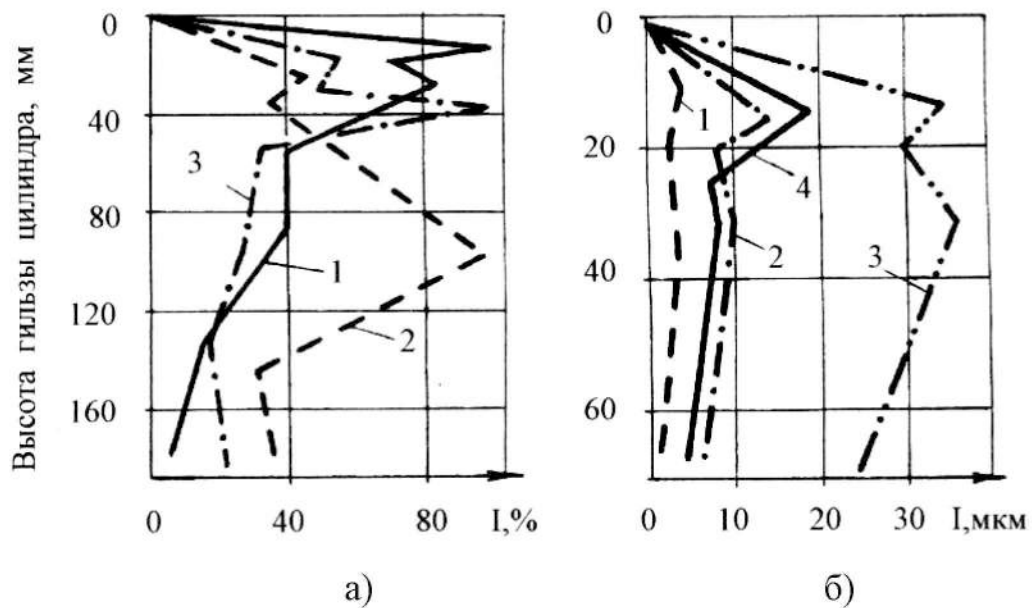


Рисунок 1.3 – Епюра зносу гільз циліндрів двигуна ЗІЛ-130 за твірною:  
а – при штучній подачі пилу: 1 – з повітрям; 2 – з моторним маслом; 3 – з паливом;  
б – при роботі на бензині з різним вмістом механічних домішок (після 7000 км пробігу): 1 – 0%; 2 – 13,5 г/т; 3 – 40 г/т; 4 – середній експлуатаційний знос

Разом з тим, ресурс двигуна залежить від рівномірності зносу всіх його гільз, що також важливо при абразивному зношуванні. Так, автори роботи [3] експериментально підтвердили для двигуна ЯМЗ-238, що внаслідок конструктивних особливостей і недосконалостей різна величина зносу може бути не тільки між гільзами в правому і лівому ряду двигуна, але і гільзами одного ряду. Причиною різниці величини зносу між рядами, в даному випадку, послужило те, що в лівий ряд циліндрів масла закидалося в 1,5-1,7 разу більше, ніж у правий, а із-

за недосконалості конструкції системи подачі повітря різниця величини зносу між циліндрами одного ряду іноді була в 2-5 рази вище, ніж в середньому по двигуну.

Дослідження гільз після експлуатації в дорожніх умовах показують, що на поверхні тертя крім рисок, залишених абразивними включеннями, практично завжди спостерігаються сліди схоплювання у вигляді комет і плям корозійного впливу. В умовах утворення в циліндрах конденсату або перегріву і недостатнього охолодження при експлуатації двигуна їх зношування відбувається при перевазі відповідно корозійно- і молекулярно-механічного впливу. Однак, інтенсивність зношування при відсутності абразивних частинок приблизно на один порядок менше, ніж при абразивному зношуванні.

Молекулярно-механічний характер зношування гільз двигуна дослідники [6, 9, 14, 22 і ін.] пояснюють тим, що до кінця ходу поршня товщина масляної плівки зменшується. У самій ВМТ масляна плівка видавлюється компресійними кільцями, і вони відокремлюються від стінки гільзи дуже тонкою, а місцями і порваною плівкою масла, що створює безпосередній контакт між робочими поверхнями гільзи і кільця і, таким чином, викликає схоплювання. Цьому також сприяють зупинка кільця, здування із поверхні тертя мастильного матеріалу прориваючимися у зазор між кільцями і стінкою циліндра агресивними відпрацьованими газами, висока температура в момент згоряння суміші [2, 22, 23]. На поверхні циліндрів завжди чітко видно зони зупинки всіх поршневих кілець як при положенні поршня у верхній, так і нижній мертвій точках [22]. Цей факт свідчить про те, що найбільш інтенсивна взаємодія поверхонь тертя відбувається при зупинках і змінах руху поршневих кілець.

Крім того, при відносному ковзанні спряжених поверхонь внаслідок деформування металу в тонкому поверхневому шарі генерується тепло, яке розподіляється між тертьовими тілами, частково розсіюючись в навколишнє середовище [2, 6, 22]. У результаті окремі виступи зазнають сильної пластичної деформації, а іноді оплавляються, внаслідок чого в поверхневих шарах елементів пари тертя виникають значні термічні напруження [6, 24].

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 12    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

Циклічні напруження призводять до утворення тріщин на поверхні тертя. Мікротріщини, особливо в умовах зворотно-поступального руху кілець, перетворюються в макротріщини, що сприяють руйнуванню поверхневого шару тертя. Досягнувши певних розмірів, вони полегшують процес відриву нагартованих ділянок поверхневого шару металу.

Пластична деформація металевої основи призводить також до "замазування" включень графіту, виключаючи їх з процесу тертя як джерело твердого змащення. Крім того, "замазуються" утворені в результаті поступового "виполіровування" графіту на поверхні тертя западини від його включень і слугуючі резервуарами для утримання мастильного матеріалу [22-24 та ін.].

Зруйнована масляна плівка не захищає метал у верхній частині гільзи від корозії. Найбільший знос має місце на тій стороні стінки гільзи, яка розташована проти впускного клапана із деяким зміщенням максимуму до поздовжньої осі блоку циліндрів. В результаті удару горючої суміші об стінку гільзи, розташовану проти впускного клапана, на ній залишається частина палива. Перемішуючись з маслом, це паливо розріджує масляну плівку, що покриває стінки циліндра, частково змиваючи її, що призводить до корозії під впливом корозійно-активних речовин.

В процесі корозійного зношування чавунів [14, 22, 24 та ін.] агресивне середовище (гази, слабкі розчини кислот і каталізатори корозії - оксиди свинцю і ванадію) проникає углиб металевої матриці по кордонах графітових і неметалічних включень. Чим крупніше включення, тим активніше йде це проникнення.

Тому замазування і виполіровування графітових включень в результаті пластичного деформування тонких шарів металевої матриці оцінюється фахівцями двобічно [22]. З одного боку, виполіровування графітових включень сприяє запобіганню процесів захоплювання поверхонь тертя, але при цьому відкривається доступ агресивному середовищу (рідка і газоподібна) вглиб металу. З іншого боку, при замазуванні графітових включень створюються сприятливі умови для захоплювання, але одночасно ускладнюється процес окисного руйнування, так як

включення графіту закриті для проникнення агресивного середовища вглиб металевої матриці.

У верхній частині гільзи (камері згоряння) на поверхні тертя завжди знаходяться окисні плівки [2]. Ці плівки під впливом поршневих кілець, деформації гільзи і абразивних частинок розтріскуються і відділяються з поверхні тертя і згодом можуть також явитися абразивними частинками. Оголена металева поверхня знову окислюється і процес повторюється, викликаючи знос. Взаємодія металу зі слабо концентрованими розчинами сірчаної і сірчистої кислот як по всій поверхні дзеркала гільзи, так і в місцях його локального пошкодження (різні каверни, борозни, місця схоплювання поверхонь тертя) є однією з головних причин корозійного зношування циліндрів [2, 22]. У цьому випадку наявність сірки обумовлено введенням у моторні масла антизадирних присадок, що містять її сполуки.

Відомо також, що корозійне і молекулярно-механічне зношування гільз двигунів, що працюють на газоподібному паливі в 1,5-2,0 рази менше, ніж у гільз двигунів, що працюють на рідкому паливі. Їх зносостійкість вище завдяки присутності кількох факторів [14, 22, 25-27 та ін.]:

1) газоподібне паливо має більш високе октанове число і менш схильне до детонації, ніж бензин, отже, менше вифарбовуються в результаті вибухового характеру горіння горючої суміші частинки металу;

2) робоче середовище в циліндрах менш агресивна, а значить, нижче її корозійно-ерозійний вплив;

3) робоча газоповітряна суміш, не маючи рідкої фази, менше змиває масло з робочих поверхонь гільз, тому відсутня граничне тертя, що запобігає процес схоплювання;

4) нижче теплова напруженість гільз циліндрів.

Таким чином, після експлуатації в дорожніх умовах на робочій поверхні гільз циліндрів спостерігаються сліди абразивного зношування, корозійного впливу і сліди схоплювання поверхонь тертя. Як правило, вони проявляються комплексно,

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 14    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

але в залежності від умов і режимів роботи двигуна, а також фізико-механічних властивостей металевої матриці чавуну, будь-який з видів зношування може бути ведучим або супутнім.

## 1.2 Матеріали для гільз циліндрів

Чавун як конструкційний матеріал має широке застосування [28]: на частку чавунних деталей в сучасному автомобілі припадає близько 8,2 %, що порівняно з кількістю гумотехнічних виробів (8,25%) і у процентному відношенні поступається лише сталевим деталям (30,9 %) і листовому металу (29,3 %). Це робить актуальним завдання по підвищенню довговічності чавунних деталей, в тому числі гільз циліндрів двигунів.

Різноманіття факторів, що діють на зношування деталей циліндро-поршневої групи, і гільз циліндрів зокрема, можна умовно розділити на металургійні, конструкційні, технологічні та експлуатаційні [2 та ін.]. Найбільш значущими з них необхідно визнати металургійні і технологічні з тієї причини, що фізична природа сплавів, їх властивості та структура відповідальні за величину і темп зносу пари тертя при всіх інших змінних параметрах.

З безлічі вимог, що пред'являються до чавунів, що застосовуються для деталей, що працюють в умовах тертя при підвищених температурах, можна виділити наступні [6, 17, 29]: високий опір металевої основи пластичним деформаціям, оптимальний розподіл, форма і кількість включень графіту, здатність зберігати міцність і твердість при робочих температурах, досить висока корозійна і ерозійна стійкість, гарний опір захопленню і здатність до самолікування різних дефектів, що утворилися на поверхні тертя. Все це визначає здатність чавунних деталей чинити опір зношуванню. Крім того, матеріал гільз повинен мати достатню теплопровідність, що забезпечує можливість створення оптимального теплового режиму працюючих в парі з нею деталей. Поряд із високою зносостійкістю чавун, як конструкційний матеріал, повинен володіти хорошою

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 15    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

оброблюваністю різанням, технологічністю і мати невисоку вартість.

Робоча поверхня гільзи повинна мати хороші трибологічні властивості, стабільну шорсткість, високу стабільність форми і механічних властивостей, а також стійкість до вібрацій під впливом навантажень, що виникають при роботі двигуна.

На практиці виконання цих, іноді суперечливих вимог, досягається за рахунок вибору матеріалу, підбору оптимального співвідношення легуючих компонентів, варіювання параметрів технологічних режимів відливання заготовок, варіантів остаточної обробки гільз циліндрів і зміцнення їх робочої поверхні.

Зносостійкість і механічні властивості чавунних деталей значною мірою визначаються його мікроструктурою [17]. У зв'язку з цим хімічний склад чавуну, застосовуваний для виготовлення гільз, підбирається, як правило, з розрахунком отримати оптимальну структуру виливки. Однак певною мірою він залежить і від особливостей технології лиття і конструкції виливка.

Найбільше поширення [16, 17, 19, 30-43] отримали заготовки чавунних гільз, відлиті в сирі піщано-глинисті форми та відцентровим способом.

Структура низьколегованого чавуну в гільзах, відлитих в сирих піщано-глинистих формах, переважно перлітна з невеликим (до 5%) кількістю фериту і середньопластинчастим неорієнтованим графітом. В гільзах, відлитих з середньолегованого чавуну, металева основа чавуну чисто перлітна [19], причому перліт і графіт мають більш тонку будову, ніж у низьколегованому чавуні. Мікроструктура і твердість чавуну по перерізу гільзи, відливої в піщано-глинисті форми, досить однорідні.

Виливки гільз в піщано-глинисті форми довгий час було основним процесом для заводів ЗІЛ, ГАЗ, ЯМЗ. Готові гільзи циліндрів дизеля ЯМЗ-236 (-238), виготовлені таким способом, мають на робочій поверхні оптимальну структуру графіту [29, 31] і необхідну твердість після гартування СВЧ (42-50 HRC), що забезпечує їх досить високі задиро - і зносостійкість.

Однак, трудомісткі методи лиття в піщано-глинисті форми в світі все ширше

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 16    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

замінюються литтям в постійні форми. Так, фірми GKN (Великобританія) (споживачами її продукції є багато відомих авто - і двигунобудівних фірм країн Західної Європи і Америки: Volvo, Scania, Ford, Jaguar та інші), Teves-Thompson (США), Renault (Франція), а тепер і автозаводи ЗМЗ, КамАЗ, ЯМЗ [17, 19, 31, 32] виготовляють гільзи циліндрів методом відцентрового лиття. Висока швидкість обертання залитої форми дозволяє до охолодження заготовки відтіснити окалину, шлаки і гази до внутрішньої поверхні, звідки вони видаляються в процесі механічної обробки [17]. Охолодження металевої форми забезпечує процес застигання заготовки, що протікає від периферії до центру, створюючи однорідну дрібнозернисту структуру робочої поверхні. Проте серйозний недолік отримання гільз відцентровим методом лиття - ліквация фосфору (P), сірки (S) і кремнію (Si) у зовнішній поверхні гільзи, в результаті чого зменшується твердість внутрішньої робочої поверхні гільзи [30]. Крім того, часто спостерігається поверхневе відбілювання гільз, бувають випадки поганого контакту вогнетривкого покриття з внутрішньою поверхнею кокілю, що призводить до занурення кварцового піску під зовнішню поверхню виливки. І якщо відбілювання усувається наступним відпалюванням, то видалити абразивний матеріал можна тільки зняттям шару металу.

При одному і тому ж хімічному складі чавуну, гільзи відцентрової виливки мають більш дрібний графіт і більш дисперсний перліт, ніж гільзи, відлиті в землю. Тому при переході із земляної виливки гільз на виливок відцентровим способом і навпаки для одержання тієї ж мікроструктури коригують хімічний склад чавуну і технологію його модифікування [19].

Таким чином, обидва способи отримання заготовок для гільз циліндрів мають свої переваги, які необхідно зберігати, і свої недоліки, що усуваються або удосконаленням процесу лиття [30-33], або в процесі подальших механічної і термічної обробок, яким піддаються гільзи і після одного, і після іншого способу лиття.

В даний час широке застосування для гільз циліндрів двигунів автомобілів

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 17    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

отримав сірий чавун [17, 19, 28]. Він в достатній мірі відповідає вимогам до даної деталі.

Співвідношення основних і легуючих елементів для різних циліндрів наводяться в широкому кількісному інтервалі (таблиця 1.2) [17, 19, 20, 29, 31]. Слід зауважити, що за хімічним складом матеріали гільз циліндрів двигунів СНД і чавуни, що використовуються спеціалізованими іноземними фірмами, розрізняються незначно. Сірий чавун, застосовуваний для гільз циліндрів, за хімічним складом можна умовно розділити на чотири основні групи [19]. Умовність класифікації полягає в тому, що не можна точно визначити межі для кожної групи чавунів за змістом елементів. Основна їх відмінність полягає в особливості мікроструктури чавуну.

Гільзи з нелегованого чавуну не забезпечують необхідної довговічності двигунів, особливо при їх роботі у важких умовах експлуатації, коли посилюється процес абразивного зношування або збільшується тепловий вплив на поверхню тертя [20]. Для підвищення їх зносостійкості в гільзи вставляють нірезистові вставки, які виготовляють з аустенітного чавуну, легovanого великою кількістю нікелю (Ni). Хоча це й приводить до деякого збільшення зносостійкості деталі, проте існує ряд факторів, які обмежують їх застосування: цей матеріал може бути використаний тільки для вставок у верхню частину циліндрів, він нетехнологічний при обробці. Крім того, використання чавунів з високим вмістом Ni у багатьох випадках недоцільно і економічно [19, 29, 34]. Тому останнім часом конструктори і дослідники відмовляються від практики застосування нірезистових вставок, воліючи суцільний матеріал тіла гільзи.

Фосфористі чавуни відрізняються підвищеним (0,3-1,0%) вмістом фосфору (P) і мають у структурі розірвану (при 0,3-0,6% P) або замкнуту (при 0,6-1,0% P) сітку фосфідної евтектики. Вміст легуючих елементів у цих чавунах також, як і в аналогічних низькофосфористих чавунах.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 18    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

Таблиця 1.2 – Хімічний склад чавунів, що використовуються для виготовлення гільз циліндрів

| Марка двигуна(чавуну),<br>країна (фірма)- виробник | Хімічний склад, % |         |         |           |       |          |
|----------------------------------------------------|-------------------|---------|---------|-----------|-------|----------|
|                                                    | C                 | Si      | Mn      | P         | S     | Cr       |
|                                                    | 1                 | 2       | 3       | 4         | 5     | 6        |
| Нелеговані та низьколеговані                       |                   |         |         |           |       |          |
| GKN (Великобританія), 5                            | 3,2               | 2,0     | 0,65    | 0,2       | -     | 0,4      |
| GKN (Великобританія), 11                           | 3,4               | 2,5     | 0,65    | 0,18      | -     | 0,3      |
| GKN (Великобританія), 28                           | 3,2               | 1,9     | 0,65    | 0,25      | -     | -        |
| ЗМЗ-53 (СНД), СЧ 24-44                             | 3,1-3,4           | 2,2-2,4 | 0,7-1,2 | 0,18-0,25 | ≤0,12 | 0,2-0,35 |
| ЗІЛ-130 (СНД), СЧ 18-36                            | 3,2-3,6           | 1,9-2,4 | 0,7-1,2 | 0,2-0,3   | ≤0,12 | 0,2-0,35 |
| Caterpillar (США)                                  | 3,2               | 2,17    | 0,73    | -         | -     | 0,25     |
| Середньолеговані                                   |                   |         |         |           |       |          |
| САМАТЗУ (Японія)                                   | 3,29              | 2,16    | 0,72    | 0,07      | -     | 0,33     |
| ЯМЗ-236,-238 (СНД)                                 | 3,2-3,5           | 2,1-2,6 | 0,6-0,8 | ≤0,2      | ≤0,12 | 0,3-0,45 |
| КамАЗ-740 (СНД)                                    | 3,1-3,4           | 1,9-2,5 | 0,6-0,9 | ≤0,2      | ≤0,12 | 0,25-0,5 |
| Низьколеговані фосфористі                          |                   |         |         |           |       |          |
| АЕ Franse(Франція), 38С                            | 2,8-3,5           | 1,7-2,5 | 0,5-1,0 | 0,35-0,65 | 0,1   | 0,2-0,5  |
| Тев.-Thompson(ФРН),А62                             | 3,2-3,5           | 1,8-2,2 | 0,6-1,0 | 0,3-0,5   | 0,07  | 0,2-0,5  |
| Тев.-Thompson(ФРН),А82                             | 3,2-3,5           | 1,8-2,2 | 0,6-1,0 | 0,3-0,5   | 0,07  | 0,2-0,5  |
| ЗІЛ-130 (СНД), КМЗ                                 | 3,1-3,5           | 1,8-2,5 | 0,5-1,0 | ≤0,4      | ≤0,15 | 0,25-0,6 |
| NPR (Японія) CI(Cu,Cr)                             | 3,0-3,7           | 1,4-2,5 | 0,5-1,0 | 0,5-1,0   | 0,12  | 0,2-0,5  |
| Середньолеговані фосфористі                        |                   |         |         |           |       |          |
| Тев.-Thompson(ФРН),А92                             | 3,8-4,3           | 1,0-1,4 | 0,1-0,4 | 0,1-0,4   | 0,04  | 0,2-0,4  |
| ЗМЗ-2401 (СНД)                                     | 3,3-3,7           | 2,2-2,6 | 0,5-0,7 | 0,3-0,45  | ≤0,1  | 0,5-0,75 |
| ДУЙЦ (ФРН)                                         | 3,57              | 1,9     | 0,70    | 0,45      | -     | 0,33     |
| FIAT (Італія)                                      | 3,30              | 2,25    | 0,67    | 0,53      | -     | 0,41     |
| NPR(Япон.) CI(Ni,Cr,Mo)                            | 3,0-3,7           | 1,4-2,5 | 0,5-1,0 | 0,2-0,5   | 0,12  | 0,5-1,2  |

Продовження таблиці 1.2

| Марка двигуна(чавуну),<br>країна (фірма)- виробник | Хімічний склад, % |           |          |       |      |      |
|----------------------------------------------------|-------------------|-----------|----------|-------|------|------|
|                                                    | Cr                | Ni        | Cu       | Ti    | V    | Mo   |
|                                                    | 7                 | 8         | 9        | 10    | 11   | 12   |
| Нелеговані та низьколеговані                       |                   |           |          |       |      |      |
| GKN (Великобританія), 5                            | 0,4               | -         | -        | -     | -    | -    |
| GKN (Великобританія), 11                           | 0,3               | 0,25      | -        | -     | -    | 0,4  |
| GKN (Великобританія), 28                           | -                 | -         | 0,8      | 0,04  | -    | -    |
| ЗМЗ-53 (СНД), СЧ 24-44                             | 0,2-0,35          | 0,15-0,35 | -        | -     | -    | -    |
| ЗІЛ-130 (СНД), СЧ 18-36                            | 0,2-0,35          | ≤0,35     | -        | -     | -    | -    |
| Caterpillar (США)                                  | 0,25              | -         | 0,23     | 0,03  | 0,04 | -    |
| Середньолеговані                                   |                   |           |          |       |      |      |
| САМАТЗУ (Японія)                                   | 0,33              | 0,32      | 0,55     | 0,02  | 0,05 | 0,16 |
| ЯМЗ-236,-238 (СНД)                                 | 0,3-0,45          | ≥0,12     | 0,15-0,4 | ≤0,08 | -    | -    |
| КамАЗ-740 (СНД)                                    | 0,25-0,5          | 0,15-0,4  | 0,25-0,4 | ≤0,12 | -    | -    |
| Низьколеговані фосфористі                          |                   |           |          |       |      |      |
| АЕ Franse(Франція), 38С                            | 0,2-0,5           | -         | -        | -     | -    | -    |
| Тев.-Thompson(ФРН),А62                             | 0,2-0,5           | -         | -        | -     | -    | -    |
| Тев.-Thompson(ФРН),А82                             | 0,2-0,5           | 0,3-0,6   | -        | -     | -    | -    |
| ЗІЛ-130 (СНД), КМЗ                                 | 0,25-0,6          | ≤0,3      | ≤0,3     | -     | -    | -    |
| NPR (Японія) СІ(Cu,Cr)                             | 0,2-0,5           | -         | 0,2-0,5  | -     | -    | -    |
| Середньолеговані фосфористі                        |                   |           |          |       |      |      |
| Тев.-Thompson(ФРН),А92                             | 0,2-0,4           | -         | 0,4-0,8  | -     | -    | 0,4  |
| ЗМЗ-2401 (СНД)                                     | 0,5-0,75          | 0,15-0,5  | 0,5-0,8  | ≤0,15 | -    | -    |
| ДУЙЦ (ФРН)                                         | 0,33              | 0,13      | 0,32     | -     | -    | -    |
| FIAT (Італія)                                      | 0,41              | 0,17      | 0,40     | 0,03  | -    | 0,43 |
| NPR(Япон.) СІ(Ni,Cr,Mo)                            | 0,5-1,2           | 0,15-0,25 | -        | -     | -    | 0,25 |

Між тим, лабораторні випробування та виробнича практика показують, що найбільшою зносостійкістю володіють гільзи, що виготовляються з сірого легованого чавуну [17, 19, 20, 28, 31].

Вплив хімічного складу і мікроструктури на механічні властивості чавуну докладно досліджено і на основі цього склалися певні погляди: при легуванні і модифікуванні чавунів їх металева матриця зміцнюється і менш пластично деформується при терті [22, 29, 35]; антифрикційні та властивості міцності чавуну залежать від будови металевої основи і графіту; графіт є своєрідним індикатором мікробудови чавуну і дозволяє судити про його придатності для певних умов тертя [19, 29]. Однак, що стосується впливу цих параметрів на зносостійкість чавуну, то тут єдиної точки зору немає.

На якість легованих чавунів, крім методів плавки, також істотно впливають точне (за допомогою засобів автоматизації) витримування режимів, суворий контроль хімічного складу шихти та рідкого металу. Саме їх поєднання, а також модифікування дають можливість отримувати різні марки чавунів із заданими властивостями з одного базового [31, 33, 35].

Таким чином, досвід застосування сірих чавунів для гільз циліндрів показує, що найбільший ефект у підвищенні надійності роботи деталі дає комплексне легування чавуну такими елементами як Cr, Ni, Mo, Cu в оптимальному співвідношенні із основними елементами. Головне при цьому – досягнення такого рівня легування, що в процесі тертя здатне в діапазоні робочих режимів двигуна забезпечити утворення на поверхні вторинних захисних шарів [29]. Необхідна умова – здатність цих шарів протистояти розвитку захоплювання, локалізувати руйнування в досить малих обсягах вторинних структур і мати позитивну реакцію на посилення режимів тертя в циліндрі двигуна без виникнення катастрофічних форм зношування.

Однак, широке варіювання вмістом у хімічному складі чавуну основних і легуючих елементів не забезпечує явних переваг жодної із перерахованих вище груп матеріалів за технологічними, міцності, експлуатаційних і економічних

показників, що і визначає необхідність застосування різних методів зміцнення робочої поверхні гільз циліндрів.

## Висновки до розділу 1

1 Одними із найбільш навантажених і найменш довговічних деталей при експлуатації двигуна є деталі циліндропоршневої групи, що суттєво визначають ресурс його роботи. Тому питання підвищення їх зносостійкості, довговічності і ремонтпридатності, у тому числі гільз циліндрів, залишається актуальним.

2 Найбільшого поширення на даний час отримали гільзи циліндрів, що виготовляються з сірого чавуну та чавунів на його основі. Варіювання вмістом основних і легуючих елементів у хімічному складі дозволяє певною мірою надавати матеріалу гільз необхідні властивості.

Отже, **мета дослідження** – підвищення терміну експлуатації двигунів внутрішнього згоряння сільськогосподарської техніки. **Об'єктом** розробки є процес поліпшення зносостійкості гільз циліндрів, а **предметом** – оптимальні технологічні параметри термомеханічного зміцнення.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

- провести аналіз науково-технічної інформації за методами зміцнення та відновлення робочої поверхні гільз циліндрів;

- обґрунтувати можливість підвищення якості гільз циліндрів, які виготовляються зі спеціального легованого чавуну, за рахунок термомеханічного зміцнення та виявити найбільш значущі технологічні фактори даної обробки, що визначають експлуатаційні характеристики деталі з цього матеріалу;

- встановити за допомогою математичної моделі взаємозв'язок між технологічними параметрами термомеханічного зміцнення, визначальними якістю робочої поверхні, і зносостійкістю матеріалу деталі;

- надати рекомендації щодо практичної реалізації розробок.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Ремонтопридатність деталей після різних способів зміцнення

Більшість сучасних машин, механізмів і деталей є відновлюваними, тобто виниклі при експлуатації дефекти, що перешкоджають нормальному виконанню обумовлених конструкцією функцій, можуть бути усунені засобами ремонту. Технічно справний стан машин в процесі експлуатації підтримується проведенням комплексу робіт профілактичного та відновлювального характеру [36]. Створення конструкцій машин і їх складових частин, що володіють оптимальним рівнем ремонтпридатності, тобто оптимальною пристосованістю до робіт по підтримці і відновленню працездатності і ресурсу, а також якісний аналіз їх технологічності, охоплює комплекс питань, що вирішуються при проектуванні, виготовленні та експлуатації машин. Технологічні фактори є основним інструментом забезпечення необхідних властивостей ремонтпридатності деталей машин при їх виготовленні, а в процесі експлуатації машин – при обслуговуванні та ремонті.

При експлуатації автомобіля виникає необхідність підвищення зносостійкості і антифрикційних якостей робочої поверхні гільз за рахунок методів зміцнення та відновлення працездатності деталі, використовуючи їх технологічність при ремонті. Поняття "технологічність при ремонті", перш за все, характеризує пристосованість об'єктів ремонту до робіт, які здійснюються на ремонтних підприємствах, в ремонтних цехах підприємств і ремонтних ділянках підприємств.

Знос дзеркала циліндра відноситься до основних дефектів гільз. Для його усунення в даний час широко використовуються розточування з подальшим хонінгуванням під один з ремонтних розмірів, постановка додаткових ремонтних деталей (ДРД), індукційне відцентрове наплавлення, проточне хромування [37].

В практиці ремонтного виробництва розточування з подальшим хонінгуванням під один з ремонтних розмірів отримало найбільше поширення як один з найбільш продуктивних, високоякісних і ефективних методів. Розточування

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 23    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

гільз здійснюється під один з ремонтних розмірів. Після розточування отвір гільзи попередньо і остаточно обробляють хонінгуванням при режимах: окружна швидкість 60-80 м/хв; зворотно-поступальна швидкість 15-25 м/хв; тиск на бруски 5-10 кгс/см<sup>2</sup> (попереднє хонінгування) і 3-5 кгс/см<sup>2</sup> (остаточне).

На ряді авторемонтних підприємств використовується технологічний процес відновлення гільз з використанням легкоз'ємних пластин зі сталі 65Г. Пластини повинні мати точно витримані розміри, які залежать від внутрішнього діаметру попередньо розточеного циліндра (у відповідності до товщини пластини). Глибина розточування визначається конструктивними параметрами гільзи і ходом поршня.

Провести порівняльний аналіз методів зміцнення можна лише умовно, оскільки наявні результати досліджень не завжди можна вважати сумісними (різниця числа годин роботи, кілометрів пробігу, умов випробувань тощо). Крім того, аналіз ефективності нових методів зміцнення проводять, як правило, на основі порівняння з уже відомими методами, а результати порівняння оціночних характеристик наводяться у відносних одиницях (у стільки-то разів), що ускладнює формування уявлення про ефективність того або іншого методу.

Легування чавуну гільз циліндрів, розглянуте вище, є одним з методів зміцнення, яке забезпечує зміцнення металевої матриці, підвищення її опору пластичним деформаціям і менше зниження твердості при нагріванні [38, 39].

Найбільш поширені види хіміко-термічної обробки (ХТО) - азотування, сульфидування і фосфатування [17, 38, 40, 41]. Вони дозволяють скоротити витрату Ni, Cr, Cu за рахунок використання для виготовлення гільз менш легованих матеріалів.

Азотуванням досягається значне підвищення твердості (до 40 HRC), зносо- і корозійностійкої робочої поверхні гільз за рахунок утворення в ній карбонітридної фази, яка має достатню пластичність і стає робочим елементом зміцненого шару [17, 41]. В роботі [41] вказується, що монолітні гільзи циліндрів двигуна ЗІЛ-130 з СЧ 24 після азотування мали зносостійкість в 1,5-1,9 рази вище, ніж серійні з нірезістовою вставкою, при пробігу автомобіля 120-160 тис. км. При цьому у

стільки ж разів зменшувалося зношування поршневих кілець.

Однак, зміцнений азотуванням шар погано припрацьовується і може викришуватись в процесі експлуатації. При цьому шорсткість поверхні погіршується до  $Ra=0,63...2,5$  мкм [40]. Тому зміцнення гільз азотуванням не рекомендується для двигунів автомобілів, що працюють в запиленних кар'єрах.

При сульфідуванні [17, 19, 40] на робочій поверхні гільзи утворюється шар сірчистого заліза, який добре припрацьовується, підвищує маслоємність робочої поверхні, запобігає схоплюванню із поршневими кільцями, забезпечує стабільно низький коефіцієнт тертя, збільшує опір зношуванню, має надійне зчеплення з основним матеріалом.

Аналогічні властивості має і фосфатований шар. Крім того, він більш корозійно стійкий і не схильний до утворення сірчаних сполук, що має місце при сульфідуванні.

Головними недоліками всіх видів ХТО є мала товщина шару ( $\leq 0,3-0,35$  мм), при цьому остаточне хонінгування гільз під ремонтний розмір ускладнено і дещо його зменшує; поверхневий шар не може тривалий час протистояти високим навантаженням, при яких працює пара гільза-поршневе кільце [40]; цей метод зміцнення досить енергоємний і дорогий.

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) – ефективний спосіб підвищення зносостійкості тертьових поверхонь деталі в умовах граничного тертя, заснований на використанні пластичних властивостей матеріалу. В результаті такої обробки видаляються ризики і мікротріщини від попередньої обробки, збільшуються твердість, зносо- і корозійностійкість поверхні і її втомна міцність. В даний час існує значна кількість способів ППД [42, 43, 44, 45]. Результати експериментів [42] показали, що зношування поверхонь у зразків після зміцнюючої обробки в період припрацювання менше в 1,1-1,8 разу, а темп зношування в період природного зношування менше в 2 рази.

Поверхневий шар, розкатаний при оптимальних режимах, має підвищену (на 18-27%) мікротвердість [44]. Товщина шару з підвищеною мікротвердістю

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 25    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

коливається в межах 0,05-0,5 мм. Крім того, при розкочуванні відбувається деяке подрібнення графітових включень, зерна перліту після деформації мають інше орієнтування у порівнянні із вихідним. Форма зерен стає сплюснутою в напрямку радіальних сил деформації. Разом з тим, у переважній більшості випадків, як стверджують автори робіт [42-44], можна підібрати оптимальні параметри деформуючого елемента, що забезпечують збереження або навіть поліпшення вихідної мікрогеометрії.

Безсумнівно, позитивним моментом слід вважати те, що ППД може використовуватися в якості остаточної оздоблювальної операції, яку можливо реалізовувати як при виробництві машин, так і в ремонтному виробництві. Однак, воно лише незначною мірою виправляє похибки попередньої обробки. Тому попередня обробка заготовок повинна бути досить точною. Суттєву роль у досягненні необхідної якості поверхні грає величина сили впливу на оброблювану поверхню, число ходів інструменту, форма деформуючого елемента [44, 46, 47].

В роботах [48-50] наводяться приклади досліджень зміцнення гільз циліндрів ППД з одночасним нанесенням антифрикційного покриття. За твердженням авторів роботи [48], цей метод перевершує по ефективності фосфатування, спрямоване хонінгування і алмазне вібровигладжування, а отримані результати [50, 51] після пробігу укомплектованих двигунів 5-25 тис. км показали, що обробка гільз цим методом у порівнянні з алмазним хонінгуванням дозволяє: підвищити ресурс роботи деталей ЦПГ в 1,9-2,6 рази; прискорити припрацьовування у парі гільза-кільце до 2 разів; скоротити витрату палива двигунів ЗМЗ-53, ЗМЗ-24 на 0,4-0,5 л/100 км; зменшити коефіцієнт тертя до 30%; підвищити в 1,8-5,0 разів зносостійкість робочої поверхні гільзи; піддавати обробці лише її верхню найбільш зношувану частину.

Істотним недоліком цього методу є мала товщина антифрикційного шару (до 5 мкм), що в умовах абразивного зношування буде недостатньо і, як наслідок, може викликати інші види зносу, зменшуючи ресурс гільзи.

З метою підвищення зносостійкості робочої поверхні гільз в сучасному

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 26    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

автомобільному двигунобудуванні для більшості гільз циліндрів двигунів, в тому числі і зарубіжних, застосовується загартування [16-19]. Термообробка загартуванням сірого чавуну з перлітною структурою дозволяє перетворити його в чавун з мартенситною структурою.

Загартування гільз, проведене струмами високої частоти (СВЧ), дозволяє отримати робочу поверхню, зміцнену на глибину до 1,5-1,8 мм (до 1,00-1,25 мм - для гільз двигуна КамАЗ-740 і 1,0-1,8 мм - для гільз двигунів ЯМЗ-236(-238). Їх твердість після гартування СВЧ досягає 40-50 HRC. Питомий знос таких гільз становить залежно від умов експлуатації автомобіля 0,5-2,0 мкм/1000 км.

Достатня глибина загартованого шару дозволяє здійснювати перешліфовування гільз під ремонтні розміри, що збільшує ресурс роботи [16, 18]. Однак, такий ремонт для гільз циліндрів дизельних двигунів ЯМЗ-236 (-238) передбачається технічними умовами лише один раз, а для гільз двигунів КамАЗ не передбачений взагалі, що дозволяє вважати їх ремонтпридатність низькою.

При загартуванні робочої поверхні гільз СВЧ, крім того, існує велика ймовірність викривлення, утворення тріщин на загартованій поверхні, отримання неоднорідної твердості як по колу, так і по висоті, неоднорідності структури (наявність відокремлених мікроділянок структурно-вільного фериту в структурі загартованого шару тощо), що є причиною підвищеного зносу гільз циліндрів [52, 53]. Для запобігання цих небажаних дефектів дослідники підбирають оптимальні режими загартування (час нагріву під загартування, наявність підігріву перед загартуванням, інтенсивність зовнішнього та (чи) внутрішнього охолодження тощо) для кожного визначеного хімічного складу чавуну [19, 23, 35, 38].

Застосування в якості теплового джерела лазера великої потужності [17] дозволяє усунути названі для гартування СВЧ недоліки. Максимальна глибина мартенситної структури при лазерного гартування може досягати 1,5 мм практично для всіх застосовуваних марок чавуну. Випробування [54-56] показали, що гільзи, зміцнені лазерним променем, мають зносостійкість і твердість робочої поверхні більшу або рівну азотованим, гільзам із нірезістовою вставкою і

зміцненим СВЧ.

Слід зазначити, що при обробці лазерним випромінюванням графіт, що знаходиться на робочій поверхні гільзи, вигорає під дією високих температур, що призводить до збільшення шорсткості поверхні і ряду інших негативних при роботі деталі наслідків. До того ж, для її проведення необхідно дуже дороге обладнання.

Таким чином, методи зміцнення і відновлення робочої поверхні гільз циліндрів, як поширені, так і альтернативні, повинні в результаті впливу на неї усувати недоліки, викликані ливарним процесом і, в залежності від призначення та хімічного складу, надавати деталі якості, що забезпечують необхідний ресурс роботи двигуна. Однак, як видно з огляду джерел [3, 10, 11], напрацювання двигунів до відправки в капітальний ремонт (у тому числі зазначеними методами ремонту і зміцнення), в реальних умовах експлуатації істотно нижче нормативних. Внаслідок цього, пошук нових способів і методів зміцнення робочої поверхні гільзи циліндрів, що підвищують їх ремонтпридатність, для нинішнього стану автомобільного двигунобудування є об'єктивною необхідністю, що представляє актуальність теми роботи.

## 2.2 Ефективний спосіб підвищення якості деталей

Незважаючи на те, що останнім часом з'являються і альтернативні матеріали і нові способи обробки деталей, залізовуглецеві сплави залишаються конкурентоспроможними по відношенню до них. В даний час у світовій практиці широке поширення одержали методи зміцнюючої обробки сталей і сплавів, що поєднують термічний вплив на метал з його пластичною деформацією [38, 39]. Ефективність даних методів для зміцнення деталей із залізовуглецевих сплавів давно підтверджена практикою. У роботах вітчизняних і зарубіжних вчених накопичений великий матеріал по термомеханічній обробці залізовуглецевих сплавів. Завдяки фундаментальним дослідженням радянських вчених В.Д. Садовського, М.Л. Бернштейна, Л.І. Міркіна, А.П. Гуляєва та інших

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 28    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

сформувалися сучасні уявлення про вплив термомеханічної обробки на фізико-механічні властивості сталей і сплавів, зроблені спроби пояснити природу зміцненого стану в результаті її застосування. За останні роки опубліковані результати десятків досліджень.

Високотемпературна термомеханічна обробка серед цих методів займає особливе місце внаслідок своєї універсальності і технологічності. Однак, досі переважна кількість досліджень у даній області стосується сталей. Що стосується чавунів, то їх високотемпературне термомеханічне зміцнення досліджено недостатньо. Систематичних досліджень деформованості і опору пластичної деформації чавунів в умовах термомеханічної обробки не проводилось. А в технології виробництва чавунних деталей двигунів, і зокрема гільз циліндрів, ці методи застосування взагалі не знайшли.

До питання застосування термомеханічного зміцнення для чавунів дослідники ставляться, як правило, неоднозначно і суперечливо. Можливо, це пов'язано із зауваженнями М.Л. Бернштейна [39], який вказує на те, що навіть високовуглецеві сталі (з  $C \approx 1,0 \%$ ) досліджувалися із обмеженими ступенями деформації в певних режимах, проте із-за високої крихкості матеріалу досить надійні характеристики отримувати не завжди вдавалося.

Думка про неможливість обробки тиском сірих чавунів зважаючи на їх низькі пластичні властивості піддавалася сумніву вже давно [57]. Однак, автори робіт [58, 59] застосували термомеханічну обробку для зміцнення зразків з чавуну, хоча і високоміцного, і отримали обнадійливі результати. Вони вказують, що гаряче деформування чавуну, викликаючи дроблення первинної структури і більш рівномірний розподіл домішок, сприяє отриманню структури з меншою фізичною і хімічною неоднорідністю, що повинно реалізовуватися підвищенням механічних властивостей. Тому питання про можливість використання термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільз циліндрів вітчизняних двигунів при нинішньому стані автомобільного парку країни слід вважати актуальним [60], так як це може стати резервом підвищення ресурсу як самої деталі і її ремонтпридатності, так і

двигуна в цілому.

Оскільки природа будови залізовуглецевих сплавів (чавунів і сталей) має загальні риси, то, загалом, закономірності різних способів зміцнення сталей і чавунів споріднені один одному. Наявність включень графіту в чавуні можна розглядати як дещо більші, ніж у сталей, порожнечі або тріщини у металевій основі, які справляють величезний вплив на багато його властивостей, а наявність великої кількості вуглецю і лита будова обумовлюють особливості способів його зміцнення.

Значне підвищення механічних властивостей сталі дає поєднання пластичної деформації з термообробкою. Одним з основних факторів, що обумовлюють зміна її властивостей в результаті термомеханічної обробки, є спадкування дислокаційної структури деформованого аустеніту. В результаті сталь зміцнюється за рахунок мартенситної реакції, але додаткове зміцнення вносять і дефекти будови, успадковані мартенситом від деформованого аустеніту. Тому видається доцільним [39] керувати характером, кількістю і розподілом дефектів в металі на різних стадіях термічної обробки з тим, щоб раціонально спрямовувати процеси структуроутворення і отримати оптимальні властивості. Одним з основних методів створення недосконалостей є пластична деформація. При цьому природним є поєднання в єдиній технологічній схемі пластичних деформацій і фазових перетворень. Іншими словами [61], зовнішня ознака високотемпературної термомеханічної обробки – це поєднання гарячої обробки, наприклад розкочування, із загартуванням металу. Основною внутрішньою умовою, що визначає ефективність такої обробки, є гартування деформованого у гарячому стані нерекристалізованого аустеніту.

Незважаючи на те, що при такому зміцненні досить важко затримати процеси рекристалізації, ця обробка технологічна, так як залізовуглецевий сплав в аустенітному стані термодинамічно стабільний і пластичніший, внаслідок чого потрібні значно менші зусилля для деформації.

При термомеханічній обробці деталі нагрівають до температури існування

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 30    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

аустеніту (вище  $A_{c3}$ ), піддають пластичній деформації і негайно загартовують, щоб не рекристалізувався деформований аустеніт. У всіх випадках після деформації слідує мартенситне перетворення, а потім відпускання, зазвичай низькотемпературне ( $100-300^{\circ}\text{C}$ ), на задану міцність (пластичність).

Деформація при термомеханічній обробці, як правило, не перевищує 30%. Її ефект спостерігається вже при деформації, дорівнює 10-20%, а підвищення її вище 20% майже не впливає на ефективність зміцнення [61].

Таким чином, рішення задачі застосування термомеханічної обробки для сірого чавуну зводиться до того [39], щоб, як і в кожному конкретному випадку, були обрані:

- 1) оптимальний спосіб пластичної деформації;
- 2) найбільш ефективна ступінь деформації;
- 3) найкраща схема суміщення термообробки і пластичної деформації;
- 4) скориговані (у зв'язку із використанням деформації) режими термічної обробки.

Мала пластичність і міцність сірого чавуну створюють відомі труднощі при обробці деталей із нього в холодному стані [42-45]. Але, якщо залізобуглецевий сплав деталі буде перебувати в аустенітному стані, тобто вище  $723^{\circ}\text{C}$ , то такий матеріал добре кується, штампується і розкочується [38, 39, 47], так як аустеніт має велику пластичність і низьку твердість: 120-180 НВ,  $\delta = 40-60\%$ . А при досягненні  $950^{\circ}\text{C}$  процес аустенізації завершується повністю, що відповідає температурам звичайного гартування ( $820-950^{\circ}\text{C}$ ).

Низькі пластичні властивості сірого чавуну пояснюються в основному двома чинниками: а) дендритністю металевої основи; б) величиною і формою графіту. Виходячи з цього, представляється можливим збільшити пластичність чавуну впливом на металеву основу і графітові включення.

Загартування чавуну із застосуванням різних способів нагрівання підвищує зносостійкість і міцність, але не усуває дендритну структуру чавуну, що зберігає низькі пластичні властивості. На наш погляд, застосування термомеханічного

зміцнення сірого чавуну, крім підвищення міцнісних властивостей металевої матриці, має сприяти і підвищенню пластичних властивостей, яке можливе за рахунок гарячого дроблення первинної литої структури металевої матриці, що поряд з одночасно протікаючими процесами дифузії та первинної рекристалізації сприяє отриманню більш однорідної структури.

При аналізі абразивного зношування дослідники вказують, що одним з напрямків зниження його інтенсивності є підвищення абразивної зносостійкості поверхонь тертя деталей. Застосування для обробки чавуну ППД і загартування як видів зміцнення окремо мають у цьому плані свої переваги (див. п. 1.2).

Опір абразивному зносу чавунів різного складу і структури визначається хімічним складом, кількістю і формою графіту. Найменшу зносостійкість мають феритні чавуни, а зносостійкість ферито-перлітних чавунів зростає із збільшенням кількості перліту. При однаковій твердості зносостійкість визначається в основному структурним станом чавуну. Наявність великих внутрішніх напружень і низька пластичність після гартування викликають падіння опору руйнуванню абразивними частинками [32, 53]. Зносостійкість чавуну загартованого і відпущеного при низьких температурах досягає найбільших значень [62, 63].

Зазначені закономірності абразивного зношування чавуну дозволяють припустити, що термомеханічне зміцнення, внаслідок підвищення механічних властивостей і пластичності в мікрооб'ємах металевої основи, забезпечить більш високу зносостійкість у порівнянні із термічним зміцненням за звичайною технологією.

Таким чином, можна припустити, що комплексне варіювання оптимальними режимами термічної обробки і ППД, дозволить здійснити термомеханічне зміцнення для чавунних гільз циліндрів, надати їм властивості, які включають переваги обох способів, і, за рахунок цього, підвищити ресурс даної деталі до необхідного рівня згідно з ГОСТ 23465-79. А також задовольнить вимоги до відновлюваності складових частин виробу: про застосування матеріалів деталей, що зношуються, що дозволяють відновити їх до ремонтних розмірів; застосування

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 32    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

зношуваних деталей із ресурсами, кратними ресурсу виробу; застосування прогресивних технологічних процесів відновлення складових частин виробу.

## Висновки до розділу 2

1 Застосовувані методи зміцнення робочої поверхні гільз циліндрів дають можливість додатково надавати їм властивостей, що знижують інтенсивність того чи іншого виду зношування, і, тим самим, сприяють збільшенню терміну служби деталі. Але, незважаючи на їх ефективність, у рядовій експлуатації норми напрацювання до відправки у капітальний ремонт, зокрема дизельних двигунів, не відповідають вимогам діючого ГОСТ 23465, причому довговічність і ремонтпридатність гільз циліндрів грає в цьому не останню роль.

2 Виходячи із того, що закономірності зміцнення сталевих і чавунних деталей в загальному споріднені один одному, передбачається, що для чавунних гільз циліндрів можливо практично здійснити термомеханічне зміцнення при температурах гартування в інтервалі 800-950°C підбором ступенів деформації, що не перевищують 20-30%, використавши відповідні технології високотемпературної термомеханічної обробки сталей, що дозволить підвищити якість даних деталей.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 33    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Обґрунтування вибору матеріалу дослідження

Згідно з аналізом літературних джерел, проведеного в розділі 1, для виготовлення гільз циліндрів автомобільних двигунів, і дизельних зокрема, на сучасному етапі в якості основного матеріалу використовується сірий чавун. Для надання специфічних властивостей матеріал гільз легують різними хімічними елементами (див. таблиця 1.2). За механічними властивостями чавуни, що використовуються, як правило, близькі до СЧ18, СЧ21, СЧ24 .

Виходячи із завдань цієї роботи, для дослідження був обраний спеціальний легований чавун, який, відповідно до нормативно-технічної документації, в даний час використовується у промисловості для виготовлення гільз циліндрів двигунів ЯМЗ і КамАЗ (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад спеціального легованого чавуну, %

| C       | Si      | Mn      | Cr        | Cu        | Ni        | Ti    | S     | P     |
|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| 3,1-3,4 | 1,9-2,5 | 0,6-0,9 | 0,25-0,50 | 0,25-0,40 | 0,15-0,40 | ≤0,08 | ≤0,12 | ≤0,20 |

У вихідному стані він має перлітно-феритну структуру із тонкопластинчастим графітом розетчастого типу (з рівномірно розподіленими включеннями середніх і дрібних розмірів у формі завихрених або прямолінійних пластинок). Така структура вихідного чавуну близька чавунам типу СЧ25...СЧ30. Механічні властивості (згідно з ТУ на виготовлення) повинні бути не нижче властивостей чавуну СЧ 21, твердість в межах 179-241 НВ.

Для визначення ефективності запропонованої технології зміцнення внутрішньої поверхні гільз порівняно з існуючою цей матеріал був прийнятий і як контрольний, і як досліджуваний. При проведенні всіх випробувань і досліджень в

якості контрольних використовувалися зразки, виготовлені з серійних гільз двигунів ЯМЗ і КамАЗ, зміцнених стандартним промисловим загартуванням СВЧ (рисунок 3.1, а). Досліджувані зразки виготовлялися після того, як сирі заготовки, призначені для виготовлення стандартних серійних гільз, були піддані термомеханічному зміцненню (рисунок 3.1, б).



а)



б)

Рисунок 3.1 – Заготовки для зразків: а – контрольних; б – досліджуваних

### 3.2 Методика термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільзи циліндра

Для проведення експерименту була використана частина технологічного процесу, що застосовується при виготовленні кілець кулькопідшипників [39]. Відповідно в експериментальній частині даної роботи було задіяно наступне технологічне обладнання:

1 Прямоточна газова піч для нагрівання заготовок до температури деформації (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд прямої газової печі

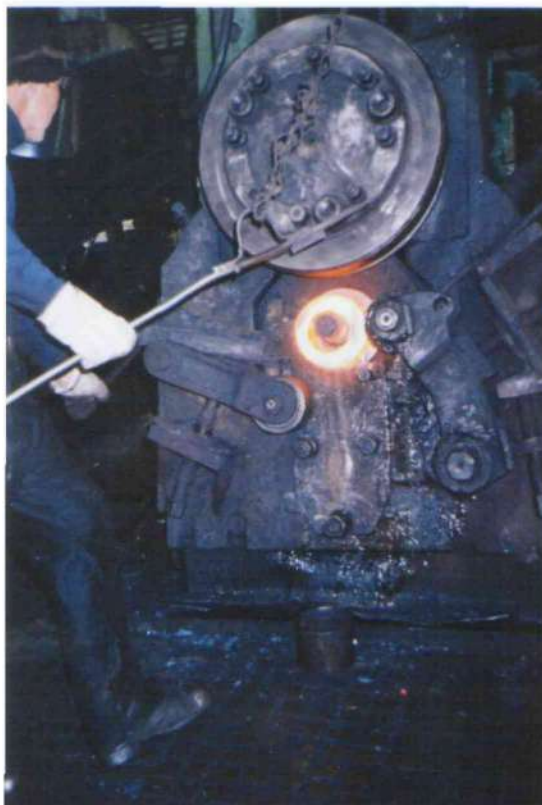
2 Розкочувальна машина РМ-300 для безпосереднього механічного впливу на заготовки (рисунок 3.3, а, б).

3 Пірометр „Промінь” – для визначення температури заготовок в процесі нагрівання і перед деформуванням (точність вимірювання приладу  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ).

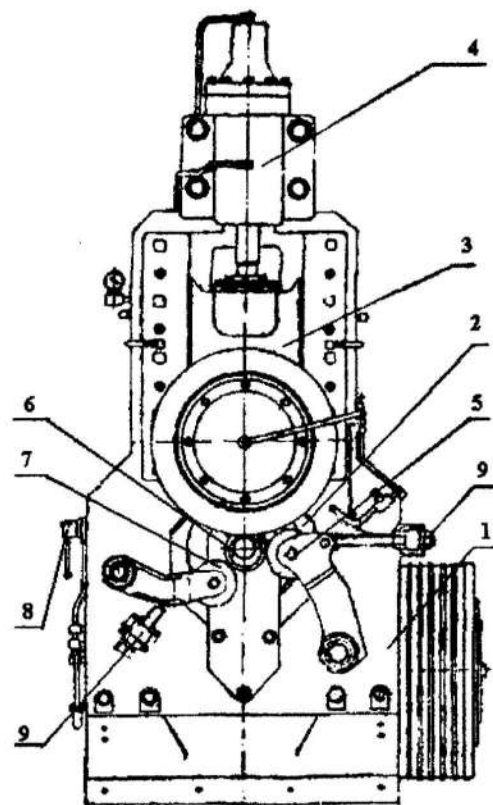
4 Ванна гартування із водою і спеціальним захоплювач-щипці для загартування заготовок.

5 Муфельна лабораторна піч МП-2У – для проведення відпускання заготовок колодочок.

В якості заготовок при термомеханічному зміцненні використовувалися кільця (рисунок 3.4), вирізані з заготовок стандартних гільз і оброблені чорновим точінням по внутрішньому і зовнішньому діаметрах.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Розкочувальна машина РМ-300: а – вигляд загальний; б – конструктивна схема: 1 – станина; 2 – нижня бабка; 3 – верхня бабка; 4 – головний циліндр; 5 – упорний ролик; 6 – заготовка, що зміцнюється; 7 – контрольний ролик; 8 – механізм управління; 9 – гвинти регулювання

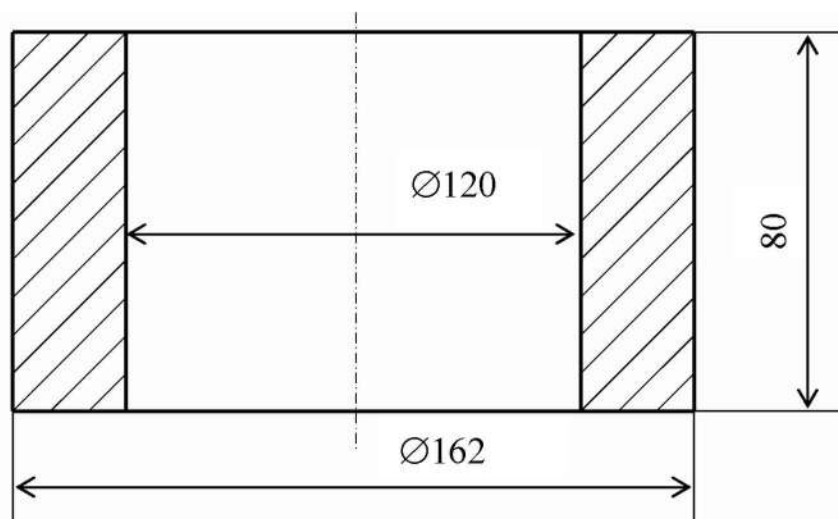


Рисунок 3.4 – Ескіз заготовки

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Розміри заготовок були обумовлені застосуванням технологічним оснащенням РМ-300. Крім того, попередньо була проведено незначне переналагодження робочих органів і органів управління РМ-300 стосовно до умов експерименту (виготовлений бандаж верхньої бабки відповідних розмірів і відрегульовані органи управління для можливості створення зусилля деформації 4-7 кН).

Використовувані чавунні заготовки перед деформуванням нагрівалися протягом 8-10 хв у прямооточній газовій печі до інтервалу температур, зазначеного в таблиці 3.2. Температура реєструвалася пірометром „Промінь”.

Таблиця 3.2 – Умови проведення експериментального термомеханічного зміцнення

| Режим                       | ПФЕ = 2 <sup>4</sup> |         | ЦКОП                 |          |         |                 |         |
|-----------------------------|----------------------|---------|----------------------|----------|---------|-----------------|---------|
|                             | рівні                |         | рівні                |          |         | зоряні точки    |         |
|                             | нижній               | верхній | нижній               | нульовий | верхній | -d              | +d      |
| Температура нагріву, °С     | 810-820              | 930-940 | 850-860              | 890-900  | 930-940 | 835-845         | 945-955 |
| Температура деформації, °С  | 790                  | 910     | 830                  | 870      | 910     | 815             | 925     |
| Температура відпускання, °С | 50 (без відпускання) | 350     | 50 (без відпускання) | 200      | 350     | без відпускання | 400     |
| Ступінь деформації, %       | 9                    | 21      | 9                    | 15       | 21      | 7               | 23      |

Інтервал часу між нагріванням в печі і деформацією на РМ-300 становив 4-7 с (час, необхідний для виїмки заготовки з печі, установки її на опорний валок нижньої бабки і приведення в рух робочих органів розкочувальної машини).

Температура заготовок при деформуванні відповідала температур, заданими умовами повного факторного експерименту ПФЕ=2<sup>4</sup> і центрального композиційного ортогонального плану (ЦКОП) другого порядку (таблиця 3.2).

Зусилля деформації становило 5...6 кН.

Після цього заготовки з температури деформації гартувались у воду. Інтервал часу між деформацією заготовок і розташуванням їх в гартуючу ванну становив 5-10 с, що було необхідно для швидкого фіксування деформованого стану аустеніту і максимального переходу його в мартенсит, а також виключення можливості початку і (або) розвитку рекристалізаційних процесів.

Потім зі зміцнених циліндричних деталей на фрезерному верстаті вирізалися колодочки за розмірами, необхідними для установки на машину тертя.

З метою зменшення залишкових напружень після гартування і визначення оптимальних властивостей спеціального легованого чавуну для гільз циліндрів при використанні термомеханічного зміцнення, колодочки протягом 60 хв піддавалися низькому відпусканню в муфельній печі МП-2У. Температури відпускання наведено в таблиці 3.2.

До необхідної чистоти внутрішньої поверхні стандартних гільз циліндрів колодочки доводились за допомогою чистового шліфування (на внутрішньошліфувальному верстаті) і хонінгування на промислових режимах. Шліфування було технологічно необхідно для надання необхідного розміру робочій поверхні колодочок.

В результаті експериментального зміцнення матеріалу і виготовлення зразків за вказаною технологією вдалося забезпечити цілісність циліндричних заготовок і їх геометричну форму.

Ступінь деформації заготовок оцінювалася за величиною зміни внутрішнього діаметра як

$$\lambda = \frac{(d_k - d_n)}{d_n} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 39    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

де  $d_n$  – величина внутрішнього діаметра заготовок до деформації, мм;

$d_k$  – величина внутрішнього діаметра заготовок після деформації, мм.

Ступені деформації вихідного матеріалу гільз, передбачені для досліджень в результаті обробки заготовок термомеханічним зміцненням, наведені в таблиці 3.2.

### 3.3 Методика дослідження зносостійкості зміцненої поверхні

Дослідження зносостійкості зміцненої поверхні виконано із використанням положень ДСТУ 2823-94 [64] ГОСТ 23.224-86 [65] і РД 50-339-82 [66], які поширюються на відновлені деталі рухомих спряжень, що зношуються в процесі експлуатації, та встановлюють положення методів оцінки їх зносостійкості за допомогою зношування зразків відповідних матеріалів і покриттів на випробувальних установках.

Згідно з цими документами, дані дослідження зносостійкості можна класифікувати як порівняльні експрес-випробування, сутність яких полягає у визначенні співвідношення величин зношування досліджуваної (відновленої) та еталонної поверхонь, випробуваних при наперед встановлених ідентичних умовах, стосовно до конкретних умов зношування із використанням абразиву в абразивно-масляній суспензії.

Дослідження проводилися за варіантом, відповідного випробування матеріалу відновленої (досліджуваної) поверхні, при якому конструктивне виконання і кінематичний тип сполучення уніфіковані відповідно до зазначених нормативно-технічних документів і паспортом машини тертя.

При проведенні дослідження зносостійкості матеріалу використовувались наступні прилади і матеріали:

1 Машина тертя МІ-1М (машина Амслера) [67]. Для можливості проведення випробувань за геометричними розмірами зразків і контрзразків, що відрізняються від стандартних згідно з паспортом машини, була виконана її наступна модернізація: окремі складові вузли машини тертя були підняті над базовою

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 40    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

плитою на різну висоту (рисунок 3.5). При цьому всі інші показники і вимоги до машині тертя по забезпеченню умов випробувань були забезпечені згідно з нормативною документацією.

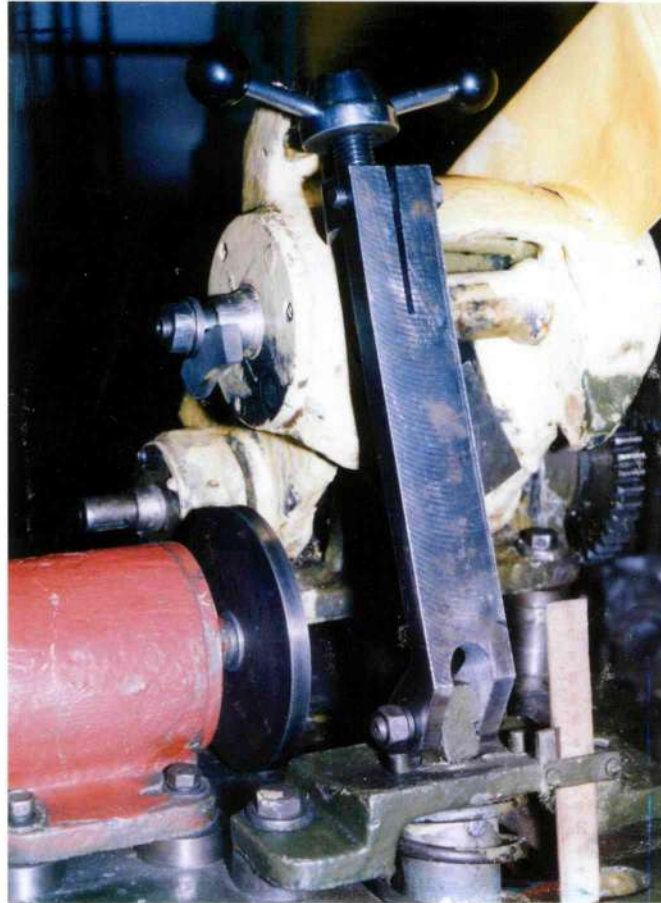


Рисунок 3.5 – Машина тертя МІ –1М (машина Амслера)

2 Аналітичні ваги типу АДВ-200М (2 кл), що дозволяють зважувати з похибкою не більше 0,0001 г.

3 Зразки та контрзразки, виготовлені відповідно до креслень, що наведені на рисунках 3.6, 3.7 Технологія виготовлення зразків розглянута вище. Контр-зразки виготовлені за єдиною технологією з однієї заготовки. Матеріал контрзразків – сталь 45 ДСТУ 7809-2015, термооброблена до твердості 520-580 HV.

4 Змащувальний матеріал – моторне масло М-10Г2К (ГОСТ 8581-78). Абразивний матеріал – продукти зношування матеріалу зразка.

5 Промивні рідини – бензин та ацетон.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 41    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

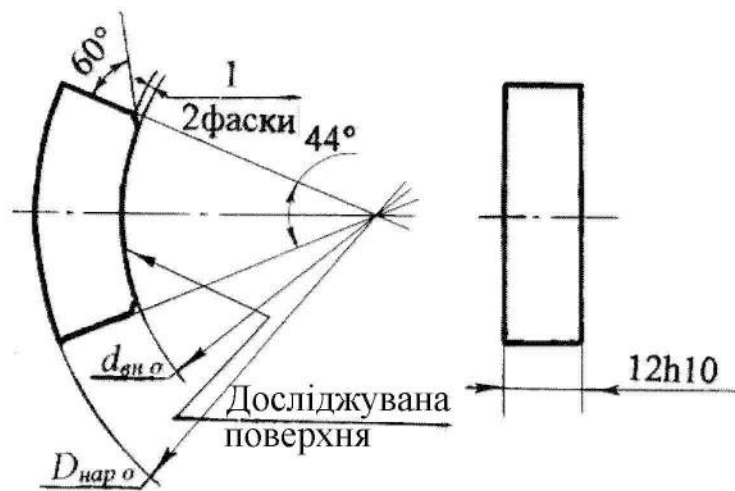


Рисунок 3.6 – Зразок (колодочка)

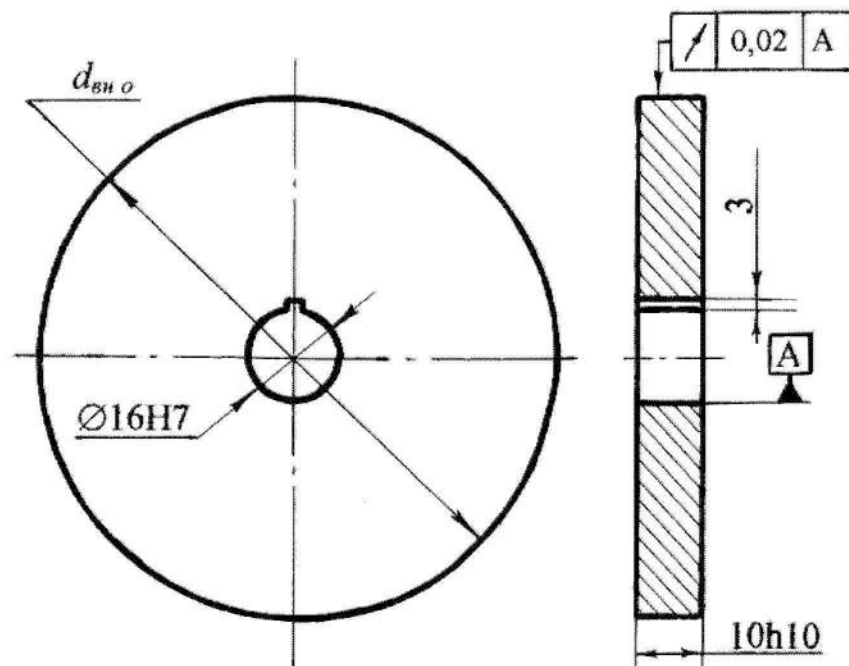


Рисунок 3.7 – Контрзразок (ролик)

Схема випробувань на зносостійкість наведена на рисунку 3.8

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

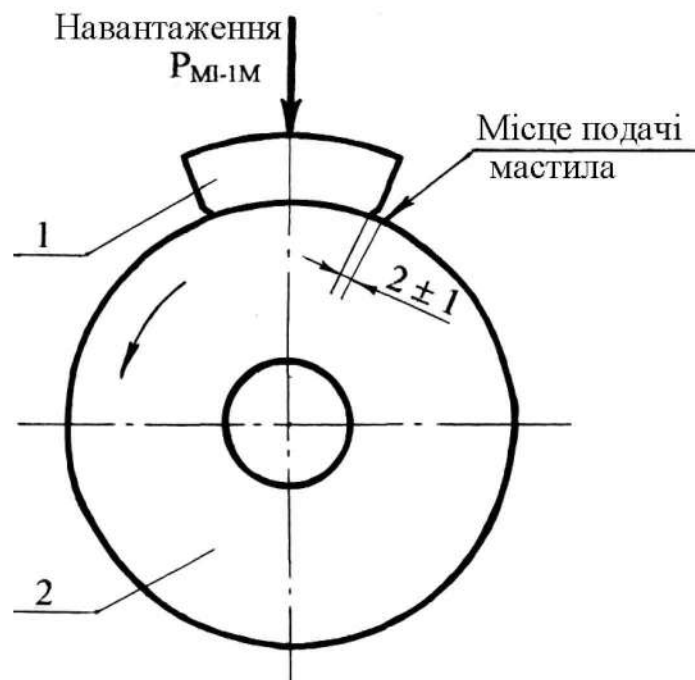


Рисунок 3.8 – Схема випробувань: 1 – зразок; 2 – контрзразок

При підготовці до проведення випробувань зразки були промарковані на неробочих поверхнях. Також були розраховані значення наступних показників.

Передаточне відношення кінематичного ланцюга контрзразка (ролика) визначалося як

$$u = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_3}{z_2} \cdot \frac{z_5}{z_4}, \quad (3.2)$$

де  $z_1 = z_2 = z_3 = 35$  – число зубів шестерень зовнішнього зачеплення;

$z_4 = 30$ ;  $z_5 = 100$  – число зубів шестерень внутрішнього зацеплення.

Для кінематичного ланцюга контр зразка  $u = 3,33$ .

Частота обертання вала контрзразка (ролика) визначалася із відношення

$$u = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{вал}}}. \quad (3.3)$$

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

При частоті обертання двигуна  $n_{\text{дв}} = 1420$  об/хв. отримуємо, що частота обертання вала  $n_{\text{вал}} = 426$  об/хв. За паспортними даними  $n_{\text{вал}} = 425$  об/хв., тобто похибка не перевищує 1%.

Кутова швидкість вала контрзразка (ролика) розраховувалася за формулою

$$\omega_{\text{вал}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{вал}}}{30}. \quad (3.4)$$

Вона становила  $\omega_{\text{вал}} = 44,61 \text{ с}^{-1}$ .

Величина  $\omega_{\text{вал}}$  в машині тертя постійна і забезпечити окружну швидкість  $v_{\text{окр}}$  контрзразка відповідно до середньої швидкості поршня  $s_{\text{п}} = 10,4$  м/с (як у КамАЗ-740) конструктивно не можливо. Тому колова швидкість ролика (контрзразка) визначалася

$$v_{\text{окр}} = \omega_{\text{вал}} \frac{D_{\text{р}}}{2}, \quad (3.5)$$

де  $D_{\text{р}}$  – зовнішній діаметр ролика, м.

Площа поверхні тертя визначалася як

$$S_{\text{тр}} = l_{\text{сегм}} \cdot h, \quad (3.6)$$

де  $l_{\text{сегм}}$  – довжина сегмента за внутрішнім діаметром зразка, м.

Окрім того, були проведені наступні розрахунки.

### 1 Розрахунок модельованого коефіцієнта тертя

При контактуванні деталей машин внаслідок хвилястості поверхонь і макровідхилень форми на значній частині номінальної площі контакту

мікронерівності спряжених поверхонь не торкаються одна одної [63]. Тому площа дотику дуже мало залежить від номінальної площі спряжених тел.

В результаті хвилястості плями контакту групуються на вершинах хвиль в окремих зонах, сукупність яких становить контурну площу контакту (КПК). Її можна визначити як площу, на якій здійснюється контакт хвиль, природно дискретний, внаслідок шорсткості. Причому відстань між плямами контакту не перевищує базову довжину, відповідну даній шорсткості поверхні згідно з даними [68].

Якщо номінальна площа контакту невелика і хвилястістю можна знехтувати, то можна вважати КПК рівною номінальній. Номінальне навантаження, віднесена до КПК, характеризує контурний тиск  $p_c$ . Контурне тиск зазвичай в кілька разів більше номінального.

Якщо збільшувати номінальний тиск на контакті, то контурний тиск змінюється порівняно мало, а фактично залишається практично постійним.

Таким чином, контурний тиск  $p_c$  у вузлі тертя „ролик-колодочка” становитиме:

при 350 Н  $p_c=0,7863$  МПа;

при 650 Н  $p_c=1,2548$  МПа;

при 750 Н  $p_c=1,4478$  МПа.

При проведенні справжнього розрахунку модельований на машині тертя вузол можна розглядати як підшипник ковзання. Ролик (вал), що імітує поршневе кільце, виготовлений із сталі 45, термооброблений до твердості 520-580 НВ (52-58 HRC). Поверхня оброблена круглим шліфуванням за 8-им класу шорсткості. Колодочка (підшипник), що імітує гільзу циліндра, – зі спеціального легованого чавуну, твердість 42-50 HRC (401-461 НВ), модуль пружності  $E=1,2 \cdot 10^5$  МПа, оброблена внутрішнім шліфуванням і хонінгуванням за 9-м класом шорсткості.

Більш твердим матеріалом пари є ролик (вал). Згідно з [63] визначені параметри шорсткості його поверхні:

- параметри опорної кривої  $b = 0,9; v = 1,9;$

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 45    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

- комплексна характеристика шорсткості

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{r \cdot b^{\frac{1}{\nu}}} = 4,1 \cdot 10^{-2};$$

- найбільша висота нерівностей профілю

$$R_{\max} = 4,7 \text{ мкм};$$

- приведений радіус нерівностей

$$r = 12 \text{ мкм}.$$

Робота проходить в умовах граничного змащення маслом при швидкості ковзання, не викликаючій нагрівання (точніше, протягом інтервалу часу, за який істотне нагрівання (більше 60<sup>0</sup>С) не встигає відбутися).

Контурний тиск, що приводить до пластичного контакту, для найбільш поширених шорсткостей поверхні, що використовуються в машинобудуванні, визначається за формулою [63]:

$$p_c \geq \frac{14,5}{\Delta^2} \cdot \frac{HB^5 (1 - \mu^2)^4}{E^4}. \quad (3.7)$$

Підставивши відповідні значення і провівши обчислення, отримано значення  $p_c = 3,0576 \cdot 10^{-3}$  МПа. Оскільки  $0,7863 \text{ МПа} > 3,0576 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}$ , то має місце пластичний контакт.

Пластичний контакт має місце при порівняно невеликих величинах контурних тисків для поверхонь, оброблених нижче 8-го класу шорсткості. Із збільшенням чистоти обробки поверхні контурний тиск, що приводить до пластичних деформацій в зоні контакту, істотно підвищується, досягаючи великих значень для 10-го класу шорсткості і вище.

Зважаючи розподіл нерівностей по висоті, частина нерівностей пластично деформує матеріал контртіла, частина – пружно і пружнопластично. Таким чином, ідеально пластичного контакту при контактуванні твердих тіл, що мають шорсткі поверхні, не спостерігається. Однак, розрахунки авторів [63, 69] показують, що для поверхонь нижче 9-го класу шорсткості при реалізації пластичного контакту на частини нерівностей, внесок нерівностей, деформуючих матеріал пружно і пружно пластично, в силову взаємодія твердих тіл дуже малий у порівнянні із внеском

нерівностей, деформуючих матеріал пластично. У першому наближенні можна вважати, що після досягнень контурних тисків, визначених формулою (3.7), при контактуванні твердих тіл має місце ідеально пластичний контакт.

При пластичних деформаціях у зонах дотику твердих тіл можуть мати місце ненасичений і насичений пластичний контакти. Ненасичений пластичний контакт має місце при контурних тисках, які визначаються за формулою [63] для найбільш поширених шорсткостей поверхонь:

$$\frac{14,5}{\Delta^2} \left[ \frac{HB(1-\mu^2)}{E} \right]^4 \leq \frac{p_c}{HB} \leq 0,062. \quad (3.8)$$

У справжніх розрахунках

$$\frac{p_c}{HB} = \frac{0,7865}{430} = 1,8291 \cdot 10^{-3} < 0,062;$$

$$\frac{p_c}{HB} = \frac{1,4478}{430} = 3,3670 \cdot 10^{-3} < 0,062.$$

Ліва частина формули (3.8) при прийнятих значеннях коефіцієнтів дає значення  $1,0986 \cdot 10^{-6}$ . Так як в обох випадках ця умова виконується, то має місце ненасичений пластичний контакт.

Молекулярна складова коефіцієнта тертя в умовах пластичних деформацій в зонах контакту від контурного тиску не залежить. Деформаційна складова зі збільшенням контурного тиску зростає. Загальний коефіцієнт тертя змінюється в залежності від контурного тиску для найбільш типових видів обробки поверхонь, що використовуються в машинобудуванні, наступним чином [63]:

$$f = \frac{\tau_n}{HB} + 0,44 \cdot \Delta^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2p_c}{HB} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (3.9)$$

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 47    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

Для наявного інтервалу значень відношення  $\frac{P_c}{HB} = [1,8291...3,3670] \cdot 10^{-3}$  приймаємо  $\frac{\tau_n}{HB} = 0,15$  відповідно до [63]. Тоді  $f = (0,1719...0,1755)$ .

При пластичному ненасиченому контакті коефіцієнт тертя слабо зростає при збільшенні контурного тиску. Для поверхонь з малою шорсткістю, як впливає з формули [63, стор. 59, (43)], коефіцієнт тертя в однакових умовах змінюється в залежності від контурного тиску менш інтенсивно. Зазвичай зі зменшенням шорсткості поверхні значення коефіцієнта  $\nu$ , як правило, зростає. Отже, коефіцієнт зовнішнього тертя змінюється ще менш інтенсивно при зміні контурного тиску.

Таким чином, при проведенні розрахунків у дослідженнях зносостійкості поверхні, схильній термомеханічному зміцненню, приймаємо значення модельованого коефіцієнта тертя  $f_m = 0,17$ .

## 2 Розрахунок масштабних коефіцієнтів

Розрахунок масштабних коефіцієнтів було проведено згідно з [65] як окремий випадок, при якому різниця між натуральним і модельованим спраженням відноситься до геометричних розмірів елементів пар тертя.

Масштабний коефіцієнт  $K_m$  обчислювався за формулою

$$K_m = \sqrt[6]{\frac{A_{m.o} \cdot A_{m.k}}{A_{n.o} \cdot A_{n.k}} \cdot \frac{S_{n.o} \cdot S_{n.k}}{S_{m.o} \cdot S_{m.k}}}, \quad (3.10)$$

де  $A_{m.o}$ ,  $S_{m.o}$  – відповідно вільна (не бере участь у терті) поверхня модельованого зразка (колодочки) і відношення цієї вільної поверхні до його об'єму;

$A_{m.k}$ ,  $S_{m.k}$  – відповідно вільна поверхня модельованого контрзразка (ролика) і відношення цієї вільної поверхні до його об'єму;

$A_{n.o}$ ,  $S_{n.o}$  – відповідно вільна поверхня натурального зразка (гільзи) і відношення цієї вільної поверхні до його об'єму;

$A_{н.к}$ ,  $S_{н.к}$  – відповідно вільна поверхня натурального контрзразка (поршневого кільця) і відношення цієї вільної поверхні до його об'єму.

Отримані в результаті розрахунків значення масштабних коефіцієнтів  $K_m$  наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення масштабних коефіцієнтів

| Ступінь деформації $\lambda$ , % | 9      | 13     | 17     | 21     |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Масштабний коефіцієнт $K_m$      | 0,8474 | 0,8682 | 0,8840 | 0,8973 |

### 3 Розрахунок навантажень, що моделюються

Моделювання реальних умов роботи пар тертя передбачає встановлення певної аналогії, можливість перенесення інформації з одного об'єкта на інший. Підставою цього є збіжні ознаки об'єктів (натури і моделі), які можуть мати якісний і кількісний характер [67]. З метою визначення реальних навантажень, які мають місце при взаємодії деталей циліндропоршневої групи в парі з гільзою циліндра під час роботи двигуна були проведені наступні розрахунки.

Максимальний питомий тиск юбки поршня  $h_{ю}$  і всієї висоти  $H$  поршня на стінку гільзи циліндра відповідно

$$q_1 = \frac{N_{max}}{h_{ю} \cdot D_{п}}, \quad (3.11)$$

$$q_2 = \frac{N_{max}}{H \cdot D_{п}}, \quad (3.12)$$

де  $q_1, q_2$  – відповідно максимальний питомий тиск на стінку гільзи від юбки поршня і всієї його висоти, МПа;

$N_{max}$  – максимальна бічна сила, Н;

$D_n$  – діаметр поршня, мм.

Для розмірів поршня двигуна КамАЗ при  $N_{\max}=4260$  Н маємо  $q_1 = 0,473$  МПа,  $q_2 = 0,289$  МПа.

Питомий тиск поршневого кільця на стінку гільзи циліндра визначалось як

$$q_{\Sigma} = q_{\text{упр}} + q_{\text{газ}}, \quad (3.13)$$

де  $q_{\text{упр}}$  – питомий тиск кільця за рахунок його пружності, МПа;

$q_{\text{газ}}$  – питомий тиск кільця від дії газів, МПа.

Питомий тиск кільця за рахунок його пружності  $q_{\text{упр}}$  був прийнятий рівним середньому тиску кільця на стінку гільзи циліндра  $p_{\text{к.ср}}$ , яке відповідно до [70] розраховується за формулою

$$p_{\text{к.ср}} = 0,152E \frac{Ж}{D \left( \frac{D}{\delta_{\text{п.к}}} - 1 \right)^3}, \quad (3.14)$$

де  $E$  – модуль пружності 1-го роду, МПа;

$Ж$  – величина розтвору кільця у вільному стані, мм;

$D$  – діаметр циліндра, мм;

$\delta_{\text{п.к}}$  – товщина кільця в радіальному напрямі, мм.

Для розмірів поршневих компресійних кілець двигуна КамАЗ отримано  $q_{\text{упр}} = p_{\text{к.ср}} = 0,2061$  МПа.

Питомий тиск кільця від впливу газів  $q_{\text{газ}}$  визначався за формулою

$$q_{\text{газ}} = \frac{P_{\text{газ}}}{F_{\text{нар.к}}}, \quad (3.15)$$

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 50    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

де  $P_{\text{газ}}$  – сила, з якою газ діють на внутрішній діаметр поршневого кільця, Н;

$F_{\text{нар.к.}}$  – площа кільця за зовнішнім діаметром, що контактує із гільзою циліндра,  $\text{мм}^2$ .

Сила  $P_{\text{газ}}$  визначалась за формулою

$$P_{\text{газ}} = k \cdot \pi \cdot d_{\text{вн.к}} \cdot h_{\text{к}} \cdot p_{\text{газ } i}, \quad (3.16)$$

де  $k$  – коефіцієнт розподілу тиску між 1-м та 2-м компресійними кільцями;

$d_{\text{вн.к}}$ ,  $h_{\text{к}}$  – внутрішній діаметр кільця при знаходженні в гільзі та його висота, мм;

$p_{\text{газ } i}$  – значення тиску газів протягом циклу, МПа.

Для поршневого кільця двигуна КамАЗ площа кільця за зовнішнім діаметром становила  $F_{\text{нар.к.}} = 1130,4 \text{ мм}^2$ .

Розрахунок питомого тиску поршневого кільця на стінку гільзи циліндра з використанням формули (3.13) та його середнього значення було проведено за двома варіантами (таблиці 3.4, 3.5).

Перший варіант передбачав розрахунок даної величини в контрольних точках теплового розрахунку, а другий передбачав розгляд області динамічного розрахунку, в якій значення сили тиску газів приймають максимальні значення [60].

Таким чином, значення середнього питомого тиску поршневого кільця на стінку гільзи циліндра, розраховані за обома варіантами, мають досить близькі величини і є на порядок вищими від максимальних питомих тисків юбки поршня  $h_{\text{ю}}$  і всієї висоти  $H$  поршня, що дало підставу використовувати саме їх для подальших розрахунків.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку питомого тиску поршневого кільця на стінку гільзи циліндра (варіант 1) за [60]

| Значення $p_{газ\ i}$ , МПа,<br>в контрольних точках теплового<br>розрахунку | $P_{газ}$<br>Н | $q_{газ}$ ,<br>МПа | $q_{упр}$ ,<br>МПа | $q_{\Sigma}$<br>МПа |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| у кінці процесу наповнення $p_a=0,0913$                                      | 66,195         | 0,0586             | 0,2061             | 0,2647              |
| у кінці процесу стиску $p_c=4,4258$                                          | 3210,217       | 2,8399             | 0,2061             | 3,0460              |
| у кінці процесу згоряння $p_z=7,0813$                                        | 5136,350       | 4,5438             | 0,2061             | 4,7499              |
| у кінці процесу розширення $p_b=0,3456$                                      | 250,650        | 0,2217             | 0,2061             | 0,4278              |
| у кінці процесу випуску $p_r=0,1190$                                         | 86,315         | 0,0764             | 0,2061             | 0,2825              |
| $p_{газ\ ср} = \frac{\sum p_{газ\ i}}{5} = 2,4126$                           | 1749,945       | 1,5481             | 0,2061             | 1,7542              |

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку питомого тиску поршневого кільця на стінку гільзи циліндра (варіант 2) за [60]

| Градус повороту<br>колінчастого валу | $p_{газ\ ср}$ ,<br>МПа | $P_{газ}$ ,<br>Н | $q_{газ}$ ,<br>МПа | $q_{упр}$ ,<br>МПа | $q_{\Sigma}$ ,<br>МПа |
|--------------------------------------|------------------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| 300 ... 420                          | 2,8680                 | 2080,275         | 1,8403             | 0,2061             | 2,0464                |
| 290 ... 440                          | 2,4583                 | 1783,103         | 1,5774             | 0,2061             | 1,7835                |
| 270 ... 450                          | 2,1262                 | 1542,218         | 1,3643             | 0,2061             | 1,5704                |

Для моделювання умов тертя, що мають місце в реальній парі тертя, була розрахована величина сили тертя  $P_{тр}$  між верхнім поршневим кільцем і стінкою гільзи циліндра. Розрахунок проводився за формулою

$$P_{тр} = (P_{газ\ i} + P_{упр}) \cdot f, \quad (3.17)$$

де  $P_{\text{упр}}$  – сила пружності кільця, Н. При висоті поршневого кільця двигуна КамАЗ  $b = 3$  мм середня сила пружності становила 233 Н;

$$P_{\text{упр}} = \pi D b \cdot q_{\text{упр}}, \quad (3.18)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя. За [63] для пари тертя „хром-чавун”  $f = 0,05 \dots 0,09$ .

Виходячи з цього були отримані величини сили тертя, Н, наведені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Величини сили тертя у контрольних точках теплового розрахунку двигуна КамАЗ за [60]

| Контрольна точка,<br>що відповідає тиску | $P_{\text{газ}_i} + P_{\text{упр}},$<br>Н | Коефіцієнт тертя $f$ |         |         |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|---------|---------|
|                                          |                                           | 0,05                 | 0,07    | 0,09    |
| $p_a$                                    | 66,195+233                                |                      |         |         |
| $p_c$                                    | 3210,217+233                              | 14,960               | 20,944  | 26,928  |
| $p_z$                                    | 5136,350+233                              | 172,161              | 241,025 | 309,890 |
| $p_b$                                    | 250,650+233                               | 268,468              | 375,855 | 483,242 |
| $p_r$                                    | 86,315+233                                | 24,183               | 33,856  | 43,529  |
|                                          |                                           | 15,966               | 22,352  | 28,738  |
| $p_{\text{газ ср}}$                      | 1749,945+233                              | 99,147               | 138,806 | 178,465 |

Сила тертя, що моделювалася на машині тертя МІ-1М, визначалась як

$$P_{\text{тр}_m} = K_m \cdot P_{\text{тр}}, \quad (3.19)$$

де  $K_m$  – масштабний коефіцієнт.

З іншого боку, вона також визначалася як

$$P_{\text{тр}_m} = f_m \cdot P_{\text{мі-1м}}, \quad (3.20)$$

де  $f_m = 0,17$  – прийнятий модельований коефіцієнт тертя;

$P_{\text{мі-1м}}$  – сила, що створюється навантажувальним пристроєм машини тертя.

Отже, з формул (3.19) і (3.20) співвідношення між силою тертя, що має місце в реальній парі тертя, і силою тертя, що моделюється на машині тертя може бути виражено залежністю:

$$P_{\text{мі-1м}} = \frac{f}{f_m} K_m \cdot (P_{\text{газ}} + P_{\text{упр}}). \quad (3.21)$$

При цьому питомий тиск, що створюється у вузлі „ролик-колодочка” визначався як

$$p_{\text{мі-1м}} = \frac{P_{\text{мі-1м}}}{S_{\text{тр}}}, \quad (3.22)$$

де  $S_{\text{тр}}$  – площа поверхні тертя,  $\text{мм}^2$ .

Таким чином, прийняті значення випробувальних навантажень в реальних умовах експлуатації відповідають, з одного боку, навантаженням між гільзою циліндра і верхнім поршневим кільцем 0,9...2,5 МПа при коефіцієнті тертя  $f = 0,05$  і 0,5...1,4 МПа при коефіцієнті тертя  $f = 0,09$ , а також середньому тиску кільця на поверхню дзеркала циліндра за цикл, з іншого боку.

При проведенні випробувань дотримувались наступного порядку операцій.

1 Контрзразок і зразок відповідних розмірів (по внутрішньому діаметру зразка) встановлювалися відповідно до рисунку 3.8.

2 На контрзразок в місці, вказаному на рисунку 3.8, піпеткою наносилося масло М-10Г2К в кількості 1 крапля за період випробувань.

3 Контрзразок приводився в обертання. Технологія виготовлення зразків і контрзразків забезпечила 95%-ве прилягання по досліджуваній поверхні зразка до

контрзразка (прилягання попередньо визначався візуально на просвіт), у зв'язку з чим їх приробіток на шляху тертя до 12-15 м від моменту приведення в обертання контрзразка до моменту прикладання основного навантаження забезпечив необхідні умови випробувань.

4 Зразок навантажувався за допомогою системи навантаження МІ-1М. Навантаження на зразок встановлювалася відповідно до значень, зазначених у розділі 3. Режим випробування (шлях тертя, дорівнює 320 м за чотири періоди) був обумовлений умовою накопичення величини зношування, що визначається із заданою точністю прийнятим ваговим методом виміру.

5 Концентрація абразиву визначалася ступенем зношування зразка, протягом одного періоду випробування.

6 Відлік часу (тривалості періоду випробувань) проводився за допомогою електронного секундоміра.

7 По закінченні періоду випробувань розвантажували систему навантаження, виводили зразок контакту із контрзразком, зупиняли контрзразок, знімали зразок і контрзразок, промивали їх послідовно в промивальних рідинах.

8 Контрзразок контролювався візуальним оглядом та замірявся штангенциркулем. Зразок оглядався візуально і зважувався. За результатами зважування зразків до і після періодів випробувань визначали загальне значення втрати маси  $\Sigma \Delta g$  і середнє арифметичне значення втрати маси за період випробування для контрольних і досліджуваних зразків  $\Delta g_{\text{ср}}$ .

### Висновки до розділу 3

Розглянуті в даному розділі питання дозволяють зазначити, що було обгрунтовано вибір матеріалу, що піддається дослідженню згідно теми роботи. Для зміцнення досліджуваного матеріалу підібрано промислове обладнання, визначені методика і діапазон технологічних режимних параметрів термомеханічного зміцнення, відповідні цілям і завданням роботи.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 55    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 4.1 Загальні відомості про планування експерименту

Рішення більшості проблем у технології виробництва та експериментальній роботі, що проводиться в галузі фундаментальних наук, пов'язане зі статистичними методами планування експерименту. Методи планування експерименту дозволяють інтенсифікувати працю дослідника, скоротити терміни і витрати на експеримент, підвищити достовірність результатів дослідження [71].

Сутність планування експерименту полягає в тому, що при проведенні досліджень експеримент, керований за допомогою математичних методів з певного плану, ведеться в декілька послідовних етапів, після кожного з яких розглядається питання про зміну стратегії експерименту. Це полегшує рішення багатьох екстремальних задач, так як для найбільш типових з них вже сформульовано критерії оптимізації та розроблені відповідні методологічні питання.

Якість складного об'єкта оцінюють за результатами проведення експерименту. Для забезпечення необхідної достовірності та об'єктивності одержуваних оцінок експеримент має проводитися в умовах, максимально наближених до тих, в яких об'єкт буде функціонувати, при цьому критерій оцінки його якості повинен містити такі вимоги до об'єкту, задоволення яких забезпечить виконання поставленого перед ними завдання.

У зв'язку з цим виникає завдання оптимального планування експерименту в сенсі вибору найкращого плану, тобто плану, що забезпечує при інших рівних умовах найбільшу надійність оцінок якісних характеристик досліджуваного об'єкта.

Так як метою досліджень є підвищення абразивної зносостійкості матеріалу гільзи циліндра автомобільного двигуна, то цілком логічно було вибрати у якості параметра оптимізації  $Y$  абсолютний знос при випробуваннях  $\Delta\Sigma g$ . Даний показник дозволяє однозначно і з достатньою повнотою характеризувати

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 56    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

ефективність об'єкта дослідження. Крім того, він, як параметр оптимізації, задовольняє наступним вимогам:

- є кількісним і визначається одним числом;
- допускає вимірювання при будь-якій можливої комбінації обраних рівнів факторів;
- має ясний фізичний зміст;
- існує для всіх стадій проведення експерименту;
- визначається з достатньою точністю;
- дозволяє зручно і наочно представляти результати експериментів.

Вхідними параметрами (чинниками) були визначені:

#### 1 Технологічні:

1.1 Температура деформації заготовки ( $T_{\text{деф}}$ , °C) задавалася в інтервалі 790-910°C, так як в даному інтервалі температур чавун набуває необхідну технологічну пластичність і відповідає промисловим температур гартування 800-900 °C [38, 39], що дозволяють виконати основний критерій, що характеризує термомеханічне зміцнення, – загартування деформованого і нерекристалізованого аустеніту [61].

1.2 Ступінь деформації заготовки ( $\lambda$ , %) була обрана відповідно до даних досліджень [39, 57] і нижчими її значеннями, які використовуються в технологічному процесі виготовлення підшипників, оскільки сталі марок ШХ за відсотковим вмістом вуглецю найбільш близькі до чавунів і для здійснення експериментів була обрана схема обробки, практично застосовувана чи здійснення на стандартному обладнанні [39], а також з міркувань безпеки проведення експерименту.

1.3 Температура відпускання ( $T_{\text{отп}}$ , °C) прийнята відповідною низькому відпуску з метою уникнення зняття ефекту термомеханічного зміцнення, а також для зменшення залишкових напружень після гартування [38, 39, 62].

#### 2. Експлуатаційні

2.1 Випробувальне навантаження на машині тертя МІ-1М ( $P_{\text{мі}}$ , Н), значення якого варіювалися при випробуваннях зносу від навантажень, відповідних

навантаженню поршневого кільця на стінку гільзи циліндра на початку процесу стиснення і в кінці процесу розширення, до навантажень, що відповідають середньому його значенню в області верхньої мертвої точки в кінці процесу стиснення і на початку робочого ходу поршня.

Всі обрані фактори – кількісні і відповідають вимогам, що пред'являються до вхідних параметрів. А саме: вони керовані, однозначні і безпосередньо впливають на об'єкт дослідження, сумісні і незалежні (є можливість змінювати значення кожного з факторів незалежно один від одного).

Факторний експеримент пов'язаний з варіюванням одночасно всіх факторів і перевіркою достовірності результатів математико-статистичними методами.

## 4.2 Повний факторний експеримент

Для постановки експерименту спочатку було проведено повний факторний експеримент типу  $2^4$ .

Кодування факторів для проведення ПФЕ= $2^4$  наведено в таблиці 4.1.

Розширена матриця планування ПФЕ= $2^4$  і результати дослідів при випробуваннях на знос наведені в таблиці 4.2.

Враховуючи те, що було проведено однакове число паралельних дослідів на кожній комбінації рівнів факторів, відтворюваність перевірялася за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2} \leq G_{(0,05; f_n; f_u)} \quad , \quad (4.1)$$

де  $S_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - \overline{y_u})^2}{m-1}$  – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $u$ -ій комбінації рівнів факторів;

Таблиця 4.1 – Кодування факторів

| Інтервал варіювання та рівень факторів | $T_{\text{деф}}, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, \%$ | $T_{\text{відп}}, ^\circ\text{C}$ | $P_{\text{мі}}, \text{H}$ |
|----------------------------------------|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Нульовий рівень $x_i=0$                | 850                              | 15            | 200                               | 500                       |
| Інтервал варіювання                    | 60                               | 6             | 150                               | 250                       |
| Нижній рівень $x_i=-1$                 | 790                              | 9             | б/о (50)                          | 250                       |
| Верхній рівень $x_i=+1$                | 910                              | 21            | 350                               | 750                       |
| Кодове позначення                      | $X_1$                            | $X_2$         | $X_3$                             | $X_4$                     |

Таблиця 4.2 – Розширена матриця планування ПФЕ =  $2^4$  та результати дослідів

| Дослід | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_1x_2$ | $x_1x_3$ | $x_1x_4$ | $x_2x_3$ | $x_2x_4$ | $x_3x_4$ | $x_1x_2x_3$ | $x_1x_2x_4$ | $x_1x_3x_4$ | $x_2x_3x_4$ | $y_{u1}$ | $y_{u2}$ | $y_{u3}$ | $\bar{y}_u = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ui}}{n}$ |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|---------------------------------------------|
| 1      | -     | -     | -     | -     | +        | +        | +        | +        | +        | +        | -           | -           | -           | -           | 0,0219   | 0,0212   | 0,0211   | 0,0214                                      |
| 2      | +     | -     | -     | -     | -        | -        | -        | +        | +        | +        | +           | +           | +           | -           | 0,0217   | 0,0209   | 0,0207   | 0,0211                                      |
| 3      | -     | +     | -     | -     | -        | +        | +        | -        | -        | +        | +           | +           | -           | +           | 0,0220   | 0,0209   | 0,0210   | 0,0213                                      |
| 4      | +     | +     | -     | -     | +        | -        | -        | -        | -        | +        | -           | -           | +           | +           | 0,0203   | 0,0212   | 0,0209   | 0,0208                                      |
| 5      | -     | -     | +     | -     | +        | -        | +        | -        | +        | -        | +           | -           | +           | +           | 0,0216   | 0,0211   | 0,0212   | 0,0213                                      |
| 6      | +     | -     | +     | -     | -        | +        | -        | -        | +        | -        | -           | +           | -           | +           | 0,0198   | 0,0200   | 0,0208   | 0,0202                                      |
| 7      | -     | +     | +     | -     | -        | -        | +        | +        | -        | -        | -           | +           | +           | -           | 0,0217   | 0,0210   | 0,0209   | 0,0212                                      |
| 8      | +     | +     | +     | -     | +        | +        | -        | +        | -        | -        | +           | -           | -           | -           | 0,0214   | 0,0204   | 0,0206   | 0,0208                                      |
| 9      | -     | -     | -     | +     | +        | +        | -        | +        | -        | -        | -           | +           | +           | +           | 0,2084   | 0,2089   | 0,2100   | 0,2091                                      |
| 10     | +     | -     | -     | +     | -        | -        | +        | +        | -        | -        | +           | -           | -           | +           | 0,2020   | 0,2024   | 0,2034   | 0,2026                                      |
| 11     | -     | +     | -     | +     | -        | +        | -        | -        | +        | -        | +           | -           | +           | -           | 0,2025   | 0,2037   | 0,2040   | 0,2034                                      |
| 12     | +     | +     | -     | +     | +        | -        | +        | -        | +        | -        | -           | +           | -           | -           | 0,2019   | 0,2009   | 0,2008   | 0,2012                                      |
| 13     | -     | -     | +     | +     | +        | -        | -        | -        | -        | +        | +           | +           | -           | -           | 0,2020   | 0,2018   | 0,2013   | 0,2017                                      |
| 14     | +     | -     | +     | +     | -        | +        | +        | -        | -        | +        | -           | -           | +           | -           | 0,2000   | 0,2007   | 0,2011   | 0,2006                                      |
| 15     | -     | +     | +     | +     | -        | -        | -        | +        | +        | +        | -           | -           | -           | +           | 0,1987   | 0,2001   | 0,2003   | 0,1997                                      |
| 16     | +     | +     | +     | +     | +        | +        | +        | +        | +        | +        | +           | +           | +           | +           | 0,1930   | 0,1941   | 0,1940   | 0,1937                                      |

$p = 1, 2 \dots m$  – число паралельних дослідів;

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

$S_{u\max}^2$  – найбільша із дисперсій у строках плану;

$G_{(0,05;f_n;f_u)}$  – табличне значення критерію Кохрену при 5% рівні значущості;

$f_n = n$  – число незалежних оцінок дисперсії ( $n=16$ );

$f_u = m - 1$  – число ступенів вільності кожної оцінки.

$$S_{u1} = 0,190 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u9} = 0,447 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u2} = 0,280 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u10} = 0,347 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u3} = 0,370 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u11} = 0,420 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u4} = 0,210 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u12} = 0,247 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u5} = 0,070 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u13} = 0,087 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u6} = 0,280 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u14} = 0,207 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u7} = 0,190 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u15} = 0,507 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u8} = 0,280 \cdot 10^{-6};$$

$$S_{u16} = 0,247 \cdot 10^{-6}.$$

Так як  $S_{u15} = 0,507 \times 10^{-6}$  – max, то  $G = 0,1158$ . При  $f_n = 16$  і  $f_u = 2$  критерій Кохрена відповідно  $G_{(0,05;16;2)} = 0,3218$ . Отже, умова  $G \leq G_{(0,05;16;2)}$  виконується і процес є відтворюваним.

Дисперсія відтворюваності (помилка досліду) визначалась за формулою:

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 60    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n}, \quad (4.2)$$

$$S_y^2 = 0,2737 \cdot 10^{-6}.$$

Коефіцієнти регресії розраховувались за наступними стандартними формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n}, \quad (4.3)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n}, \quad (4.4)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{n}, \quad (4.5)$$

$$b_{ijz} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} x_{zu} \bar{y}_u}{n}. \quad (4.6)$$

Їх значення становили:

$$b_0 = 0,111256; \quad b_{12} = -0,000006; \quad b_{34} = -0,001219;$$

$$b_1 = -0,001131; \quad b_{13} = 0,000056; \quad b_{123} = -0,000519;$$

$$b_2 = -0,000994; \quad b_{14} = -0,000844; \quad b_{124} = -0,000069;$$

$$b_3 = -0,001356; \quad b_{23} = -0,000056; \quad b_{134} = 0,000144;$$

$$b_4 = 0,090244; \quad b_{24} = -0,001006; \quad b_{234} = -0,000169.$$

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії проводилася за допомогою критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважається значимим, якщо виконується умова

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (4.7)$$

де  $t_{(0,05;f_y)}$  – 5%-а точка розподілу Стьюдента із  $f_y$  ступенями вільності.

У даному випадку  $t_{(0,05; 16)} = 2,12$ . Тоді  $\Delta b_i = 0,000277$ .

Отже, коефіцієнти регресії:

$$b_{12} = -0,000006; \quad b_{124} = -0,000069;$$

$$b_{13} = 0,000056; \quad b_{134} = 0,000144;$$

$$b_{23} = -0,000056; \quad b_{234} = -0,000169 \quad - \text{ незначущі.}$$

Таким чином, отримано рівняння регресії виду:

$$y = 0,111256 - 0,001131X_1 - 0,000994X_2 - 0,001356X_3 + 0,090244X_4 - 0,000844X_1X_4 - 0,001006X_2X_4 - 0,001219X_3X_4 - 0,000519X_1X_2X_3, \quad (4.8)$$

Перевірка адекватності моделі виконувалася за допомогою критерію Фішера. Обґрунтовано адекватність, якщо виконується нерівність

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05;f_{ад},f_y)} \quad (4.9)$$

де  $S_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1}$  – дисперсія адекватності;

$y_u$  – розрахункове значення відгуку в  $u$ -тому досліді;

$F_{(0,05;f_{ад},f_y)}$  – критерій Фішера при 5%-му рівні значущості;

$f_{ад} = n - k - 1$  – число ступенів вільності дисперсії адекватності;

$f_y$  – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

Спочатку перевірялася адекватність лінійної моделі, яка має вид

$$y = 0,11125 - 0,001131X_1 - 0,000994X_2 - 0,0013556X_3 + 0,090244X_4, \quad (4.10)$$

При цьому були отримані наступні розрахункові значення  $y_u$ , що наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахункові значення величини зносу  $y_u$

| Дослід | $\bar{y}$ | $y_u$  | $(\bar{y} - y_u)^2 \times 10^{-6}$ | Дослід | $\bar{y}$ | $y_u$  | $(\bar{y} - y_u)^2 \times 10^{-6}$ |
|--------|-----------|--------|------------------------------------|--------|-----------|--------|------------------------------------|
| 1      | 0,0214    | 0,0245 | 9,60                               | 9      | 0,2091    | 0,2050 | 16,80                              |
| 2      | 0,0211    | 0,0222 | 1,20                               | 10     | 0,2026    | 0,2027 | 0,01                               |
| 3      | 0,0213    | 0,0225 | 1,44                               | 11     | 0,2034    | 0,2030 | 0,16                               |
| 4      | 0,0208    | 0,0202 | 0,36                               | 12     | 0,2012    | 0,2007 | 0,25                               |
| 5      | 0,0213    | 0,0218 | 0,25                               | 13     | 0,2017    | 0,2023 | 0,36                               |
| 6      | 0,0202    | 0,0195 | 0,49                               | 14     | 0,2006    | 0,2000 | 0,36                               |
| 7      | 0,0212    | 0,0198 | 1,96                               | 15     | 0,1997    | 0,2003 | 0,36                               |
| 8      | 0,0208    | 0,0175 | 10,80                              | 16     | 0,1937    | 0,1980 | 18,40                              |

Тоді  $S_{ад}^2 = 5,709 \cdot 10^{-6}$ ,  $F = 20,859$ .

Оскільки табличне значення критерію Фішера, обчислене за допомогою лінійної апроксимації, становить  $F_{(0,05; 11; 16)} = 2,459$ , умова не виконується. Отже, лінійна модель (4.10) неадекватна.

В результаті постановки повного факторного експерименту було отримано рівняння регресії. Однак його лінійна модель неадекватно описує функцію відгуку в заданій обмеженій області факторного простору.

### 4.3 Метод руху за градієнтом

Для уточнення області оптимуму були проведені розрахунки методом руху за градієнтом зі зміною факторів пропорційно отриманим відповідним коефіцієнтам регресії [72]. Дані розрахунків наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Розрахунок методом руху за градієнтом

| Рівень варіювання та<br>рівень факторів                 | $X_1$     | $X_2$     | $X_3$     | $X_4$    | $y$ |
|---------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----|
| 1                                                       | 2         | 3         | 4         | 5        | 6   |
| Нульовий рівень $x_i = 0$                               | 910       | 21        | 350       | 250      |     |
| Інтервал варіювання $\delta_i$                          | 60        | 6         | 150       | 10*      |     |
| Коефіцієнт регресії $b_i$                               | -0,001131 | -0,000994 | -0,001356 | 0,090244 |     |
| $b_i \cdot \delta_i$                                    | -0,067860 | -0,005964 | -0,203400 | 0,902440 |     |
| Пропорційний перерахунок<br>на зміну $X_2$ , рівний 150 | -10,18    | -1        | -50       | 100      |     |

Продовження таблиці 4.4

| 1                 | 2   | 3  | 4   | 5   | 6      |
|-------------------|-----|----|-----|-----|--------|
| Досліди:          |     |    |     |     |        |
| 1 (реалізований)  | 910 | 21 | 350 | 100 | 0,0208 |
| 2 (уявний)        | 900 | 20 | 350 |     | -      |
| 3 (уявний)        | 890 | 19 | 300 | 250 | -      |
| 4 (уявний)        | 880 | 18 | 300 | 250 | -      |
| 5 (реалізований)  | 870 | 17 | 250 | 350 | 0,0208 |
| 6 (уявний)        | 860 | 16 | 250 | 350 | -      |
| 7 (уявний)        | 850 | 15 | 200 | 450 | -      |
| 8 (уявний)        | 840 | 14 | 200 | 450 | -      |
| 9 (реалізований)  | 830 | 13 | 150 | 550 | 0,0267 |
| 10 (уявний)       | 820 | 12 | 150 | 550 | -      |
| 11 (уявний)       | 810 | 11 | 100 | 550 | -      |
| 12 (уявний)       | 800 | 10 | 100 | 650 | -      |
| 13 (реалізований) | 790 | 9  | 50  | 650 | 0,2091 |
|                   |     |    |     | 750 |        |
|                   |     |    |     | 750 |        |

\* – величина інтервалу варіювання  $X_4$  прийнята для більш ефективного проведення розрахунку методом руху за градієнтом.

#### 4.4 Ортогональний план другого порядку

Поблизу екстремуму, як правило, поверхня відгуку має значну кривизну і не може бути адекватно описана лінійним чи неповним квадратним рівнянням навіть у дуже вузькій області. У цих випадках, керуючись загальною ідеєю крокового експерименту, необхідно намагатися описати досліджувану поверхню відгуку повним рівнянням другого ступеня [72].

Відповідно до [73], запропоновано використовувати ортогональні плани першого порядку в якості ядра, на якому потім добудовується конструкція плану другого порядку. Такі плани отримали назву композиційних і повністю відповідають ідеї крокової процедури.

На підставі результатів повного факторного експерименту ( $\text{ПФЕ} = 2^4$ ) впливає, що лінійна модель (4.10) не адекватна за критерієм Фішера.

Оскільки перевірка за критерієм Кохрена показала, що процес відтворюємий, то в подальших розрахунках використовувалася дисперсія відтворюваності (величина помилки досліду) з  $\text{ПФЕ} = 2^4$   $S_y^2 = 0,2737 \cdot 10^{-6}$ .

Серія дослідів при русі за градієнтом показала, що область оптимальності лежить в інтервалі  $T_{\text{деф}} = 830 \dots 910^\circ\text{C}$  і  $P_{\text{мі}} = 350 \dots 650 \text{ Н}$ .

Виходячи з вищесказаного, для побудови моделі другого ступеня змінили нижній і 0-вий рівні початкової матриці планування  $\text{ПФЕ} = 2^4$ , добудували її до плану другого порядку і поставили досліди на новому нульовому рівні і на відстані  $d$  від центру (таблиці 4.5, 4.6).

Таблиця 4.5 – Дані для визначення умов досліду

| Інтервал варіювання та рівень факторів | $T_{\text{деф}}, ^\circ\text{C}$<br>( $X_1$ ) | $\lambda, \%$<br>( $X_2$ ) | $T_{\text{відп}}, ^\circ\text{C}$<br>( $X_3$ ) | $P_{\text{мі}}, \text{Н}$<br>( $X_4$ ) |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Нульовий рівень $x_i=0$                | 870                                           | 15                         | 200                                            | 500                                    |
| Інтервал варіювання $\delta_i$         | 40                                            | 6                          | 150                                            | 150                                    |
| $\delta_i \times d$ ( $d = 1,4142$ )   | 56,57 (55)                                    | 8,48 (8)                   | 212,1 (200)                                    | 212,1 (200)                            |
| Зоряні точки: $x_i=-d$                 | 815                                           | 7                          | б/о (0)                                        | 300                                    |
| $x_i=+d$                               | 925                                           | 23                         | 400                                            | 700                                    |
| Нижній рівень $x_i=-1$                 | 830                                           | 9                          | б/о (50)                                       | 350                                    |
| Верхній рівень $x_i=+1$                | 910                                           | 21                         | 350                                            | 650                                    |

Таблиця 4.6 – Центральне композиційне ортогональне планування другого порядку для  $k=4$  (умови та результати)

| Дослід             | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_1^2-4/5$ | $x_2^2-4/5$ | $x_3^2-4/5$ | $x_4^2-4/5$ | $x_1x_2$ | $x_1x_3$ | $x_1x_4$ | $x_2x_3$ | $x_2x_4$ | $x_3x_4$ | y      |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| ПФЕ=2 <sup>4</sup> |       |       |       |       |             |             |             |             |          |          |          |          |          |          |        |
| 1                  | -     | -     | -     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | +        | +        | +        | +        | +        | 0,0222 |
| 2                  | +     | -     | -     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | -        | -        | +        | +        | +        | 0,0221 |
| 3                  | -     | +     | -     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | +        | +        | -        | -        | +        | 0,0213 |
| 4                  | +     | +     | -     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | -        | -        | -        | -        | +        | 0,0217 |
| 5                  | -     | -     | +     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | -        | +        | -        | +        | -        | 0,0219 |
| 6                  | +     | -     | +     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | +        | -        | -        | +        | -        | 0,0217 |
| 7                  | -     | +     | +     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | -        | +        | +        | -        | -        | 0,0206 |
| 8                  | +     | +     | +     | -     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | +        | -        | +        | -        | -        | 0,0211 |
| 9                  | -     | -     | -     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | +        | -        | +        | -        | -        | 0,0433 |
| 10                 | +     | -     | -     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | -        | +        | +        | -        | -        | 0,0430 |
| 11                 | -     | +     | -     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | +        | -        | -        | +        | -        | 0,0417 |
| 12                 | +     | +     | -     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | -        | +        | -        | +        | -        | 0,0425 |
| 13                 | -     | -     | +     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | -        | -        | -        | -        | +        | 0,0426 |
| 14                 | +     | -     | +     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | +        | +        | -        | -        | +        | 0,0425 |
| 15                 | -     | +     | +     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | -        | -        | -        | +        | +        | +        | 0,0405 |
| 16                 | +     | +     | +     | +     | 1/5         | 1/5         | 1/5         | 1/5         | +        | +        | +        | +        | +        | +        | 0,0414 |
| Зоряні точки       |       |       |       |       |             |             |             |             |          |          |          |          |          |          |        |
| 17                 | -1,41 | 0     | 0     | 0     | 6/5         | -4/5        | -4/5        | -4/5        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0233 |
| 18                 | +1,41 | 0     | 0     | 0     | 6/5         | -4/5        | -4/5        | -4/5        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0243 |
| 19                 | 0     | -1,41 | 0     | 0     | -4/5        | 6/5         | -4/5        | -4/5        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0252 |
| 20                 | 0     | +1,41 | 0     | 0     | -4/5        | 6/5         | -4/5        | -4/5        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0239 |
| 21                 | 0     | 0     | -1,41 | 0     | -4/5        | -4/5        | 6/5         | -4/5        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0249 |
| 22                 | 0     | 0     | +1,41 | 0     | -4/5        | -4/5        | 6/5         | -4/5        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0252 |
| 23                 | 0     | 0     | 0     | -1,41 | -4/5        | -4/5        | -4/5        | 6/5         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0178 |
| 24                 | 0     | 0     | 0     | +1,41 | -4/5        | -4/5        | -4/5        | 6/5         | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0488 |
| Нульова точка      |       |       |       |       |             |             |             |             |          |          |          |          |          |          |        |
| 25                 | 0     | 0     | 0     | 0     | -4/5        | -4/5        | -4/5        | -4/5        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0,0227 |

Використовуючи формулу

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}, \quad (4.11)$$

а також дані таблиці 17 [130], було визначено значення коефіцієнтів регресії за результатами плану другого порядку:

$$b_0' = 0,0299; \quad b_{1'1} = 0,9075 \cdot 10^{-3}; \quad b_{13} = 0,0187 \cdot 10^{-3};$$

$$b_1 = 0,1655 \cdot 10^{-3}; \quad b_{2'2} = 1,4175 \cdot 10^{-3}; \quad b_{14} = 0,0437 \cdot 10^{-3};$$

$$b_2 = -0,5170 \cdot 10^{-3}; \quad b_{3'3} = 1,6675 \cdot 10^{-3}; \quad b_{23} = -0,1062 \cdot 10^{-3};$$

$$b_3 = -0,2540 \cdot 10^{-3}; \quad b_{4'4} = 5,7925 \cdot 10^{-3}; \quad b_{24} = -0,1312 \cdot 10^{-3};$$

$$b_4 = 10,437 \cdot 10^{-3}; \quad b_{12} = 0,2062 \cdot 10^{-3}; \quad b_{34} = -0,0937 \cdot 10^{-3}.$$

За цими даними рівняння регресії може бути записано у виді:

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 68    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

$$y = 0,0299 + \left( \begin{aligned} &0,1655X_1 - 0,517X_2 - 0,254X_3 + 10,437X_4 + 0,9075(X_1^2 - 4/5) + \\ &+ 1,4175(X_2^2 - 4/5) + 1,6675(X_3^2 - 4/5) + 5,7925(X_4^2 - 4/5) + \\ &+ 0,2062X_1X_2 + 0,0187X_1X_3 + 0,0437X_1X_4 - 0,1062X_2X_3 - \\ &- 0,1312X_2X_4 - 0,0937X_3X_4 \end{aligned} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (4.12)$$

Для переходу до звичайної форми запису визначалася величина

$$b_0 = b_0 - \sum_{1 \leq i \leq k} \varphi b_{i1} \quad (4.13)$$

Тоді  $b_0 = 0,0220$ . Таким чином, рівняння (4.12) можна записати у виді

$$y = 0,0220 + \left( \begin{aligned} &0,1655X_1 - 0,517X_2 - 0,254X_3 + 10,437X_4 + 0,9075X_1^2 + 1,4175X_2^2 + \\ &+ 1,6675X_3^2 + 5,9725X_4^2 + 0,2062X_1X_2 + 0,0187X_1X_3 + 0,0437X_1X_4 - \\ &- 0,1062X_2X_3 - 0,1312X_2X_4 - 0,0937X_3X_4 \end{aligned} \right) \cdot 10^{-3}. \quad (4.14)$$

Значимість нових коефіцієнтів регресії оцінювалася за допомогою критерію Ст'юдента згідно з умовою (4.7) при  $t_{(0,05; 16)} = 2,12$ . Таким чином, коефіцієнти регресії:

$$b_{13} = 0,0187 \cdot 10^{-3}; \quad b_{14} = 0,0437 \cdot 10^{-3};$$

$$b_{23} = 0,1062 \cdot 10^{-3}; \quad b_{24} = 0,1312 \cdot 10^{-3};$$

$$b_{34} = 0,0937 \cdot 10^{-3} - \text{прийнято було рахувати незначущими.}$$

Отже, у такому випадку, рівняння регресії прийняло наступного виду:

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 69    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

$$y = 0,0220 + \left( 0,1655X_1 - 0,517X_2 - 0,254X_3 + 10,437X_4 + 0,9075X_1^2 + \right. \\ \left. + 1,4175X_2^2 + 1,6675X_3^2 + 5,7925X_4^2 + 0,2062X_1X_2 \right) \cdot 10^{-3}. \quad (4.15)$$

Адекватність отриманої математичної моделі оцінювалася за критерієм Фішера згідно з умовою (4.9). У даному випадку число ступенів свободи дисперсії адекватності визначалося як

$$f_{ad} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}. \quad (4.16)$$

За рівнянням регресії (4.15) знайдено розрахункові значення  $y_u$  (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7 – Розрахункові значення величини зносу  $y_u$

| Дослід | $y_{u\text{ ср}}$ | $y_u$   | $(y_{u\text{ ср}} - y_u)^2 \times 10^{-8}$ | Дослід | $y_{u\text{ ср}}$ | $y_u$   | $(y_{u\text{ ср}} - y_u)^2 \times 10^{-8}$ |
|--------|-------------------|---------|--------------------------------------------|--------|-------------------|---------|--------------------------------------------|
| 1      | 0,0222            | 0,02216 | 0,16                                       | 14     | 0,0425            | 0,04244 | 0,36                                       |
| 2      | 0,0221            | 0,02208 | 0,04                                       | 15     | 0,0405            | 0,04108 | 33,64                                      |
| 3      | 0,0213            | 0,02071 | 34,81                                      | 16     | 0,0414            | 0,04182 | 17,64                                      |
| 4      | 0,0217            | 0,02146 | 5,76                                       | 17     | 0,0233            | 0,02358 | 7,84                                       |
| 5      | 0,0219            | 0,02165 | 6,25                                       | 18     | 0,0243            | 0,02405 | 6,25                                       |
| 6      | 0,0217            | 0,02157 | 1,69                                       | 19     | 0,0252            | 0,02557 | 13,69                                      |
| 7      | 0,0206            | 0,02021 | 15,21                                      | 20     | 0,0239            | 0,02410 | 4,00                                       |
| 8      | 0,0211            | 0,02095 | 2,25                                       | 21     | 0,0249            | 0,02569 | 62,41                                      |
| 9      | 0,0433            | 0,04303 | 7,29                                       | 22     | 0,0252            | 0,02498 | 4,84                                       |
| 10     | 0,0430            | 0,04295 | 0,25                                       | 23     | 0,0178            | 0,01883 | 106,09                                     |
| 11     | 0,0417            | 0,04159 | 1,21                                       | 24     | 0,0488            | 0,04834 | 21,16                                      |
| 12     | 0,0425            | 0,04223 | 7,29                                       | 25     | 0,0227            | 0,02200 | 49,00                                      |
| 13     | 0,0426            | 0,04253 | 0,49                                       |        |                   |         |                                            |

Отже,  $f_{ad}=10$ . Тоді  $S_{ad}^2=0,4096 \times 10^{-6}$  і критерій Фішера  $F=1,4966$ . При табличних значеннях як  $F_{(0,05; 10; 25)}=2,2365$ , так і  $F_{(0,05; 10; 16)}=2,4935$  (оскільки використовувалась дисперсія відтворюваності з ПФЕ  $= 2^4 S_y^2=0,2737 \cdot 10^{-6}$ ), умова критерію Фішера виконується. Отже, отримана математична модель (4.15) є адекватною.

#### 4.5 Дослідження зносостійкості матеріалу після термомеханічного зміцнення

Значну увагу питанням вивчення зносу і зносостійкості було приділено в наукових працях В.Д. Кузнецова. Матеріали його досліджень за багато років підтверджені теорією і практикою. Це цілком обґрунтовано, дає можливість взяти за основу цих досліджень зносостійкості деякі положення його праць.

Так, у роботі [74] В.Д. Кузнецов вказує, що для руйнування тіла (розривом, стиском, зсувом, сколюванням і т. д.) необхідно затратити певну енергію для доведення в ньому пружних напруг до певного значення і потім затратити енергію на сам процес руйнування, тобто на процес утворення нових поверхонь. Процес зношування матеріалів деталей (зразка і контрзразка) при взаємному терті повністю відповідає даним твердженням. Крім того, він дає наступне визначення зносостійкості: „Зносостійкість вимірюється відношенням роботи, витраченої на видалення маси, до цієї маси”, що узгоджується із положеннями ДСТУ 2823-94 [64].

Виходячи із вищесказаного, для оцінки зносостійкості досліджуваного і контрольного матеріалів було прийнято використовувати відношення роботи сил тертя, що витрачається на видалення одиниці маси матеріалу, до цієї маси, що виражається формулою

$$A = \frac{P_{\text{тр}} \cdot s}{\sum \Delta g}, \quad (4.17)$$

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 71    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

де  $A$  – робота сил тертя, Дж/г;

$P_{\text{тр}}$  – сила тертя, Н;

$s$  – шлях тертя, м;

$\sum \Delta g$  – загальне значення втрати маси, г, зразка при визначенні величини зносу ваговим методом.

За умовою підтримки під час випробувань сили тертя на постійному рівні та незмінному шляху тертя маємо вираз

$$A_{\text{уд}} = \frac{C}{\sum \Delta g}, \quad (4.18)$$

де  $A_{\text{уд}}$  – питома робота сил тертя щодо видалення одиниці матеріалу, Дж/г;

$C$  – коефіцієнт, що враховує умови випробувань, Дж.

Таким чином, за умови сталості складових роботи сил тертя, між питомою роботою сил тертя та зношуванням при абразивному зношуванні існує залежність, яка є обернено пропорційною.

Розрахункові значення загальної втрати маси  $\sum \Delta g$ , г, були отримані з використанням інтегрованого математичного моделювання MATLAB. Для реалізації розрахунків була застосована спеціальна програма.

Масиви даних, отримані в результаті розрахунків, дозволили проаналізувати значення загальної втрати маси зразків  $\sum \Delta g$  при всіх можливих комбінаціях технологічних параметрів термомеханічного зміцнення і випробувальних навантажень. Це дало можливість використовувати розрахункові дані для побудови необхідних графічних залежностей.

Аналіз графіків залежностей  $\sum \Delta g = f(P_{\text{мі}})$  (рисунок 4.1-4.3, а) показує, що при одних і тих же випробувальних навантаженнях загальна втрати маси зразків  $\sum \Delta g$  має найбільші значення у зразків із промислових гільз, загартованих СВЧ. Мінімальні значення загальної втрати маси зразків  $\sum \Delta g$  відповідають режиму термомеханічного зміцнення: температура деформації  $T_{\text{деф}} = 870^\circ\text{C}$  (рисунок 4.1, а),

ступінь деформації  $\lambda = 17\%$  (рисунок 4.2, а), температура відпускання  $T_{\text{отп}} = 200^{\circ}\text{C}$  (рисунок 4.3, а).

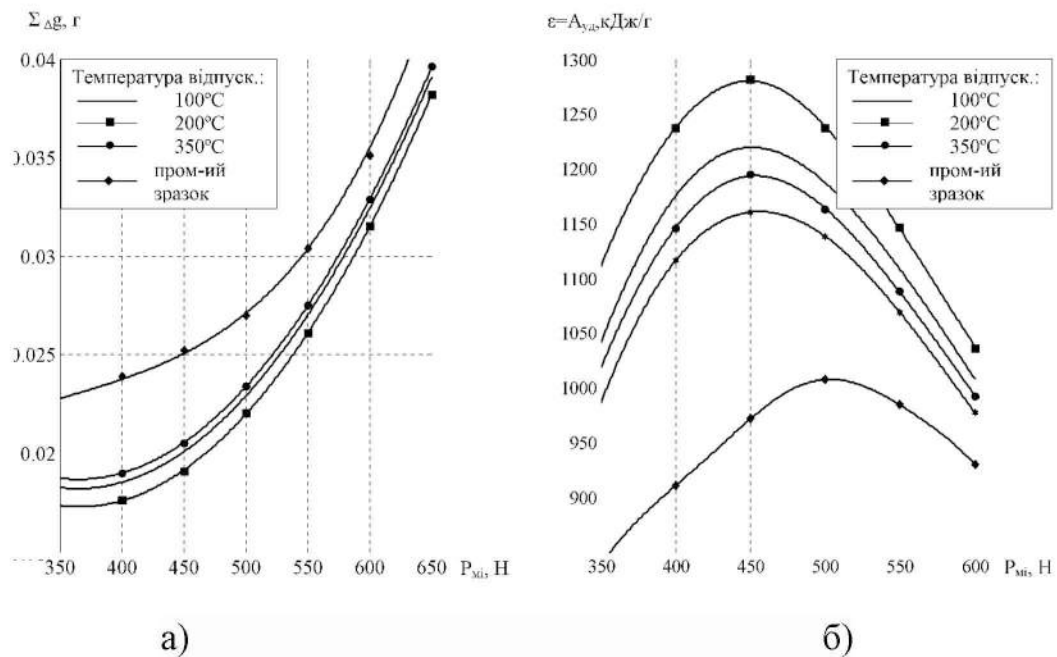


Рисунок 4.1 – Залежність зміни маси зразків (а) і величини питомої роботи сили тертя (б) відносно випробувального навантаження  $P_{\text{м}}$  (для температури деформації  $T_{\text{деф}} = 870^{\circ}\text{C}$  і ступеня деформування  $\lambda = 17\%$ )

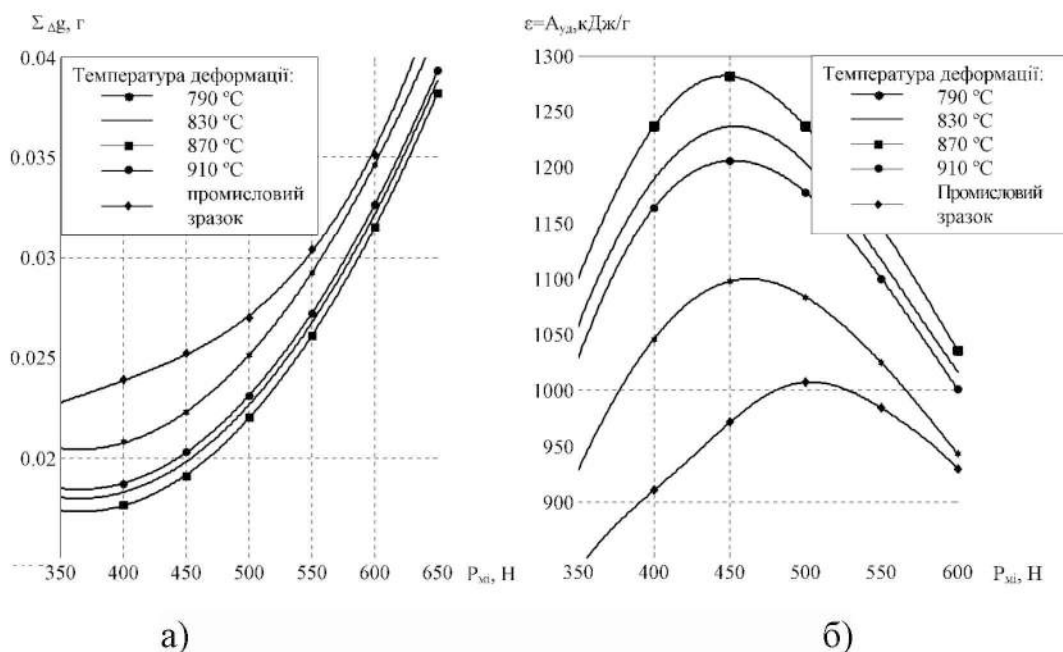


Рисунок 4.2 – Залежність зміни маси зразків (а) і величини питомої роботи сили тертя (б) відносно випробувального навантаження  $P_{\text{м}}$  (для ступеня деформування  $\lambda = 17\%$  і температури відпускання  $T_{\text{відп}} = 200^{\circ}\text{C}$ )

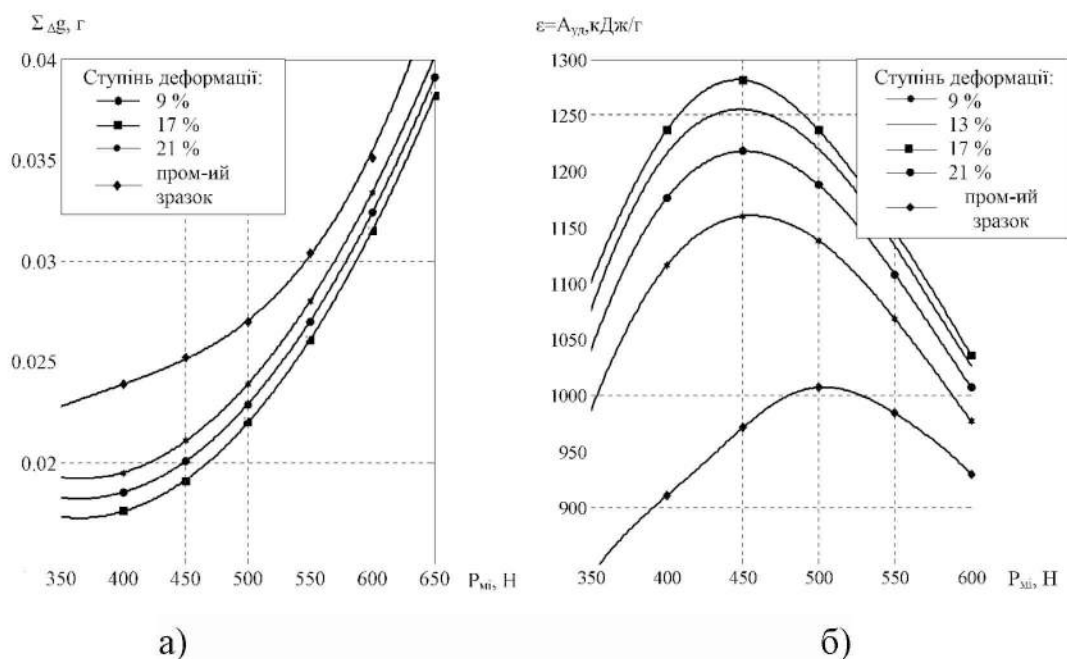


Рисунок 4.3 – Залежність зміни маси зразків (а) і величини питомої роботи сили тертя (б) відносно випробувального навантаження  $P_{mi}$  (для температури деформації  $T_{деф}=870^{\circ}\text{C}$  і температури відпускання  $T_{відп}=200^{\circ}\text{C}$ )

На графіках  $A_{уд} = f(P_{mi})$ , побудованих на основі вищевказаних залежностей (рисунок 4.1-4.3) видно, що характер зносостійкості змінюється, відповідно, у зворотному порядку. Слід зауважити, що максимальні значення зносостійкості  $\epsilon = A_{уд}$  практично при всіх режимах термомеханічного зміцнення відповідає навантаженню  $P_{mi} = 450$  Н (в реальних умовах експлуатації відповідає тиску верхнього поршневого кільця на дзеркало гільзи циліндра  $\approx 1,0-1,5$  МПа), а максимальна зносостійкість зразків із промислових гільз циліндрів припадає на випробувальну навантаження  $P_{mi} = 500$  Н (в реальних умовах експлуатації  $\approx 1,2 \dots 1,8$  МПа). Але і при цьому навантаженні розрахункова зносостійкість  $\epsilon = A_{уд}$  для режимів термомеханічного зміцнення (рисунок 4.1-4.3, б) вище на 12-22%.

Зміна величини загальної втрати маси зразків  $\Sigma\Delta g$  при різних поєднаннях технологічних параметрів термомеханічного зміцнення носить аналогічний характер як при випробувальному навантаженні  $P_{mi} = 500$  Н (рисунок 4.4-4.6), так і для випробувального навантаження  $P_{mi} = 450$  Н (рисунок 4.7-4.10, а). Область

екстремуму на графіках припадає на інтервал температури деформації  $T_{\text{деф}} = 850-880\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ступеня деформації  $\lambda = 14-18\%$  і температури відпускання  $T_{\text{відп}} = 170-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

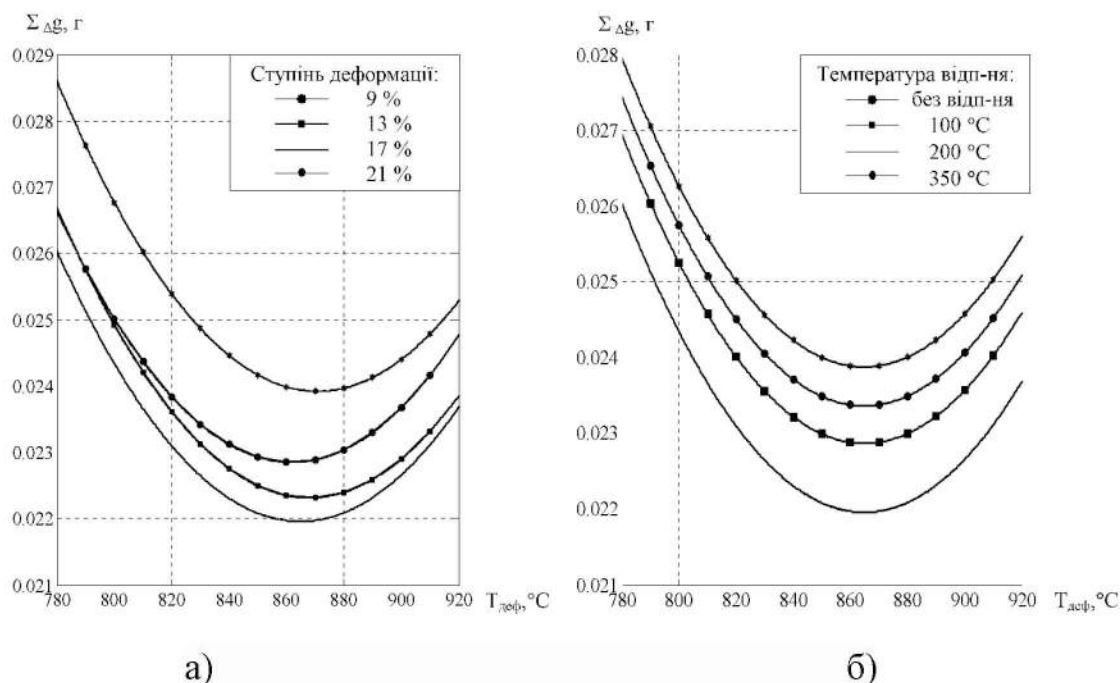


Рисунок 4.4 – Залежність зміни маси зразків від температури деформації (при випробувальному навантаженні  $P_{\text{мі}} = 500\text{ Н}$ ): а – для температури відпускання  $T_{\text{відп}} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; б – для ступеня деформації  $\lambda = 17\%$

Графіки залежностей  $\epsilon = A_{\text{уд}}$  від технологічних параметрів термомеханічного зміцнення (рисунок 4.7-4.10, б), мають характер, обернено пропорційний, що і було обумовлено співвідношенням (4.18). Область екстремуму на цих графіках знаходиться відповідно в тому ж діапазоні значень технологічних параметрів термомеханічного зміцнення.

Характер графіків залежностей загальної втрати маси зразків  $\Sigma \Delta g$  від різних технологічних параметрів термомеханічного зміцнення відповідає математичній моделі (4.15).

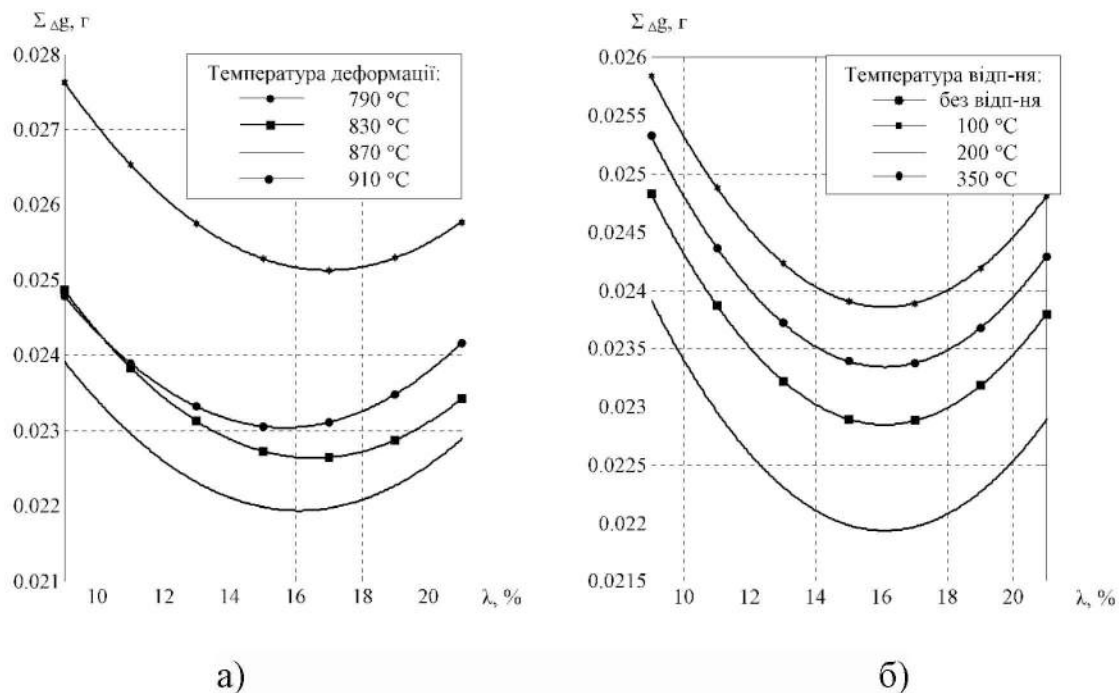


Рисунок 4.5 – Залежність зміни маси зразків від температури деформації (при випробувальному навантаженні  $P_{mi} = 500$  Н): а – для температури відпускання  $T_{вдп} = 200$  °С; б – для температури деформації  $T_{деф} = 870$  °С

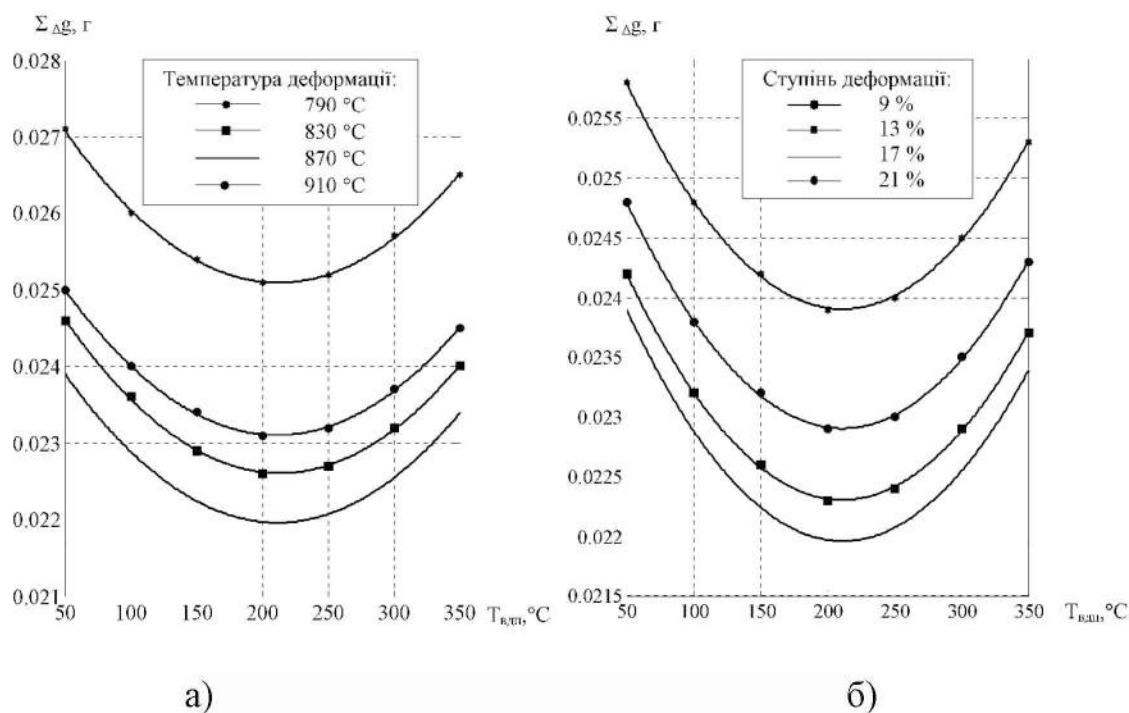


Рисунок 4.6 – Залежність зміни маси зразків від температури деформації (при випробувальному навантаженні  $P_{mi} = 500$  Н): а – для ступеня деформації  $\lambda = 17$  %; б – для температури деформації  $T_{деф} = 870$  °С

Мінімальне значення загальної втрати маси зразків з усього переліку поєднань технологічних параметрів в області дослідження, визначеною центральним композиційним ортогональним планом другого порядку, що відповідає температурам деформації  $T_{\text{деф}} = 860-870^{\circ}\text{C}$ , ступеня деформації  $\lambda = 17\%$  і температурі відпускання  $T_{\text{вдп}} = 200^{\circ}\text{C}$  при випробувальному навантаженні  $P_{\text{мі}} = 350 \text{ Н}$  (в реальних умовах експлуатації –  $\approx 0,7-1,3 \text{ МПа}$ ) і становить  $\Sigma\Delta g = 0,0173 \text{ г}$ .

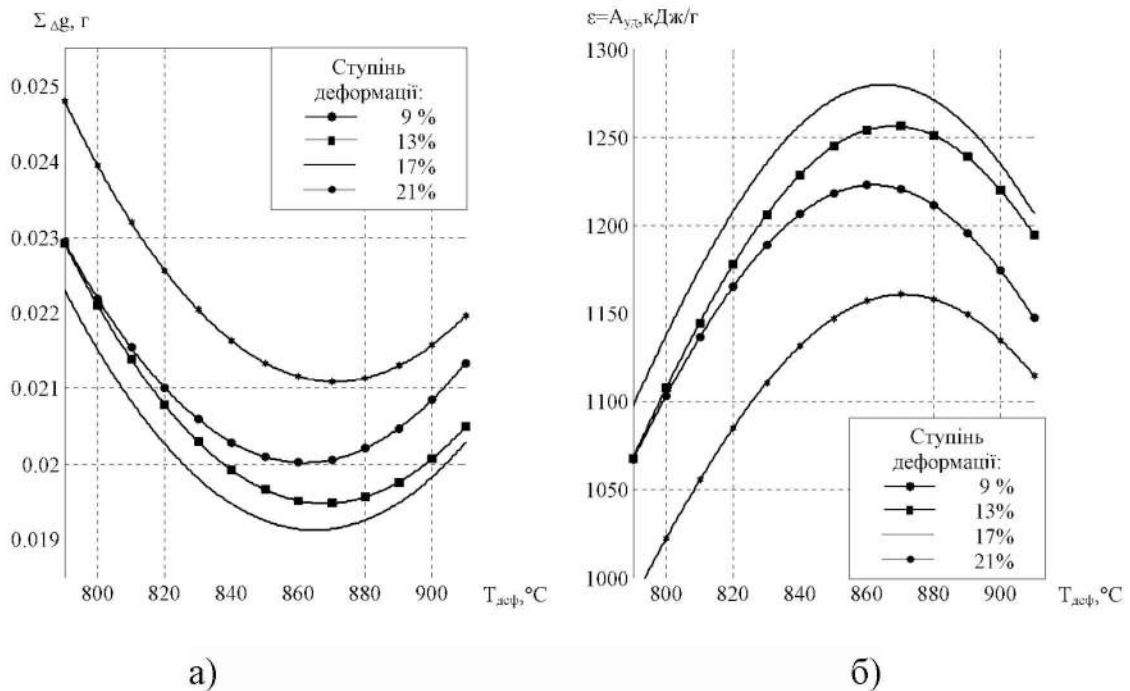
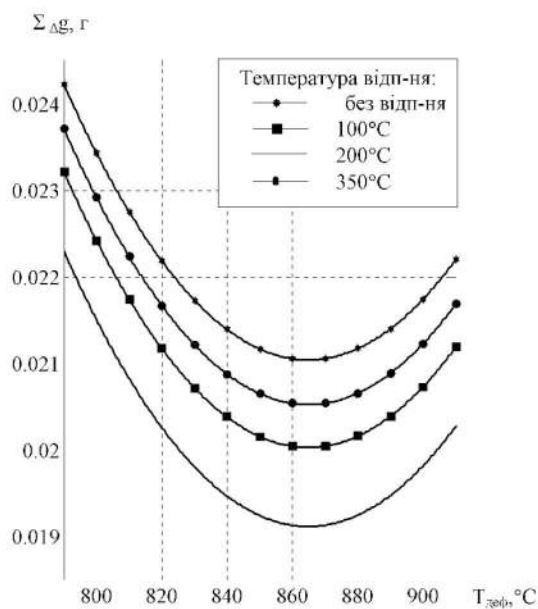


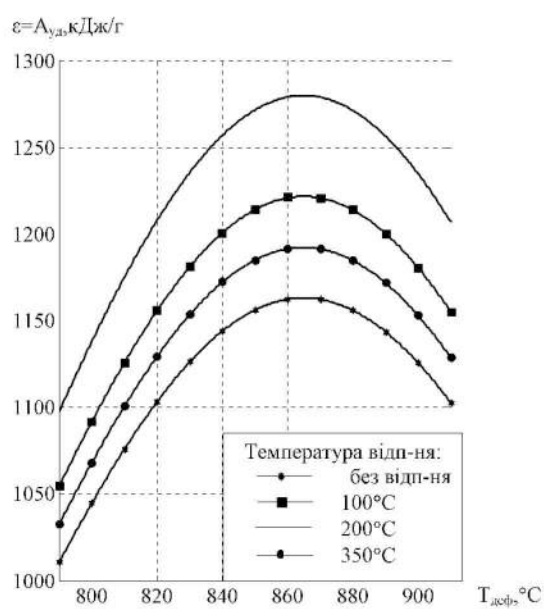
Рисунок 4.7 – Залежність зміни маси зразків (а) і величини питомої роботи сили тертя (б) від ступеня деформації  $\lambda$  (для температури відпускання  $T_{\text{вдп}} = 200^{\circ}\text{C}$  при випробувальному навантаженні  $P_{\text{мі}} = 450 \text{ Н}$ )

Поверхня відгуку, яка описується математичною моделлю (4.15) для визначення загальної втрати маси зразків  $\Sigma\Delta g$ , має форму гіперболічного параболоїда (рисунок 4.11-4.13) і відповідає розглянутим вище режимів зміцнення. Її проекція на опорну координатну площину наочно окреслює область оптимального поєднання технологічних параметрів термомеханічного зміцнення, що дозволяють досягти максимальної зносостійкості досліджуваного чавуну при даному виді зміцнення у змодельованих умовах тертя та зношування.

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

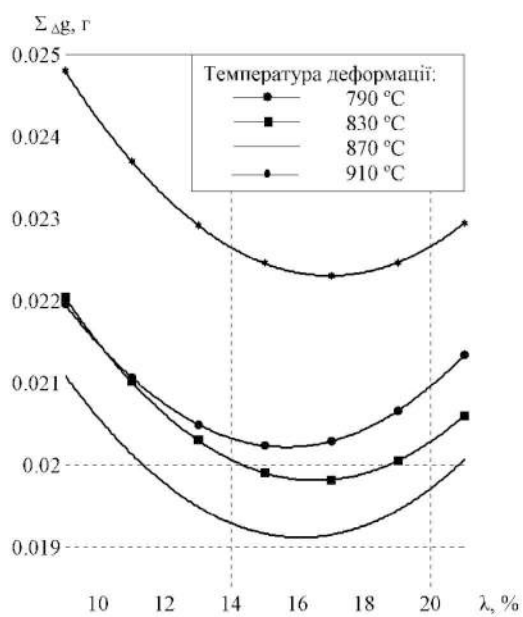


а)

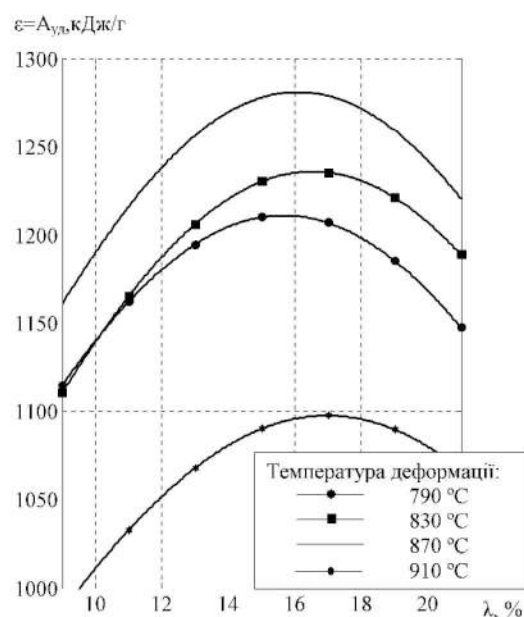


б)

Рисунок 4.8 – Залежність зміни маси зразків (а) і величини питомої роботи сили тертя (б) від температури деформації  $T_{\text{деф}}$  (для ступеня деформації  $\lambda = 17\%$  при випробувальному навантаженні  $P_{\text{мі}} = 450 \text{ Н}$ )

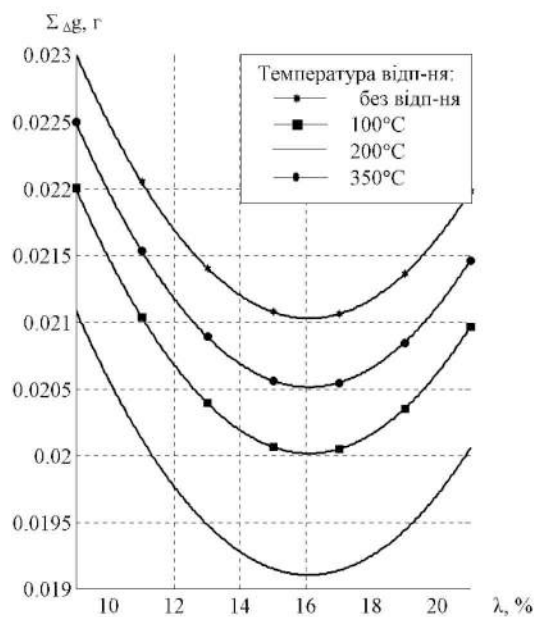


а)

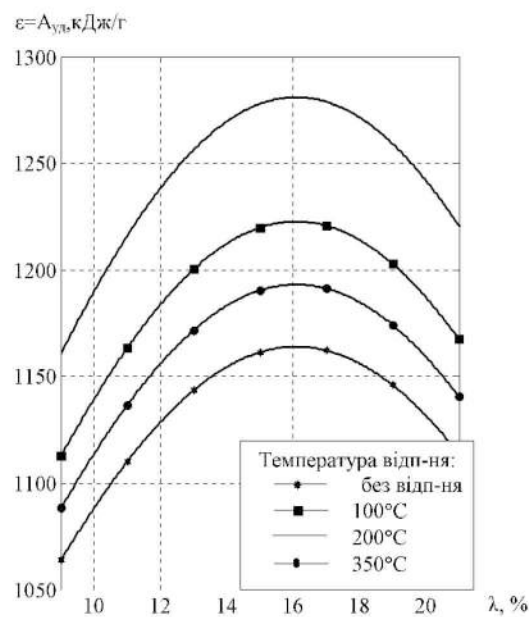


б)

Рисунок 4.9 – Залежність зміни маси зразків (а) і величини питомої роботи сили тертя (б) від ступеня деформації  $\lambda$  (для температури відпускання  $T_{\text{вдп}} = 200^\circ\text{C}$  при випробувальному навантаженні  $P_{\text{мі}} = 450 \text{ Н}$ )



а)



б)

Рисунок 4.10 – Залежність зміни маси зразків (а) і величини питомої роботи сили тертя (б) від ступеня деформації  $\lambda$  (для температури деформації  $T_{\text{деф}} = 870^\circ\text{C}$  при випробувальному навантаженні  $P_{\text{мі}} = 450 \text{ Н}$ )

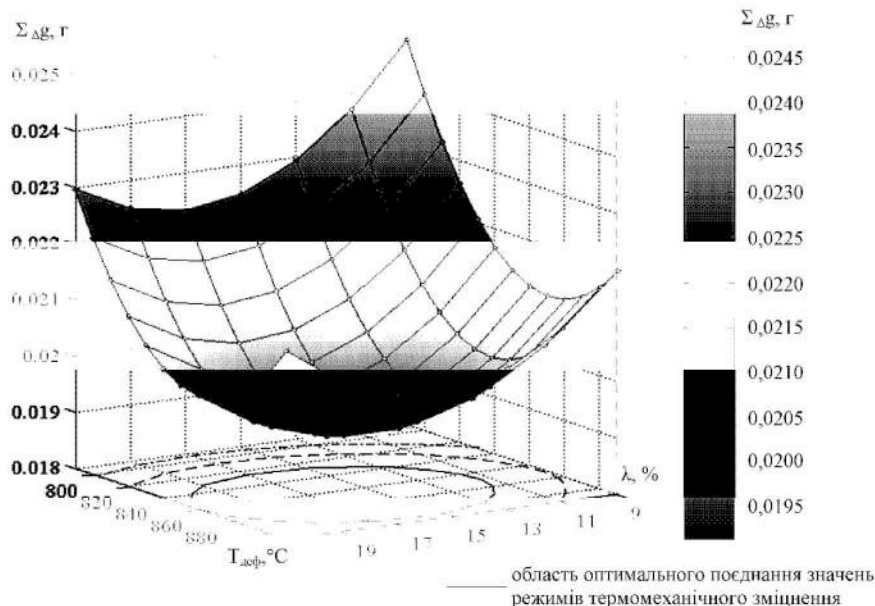


Рисунок 4.11 – Область оптимального поєднання значень технологічних режимів термомеханічного зміцнення: температури деформації ( $T_{\text{деф}}, ^\circ\text{C}$ ) і ступеня деформації ( $\lambda, \%$ ). Температура відпускання  $T_{\text{вдп}} = 200^\circ\text{C}$ , випробувальне навантаження  $P_{\text{мі}} = 450 \text{ Н}$

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

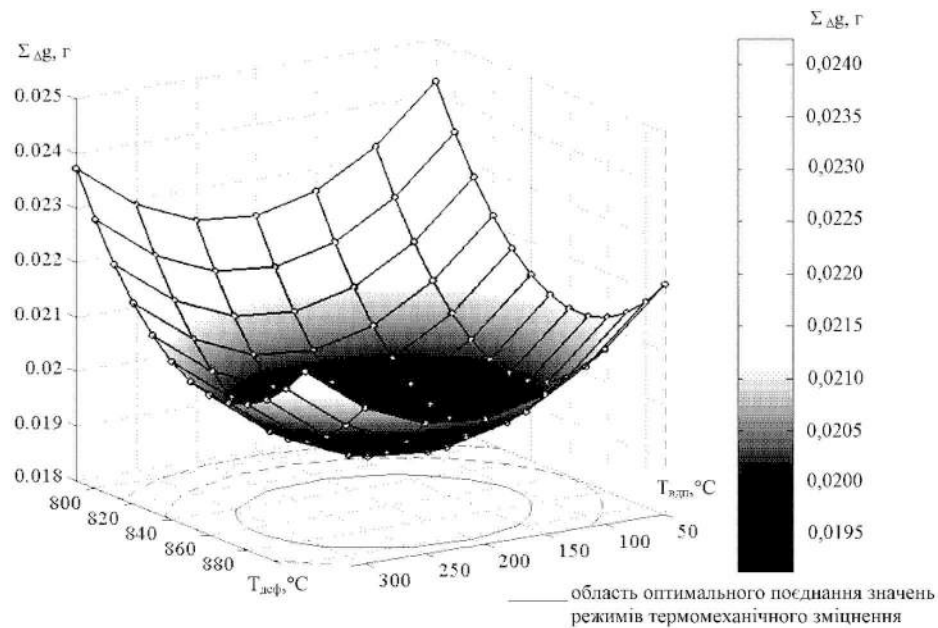


Рисунок 4.12 – Область оптимального поєднання значень технологічних режимів термомеханічного зміцнення: температури деформації ( $T_{\text{деф}}, ^\circ\text{C}$ ) і температури відпускання ( $T_{\text{вдп}}, ^\circ\text{C}$ ). Ступінь деформації  $\lambda = 17\%$ , випробувальне навантаження  $P_{\text{мі}} = 450 \text{ Н}$

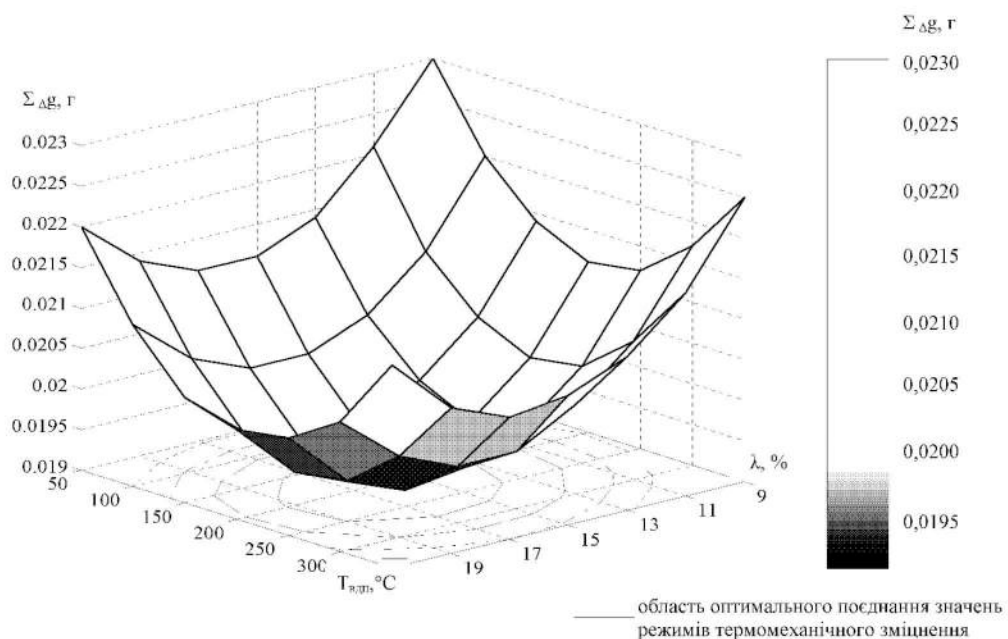


Рисунок 4.13 – Область оптимального поєднання значень технологічних режимів термомеханічного зміцнення: температури відпускання ( $T_{\text{вдп}}, ^\circ\text{C}$ ) і ступеня деформації ( $\lambda, \%$ ). Температура деформації  $T_{\text{деф}} = 870^\circ\text{C}$ , випробувальне навантаження  $P_{\text{мі}} = 450 \text{ Н}$

|     |      |          |        |      |
|-----|------|----------|--------|------|
|     |      |          |        |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Оптимальні значення зносостійкості поєднання технологічних режимів були експериментально перевірені. Похибка дослідних значень в області екстремуму не перевищувала 3-5%.

#### Висновки до розділу 4

1 Практично здійснено виробничий експеримент. При цьому були використані статистичні методи планування експерименту: повний факторний експеримент  $ПФЕ = 2^4$ , розрахунок методом руху за градієнтом, ортогональний план другого порядку, що дозволяють підвищити достовірність результатів дослідження і скоротити терміни і витрати на експеримент.

2 Розроблена математична модель (4.15), що встановлює вплив технологічних режимних параметрів термомеханічного зміцнення на величину параметра оптимізації  $y$  – абсолютний знос при випробуваннях  $\Delta \Sigma g$  робочої поверхні матеріалу деталі.

3 Використані методи планування експериментів та математичної обробки їх результатів дозволили визначити область оптимального поєднання значень технологічних параметрів термомеханічного зміцнення, при яких зносостійкість досліджуваного чавуну збільшується на 18-22%. Підвищення зносостійкості матеріалу, що використовується в даний час для виготовлення гільз циліндрів автомобільних дизельних двигунів, після термомеханічного зміцнення є величиною статистично значущою, що підтверджує позитивний ефект даної обробки яка дозволяє збільшити ресурс деталі. Похибка дослідних значень і розрахункових даних в області оптимального поєднання значень технологічних режимів термомеханічного зміцнення не перевищила 5%.

4 Виходячи з аналізу результатів проведених досліджень оптимальним по зносостійкості серед досліджених режимів термомеханічного зміцнення слід вважати діапазон температур деформації  $T_{\text{деф}} = 850-880^\circ\text{C}$ , ступенів деформації  $\lambda = 14-18\%$  і температур відпускання  $T_{\text{вдп}} = 170-240^\circ\text{C}$ .

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 81    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

## РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

### 5.1 Безпечна робота на технологічному обладнанні

Щоб уникнути нещасних випадків працівники механічного цеху, де здійснюється виготовлення деталей, повинні вивчити правила експлуатації обладнання та отримати практичний інструктаж у начальника цеху. У місцях розташування обладнання повинні бути вивішені правила його безпечної експлуатації. Підлога у цеху повинна бути рівною, не слизькою, а також не мати виступів.

Вимоги до безпеки під час роботи наступні:

- необхідно виконувати тільки той вид роботи, за якою пройдено навчання, інструктаж із охорони праці, наявний допуск від працівника, котрий відповідальний за безпеку;
- забороняється допускати до роботи сторонніх осіб та осіб, які не пройшли належного навчання;
- застосовувати тільки необхідне для безпечної роботи обладнання, інструмент, пристосування за цільовим призначенням;
- дотримуватися правил переміщення у приміщенні та на території підприємства, користуватися лише призначеними для цього переходами;
- підтримувати робоче місце у належному санітарному стані;
- не загромождувати робоче місце, підходи до нього, проходи між обладнанням, столами, верстаками, стелажам, проходи до пультів управління, рубильникам, евакуаційним шляхам;
- використовувати засоби індивідуального захисту;
- користування запірною арматурою здійснювати повільно, без ривків та значних зусиль. Не застосовувати для цієї мети молотки, гайкові ключі та інші не пристосовані для цього предмети;

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | KPM.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 82    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

- для відкриття тари застосовувати спеціальний інструмент. Не здійснювати ці роботи випадковими предметами;
- здійснювати транспортування заготовок та деталей у спеціальній тарі. Завантажувати тару відповідно до номінальної маси;
- не використовувати для сидіння випадкові предмети, обладнання;
- під час приготування МОР не застосовувати ядовиті речовини, не перевищувати допустимий рівень їх концентрації та робочу температуру;
- не допускати розпилення цих речовин у навколишнє середовище, потрапляння розчинів на шкіру та слизові оболонки;
- під час роботи на різному обладнанні дотримуватися вимог безпеки, що викладені у експлуатаційній документації заводу-виробника.

## 5.2 Техногенно-екологічна безпека: світлове маскування

Сучасна авіація оснащена єдиними системами виявлення, ураження цілі та управління. Для виявлення цілі використовують радіолокаційну, інфрачервону, лазерну техніку, оптичні прибори, що працюють комплексно, синхронно.

Виявлення та розпізнавання тих чи інших об'єктів виконується шляхом виявлення демаскуючих ознак, властивих тим чи іншим об'єктам (геометричні характеристики, теплові випромінювання, характер діяльності об'єкта, місце розташування та інше).

На створення перешкод розвідки противника, що проводиться з використанням оптичної та телевізійної апаратури або шляхом візуального спостереження, і спрямоване оптичне маскування.

До інженерно-технічних заходів оптичного маскування входять: маскувальне фарбування, придання об'єктам маскувальних форм, використання штучних масок, макетів, хибних споруд, використання аерозолів, світлове маскування і тощо.

Світлове маскування використовувалося у давнину, коли маскували вогнища в місцях зупинки племен та війських таборів, при наближенні ворога. Або

навпаки, запалювали додаткові вогнища з метою демонстрації численної армії. Створювалися хибні світлові об'єкти для дезорієнтації противника. Особливо широкого використання світлове маскування отримало з появою авіації.

Досвід війн показав, що світломаскування ускладнювало дії авіації та знижувало втрати від бомбардувань міст та об'єктів у темну пору доби.

Освітлені вікна будівель добре видно на відстані до 10 кілометрів. Освітлений великий промисловий об'єкт видно на відстані 40 кілометрів. Великий адміністративний центр видно на відстані 80 кілометрів. При виконанні заходів світлового маскування виявити об'єкт складніше.

Основні вимоги до проведення світломаскування:

- світлове маскування повинно проводитися в населених пунктах та об'єктах економіки, що входять до зони світлового маскування;
- підготовчі заходи, що забезпечують світлове маскування, повинні проводитися заздалегідь;
- в населених пунктах та об'єктах економіки, що не входять в зону світлового маскування, виконуються, як правило, лише організаційні заходи з забезпечення відключення освітлення і світлового маскування вогнів при подачі сигналу «повітряна тривога».

Світлове маскування міст і поселень, об'єктів економіки й інфраструктури, що входять в зону маскування та території, повинні передбачати два режими: часткового затемнення і хибного освітлення.

Ціль режиму часткового маскування – зниження загальної освітленості, не порушуючи виробничої діяльності об'єктів економіки та транспорту, а також життєдіяльність населених пунктів, і створити умови для своєчасного введення режиму хибного освітлення у встановлені терміни. Вимикаються прилади освітлення реклам та вітрин, архітектурні підсвічування. Знижують рівень освітленості міських та селищних вулиць, площ, скверів, бульварів, дитячих, шкільних та лікувально-оздоровчих установ.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 84    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

Режим хибного освітлення вводиться за сигналом початку тривоги. Ціль режиму – знизити рівень освітлення населених пунктів і об'єктів економіки до величини, що перешкоджають їх виявлення і розпізнання з повітря в темний час доби, а також внести противника в оману щодо істинного місцеперебування важливих об'єктів. Режим хибного освітлення базується на повному затемненні найбільш важливих будівель та споруд об'єктів економіки й інфраструктури, а також орієнтовних показників на територіях, а також освітлення хибних і менш важливих об'єктів.

### 5.3 Собівартість продукції

Докорінні зміни в економіці України, зумовлені переходом її до ринку, визначили необхідність створення такого господарського механізму, який дасть змогу підприємствам реалізувати принципи ринкових відносин, сприятиме підвищення їх конкурентоспроможності, забезпечить динамічний розвиток. В умовах ринкових відносин кожне підприємство є незалежним товаровиробником і може самостійно приймати будь-які рішення в межах чинного законодавства.

В сучасних умовах стійкість положення підприємства на ринку товарів та послуг визначається рівнем конкурентоспроможності, адже задоволення попиту споживачів – основна мета ринкової економіки. В свою чергу конкурентоспроможність пов'язана з двома показниками – рівнем ціни і якості продукції.

Підвищення якості продукції чинить безпосередній вплив на виробництво та його ефективність, а також імідж підприємства, що в цілому забезпечує економію сировини, матеріалів, палива, енергії, зростання ефективності інвестицій, більш повне задоволення різноманітного попиту споживачів. При цьому визначальний вплив на підвищення якості продукції надають: серед технічних шляхів – постійне удосконалення проектування та техніко-технологічної бази підприємства; серед

організаційних – вивчення та впровадження позитивного досвіду в галузі проектування і виготовлення високоякісних виробів.

У відповідності до Закону України „Про бухгалтерський облік і фінансову звітність” собівартість продукції, як економічна категорія, є важливим узагальнюючим показником. Вона характеризує ефективність роботи підприємства, а також являє собою грошовий вираз витрат на виробництво і збут продукції, яка була реалізована протягом звітного періоду. В ній відображаються всі сторони виробничо-господарської діяльності.

Собівартість продукції враховує наступні статті витрат.

Стаття 1 – „Сировина і матеріали”. Сюди включаються: вартість сировини та основних матеріалів, що утворюють основу вироблюваної продукції; вартість придбаних напівфабрикатів і комплектуючих виробів, допоміжних та інших матеріалів, які можуть бути безпосередньо віднесені до конкретного об’єкта витрат.

Стаття 2 – „Енергія технологічна”. Вона охоплює витрати на всі види енергії, необхідної для виробництва продукції (паливо, електроенергію, пар, газ). Зазначені види енергії безпосередньо використовуються в технологічному процесі для зміни стану або форми предметів праці.

Стаття 3 – „Основна і додаткова заробітна плата виробничих робітників”. В цю статтю включають прямі витрати на оплату праці та інші виплати (доплати і надбавки за кваліфікацію, за перевиконання плану, за роботу в святкові і вихідні дні, оплата відпусток тощо) робітникам, що безпосередньо виготовляють продукцію. Ці витрати обчислюються згідно з нормами часу на виконання технологічних операцій і тарифними ставками (або відрядними розцінками на операції та виготовлення одиниці продукції).

Стаття 4 – „Утримання та експлуатація обладнання і механізмів”.

Стаття 5 – „Загальновиробничі (накладні) витрати”. У неї входять витрати на: управління (оплата праці апарату, управління цехами, дільницями тощо); витрати на обслуговування виробничого процесу, опалення, освітлення, водопостачання та

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 86    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

інше утримання виробничих приміщень; амортизаційні відрахування по будівлям і спорудам; охорону праці та техніку безпеки, охорону навколишнього середовища, охорону виробництва і протипожежну охорону; витрати на удосконалення технології та організацію виробництва; підготовку кадрів, адміністративні та канцелярські витрати; відрядження; обов'язкові платежі (страхування майна), відрахування на соціальні потреби (Державний фонд сприяння зайнятості, Пенсійний фонд) і т. д.

При вдосконаленні серійно випускаємої деталі економічний ефект може бути отриманий за рахунок поліпшення ряду її характеристик, незважаючи на те, що це завжди пов'язано з певними витратами. Для двигунів, що піддаються капітальним ремонтам, економічний ефект обумовлений збільшенням показників ремонтпридатності та довговічності, зокрема:

- підвищенням середнього ресурсу деталей різних груп складності, як до першого капітального ремонту, так і в міжремонтні періоди (збільшення терміну служби);
- скорочення сумарної тривалості (трудомісткості) усунення наслідків відмов деталей і технічних обслуговувань конкретних видів;
- зниження витрати запасних частин.

Перераховані вище зміни показників надійності обумовлюють наступне:

- зниження сумарних витрат на проведення капітальних ремонтів, усунення наслідків відмов і технічне обслуговування;
- скорочення часу на ремонти і технічне обслуговування у споживача;
- задоволення попиту на запасні частини за рахунок збільшення ресурсу деталей при тому ж обсязі їх випуску.

## Висновки до розділу 5

Наведено заходи безпеки при роботі приділено увагу питанням техногенно-екологічної безпеки та питанням вивчення собівартості продукції.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 87    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

## ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської роботи зроблено наступні висновки.

1 Проведено аналіз науково-технічної інформації за методами зміцнення та відновлення робочої поверхні гільз циліндрів ДВЗ сільськогосподарської техніки.

2 Обґрунтовано можливість підвищення якості гільз циліндрів, що виготовляються зі спеціального легованого чавуну, за рахунок термомеханічного зміцнення, розроблена методика дослідження, виявлені найбільш значущі технологічні фактори даної обробки, що визначають експлуатаційні характеристики деталі.

3 Практично здійснено виробничий експеримент. При цьому були використані статистичні методи планування експерименту: повний факторний експеримент  $ПФЕ = 2^4$ , розрахунок методом руху за градієнтом, ортогональний план другого порядку, що дозволяють підвищити достовірність результатів дослідження і скоротити терміни та витрати на експеримент. Розроблена математична модель, що встановлює вплив технологічних режимних параметрів термомеханічного зміцнення на величину параметра оптимізації – абсолютний знос при випробуваннях  $\Delta \Sigma g$  робочої поверхні матеріалу деталі. Використані методи планування експериментів і математичної обробки їх результатів дозволили визначити область оптимального поєднання значень технологічних параметрів термомеханічного зміцнення, при яких зносостійкість досліджуваного чавуну збільшується на 18-22%. Підвищення зносостійкості матеріалу, що використовується у даний час для виготовлення гільз циліндрів автомобільних дизельних двигунів, після термомеханічного зміцнення є величиною статистично значущою, що підтверджує позитивний ефект даної обробки, яка дозволяє збільшити ресурс деталі. Похибка дослідних значень і розрахункових даних в області оптимального поєднання значень технологічних режимів термомеханічного зміцнення не перевищила 5%. Виходячи із аналізу результатів проведених досліджень оптимальним по зносостійкості серед досліджених

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 88    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

режимів термомеханічного зміцнення слід вважати діапазон температур деформації  $T_{\text{деф}} = 850-880^{\circ}\text{C}$ , ступенів деформації  $\lambda = 14-18\%$  і температур відпускання  $T_{\text{вдп}} = 170-240^{\circ}\text{C}$ .

4 Надано рекомендації стосовно практичної реалізації розробок.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 89    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Райков И.Я., Рывинский Т.Н. Конструкция автомобильных и тракторных двигателей. - М.: Высшая шк., 1986. - 352 с.
- 2 Шебастинов М.П., Абраменко Ю.Е., Сбитнев П.П. Металлофизические аспекты изнашивания пары гильза – поршневое кольцо // Двигателестроение. 1984. - № 5. - С.43-46.
- 3 Григорьев М.А., Лебедев С.В., Фёдоров С.Н. Основные причины изнашивания деталей цилиндропоршневой группы двигателей ЯМЗ // Автомобильная промышленность. -1994.-№ 2.- С.10-13.
- 4 Гурвич И.Б., Сыркин П.Э., Чумак В.И. Эксплуатационная надёжность автомобильных двигателей. - М.: Транспорт, 1994.- 144 с.
- 5 Гурвич И.Б., Чумак И.В., Баранов А.И. Тепловое состояние двигателей в процессе изнашивания // Двигателестроение.-1983.-№ 9.- С.49-50.
- 6 Абраменко Ю.Е., Сбитнев П.П., Шебастинов М.П. Физико-химические основы изнашивания серых чугунов в условиях пластической деформации // МиТОМ.- 1985.-№ 6.- С.34-39.
- 7 Хрущёв М.М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин // Трение и износ в машинах. - М.: Изд-во АН СССР, 1953. - Вып. 3.- С. 5-17.
- 8 Гурвич И.Б., Егорова А.П. Оценка изнашивания при заедании деталей автомобильных двигателей // Двигателестроение.-1980.-№ 6.- С.57-59.
- 9 Григорьев М.А., Енукидзе Б.М. Конструкторско-технологическое обеспечение надёжности ДВС // Автомобильная промышленность.-1988.-№ 8.- С.9-12.
- 10 Власов Ю.Л., Кондратенко М.Ю. Абразивное изнашивание и ресурс дизелей КамАЗ-740 // Автомобильная промышленность.-1987.-№ 7.- С.7.
- 11 Андрейченко В.И., Григорьев М.А., Заренбин В.Г. Причины натиров гильз дизелей КамАЗ-740 // Автомобильная промышленность.-1991.-№ 4.- С.19-20.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 90    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

12 Григорьев М.А., Павлинский В.М., Бунаков В.М. Соотношение износов, вызванных различными эксплуатационными факторами, в общем износе цилиндров двигателей // Автомобильная промышленность.-1975.-№ 3.- С.3-5.

13 Суранов Г.И. Повышение точности измерений износа деталей при испытании двигателей // Двигателестроение.-1986.-№ 3.- С.45-47.

14 Итинская Н.И., Кузнецов Н.А. Топливо, масла и технические жидкости: Справочник. - М.: Агропромиздат, 1989.- 304 с.

15 Григорьев М.А., Пономарёв Н.Н. Износ и долговечность автомобильных двигателей. - М.: Машиностроение, 1976.- 243 с.

16 Чернышев Г.Д. Повышение надёжности дизелей ЯМЗ и автомобилей КраЗ. - М.: Машиностроение, 1974.- 288 с.

17 Воробьёв С.С., Щурков В.Е., Сильницкая М.Н. Гильзы и цилиндры зарубежных автомобильных двигателей: Обзор. - М.: Изд-во ЦНИИТЭИавтопром, 1988.- 48 с.

18 Таболин В.В., Круговой В.М. Устройство, эксплуатация, обслуживание и ремонт автомобилей КраЗ. - К.: Техника, 1986.- 208 с.

19 Шерман А.Д., Якушин Н.Н. Чугуны для гильз цилиндров автомобильных двигателей: Обзор. - М.: Изд-во НИИНавтопром, 1978.- 72 с.

20 Шебастинов М.П., Прохоров И.И., Сбитнев П.А. Повышение износостойкости серых чугунов для гильз цилиндров ДВС // Автомобильная промышленность.-1985.-№ 9.- С.12-14.

21 Шебастинов М.П., Абраменко Ю.В. Свойства и износостойкость аустенитных чугунов // МиТОМ.-1986.-№ 6.- С.32-36.

22 Абраменко Ю.Е. Физико-химическая природа изнашивания чугунных гильз цилиндров ДВС // Двигателестроение.-1984.-№ 3.- С.38-40.

23 Асташкевич Б.М., Епархин О.М., Мазнова Г.А. Влияние структуры на изнашивание закалённого марганцовистого чугуна для гильз цилиндров дизелей // МиТОМ.-1990.-№ 12.- С.28-31.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 91    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

24 Васильев В.А., Асанов В.И. Фрактографический анализ поверхностей трения чугунных отливок // Литейное производство.-1981.-№ 12.- С.24-25.

25 Гуреев А.А., Иванова Р.Я., Щёголев Н.В. Автомобильные эксплуатационные материалы. - М.: Транспорт, 1974.- 278 с.

26 Обельницкий А.М. Топливо и смазочные материалы. - М.: Высшая шк., 1982.- 208 с.

27 Абраменко Ю.Е., Муравьёва В.Д. Газообразное топливо и износостойкость гильз цилиндров // Автомобильная промышленность.-1988.-№ 2.- С.16-17.

28 Кальнер В.Д. О материаловедческих резервах в автомобилестроении // МиТОМ.-1988.-№ 11.- С. 33-37.

29 Асташкевич Б.М. Износостойкость чугунных втулок цилиндров транспортных дизелей // Двигателестроение.-1986.-№ 2.- С.32-36.

30 Белов В.А., Шлыкова А.В., Лебедева Е.Н. Детали из высокопрочного чугуна // Автомобильная промышленность.-1990.-№ 5.- С.14-15.

31 Добрынин А.М., Елисеев Ю.Э. Повышение износостойкости центробежно-литых гильз цилиндров дизелей ЯМЗ-236 // Двигателестроение.-1989.- № 3.- С.35-37.

32 Зеленова В. Д., Бутаев Э. И., Кнорозова Т.Б., Лушников С. А.. Распределение остаточных напряжений и микростроение изломов заготовок гильз цилиндров из серого чугуна // МиТОМ.-1982.-№ 6.- С.10-11.

33 Ровкач В.В., Блехман Г.Х., Зарецкий Л.Ш. и др. Новый процесс литья гильз цилиндров дизелей // Автомобильная промышленность.-1985.-№ 6.- С. 22-23.

34 Шебастинов М.П., Абраменко Ю.В. Свойства и износостойкость аустенитных чугунов // МиТОМ.-1986.-№ 6.- С.32-36.

35 Косарева Н.В. Разработка экономичных специальных чугунов для гильз цилиндров, упрочняемых закалкой с нагревом ТВЧ: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.01 / Моск. авт.-дор. ин-т.- М.,1988.- 22 с.

36 Ремонтпригодность машин / А.И. Аристов, П.Н. Волков, Л.Г. Дубицкий, Б.И. Есин и др.; Под ред. П.Н. Волкова. - М.: Машиностроение, 1975.- 368 с.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 92    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

- 37 Капитальный ремонт автомобилей: Справочник / Под ред. Р.Е. Есенберлина. - М.: Транспорт, 1989.-335 с.
- 38 Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986.- 542 с.
- 39 Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968.- 1170 с.
- 40 Солнцев Л.А., Тимофеева Л.А. Повышение долговечности гильз цилиндров транспортных дизелей // Двигателестроение. -1989.-№ 6.- С.41-42.
- 41 Горюшин В.В. Кратковременное газовое азотирование чугунных гильз блока цилиндров // МиТОМ.-1984.-№ 7.- С.34-37.
- 42 Бочков А.А., Егорова А.П. Поверхностное раскатывание улучшает износостойкость цилиндров ДВС // Двигателестроение.-1986.-№ 10.- С. 40.
- 43 Исаев В.А. Поверхностное упрочнение деталей автомобильных двигателей // Двигателестроение.-1986.-№ 9.- С.53-57.
- 44 Румянцев А.В. Чистовая обработка внутренних цилиндрических поверхностей чугунных деталей роликовым инструментом: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Моск. ин-т инженеров с.-х. производства.- М., 1967.- 20 с.
- 45 Козин А.А. Метод проектирования процесса дорнования и повышения качества цилиндров дизельных двигателей поверхностным пластическим деформированием: – Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Моск. автомех. ин-т.- М., 1989.- 18 с.
- 46 Пукас В.В., Петко И.В., Муратов И.Е. Прогрессивные технологические способы повышения долговечности деталей машин.– К.: Техника, 1978.- 80 с.
- 47 Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки. - М.: Металлургия, 1991.- 478 с.
- 48 Гаркунов Д.Н., Бурумкулов Ф.Х. Финишная антифрикционная безабразивная обработка при восстановлении цилиндров двигателей // МиТОМ.- 1982.-№ 3. - С.57-59.

49 Соколенко И.Н., Хромов В.Н. Упрочнение поверхностно-пластическим деформированием гильз цилиндров с одновременным нанесением антифрикционного покрытия // Двигателестроение.-1990.-№ 9.- С. 39, 26.

50 Чеповецкий И.Х., Ющенко С.А., Григорова Л.С. Формирование рабочих поверхностей гильз цилиндров ДВС методом антифрикционно-деформированного хонингования // Автомобильная промышленность.-1986.-№ 2.- С.9-10.

51 Чеповецкий И.Х., Ющенко С.А. Антифрикционно-деформационный метод формирования рабочих поверхностей гильз цилиндров ДВС // Двигателестроение.-1990.-№ 8.- С.38-40.

52 Яковлев Ф.И. Улучшение качества гильз цилиндров // Двигателестроение.-1985.-№ 8.- С.30-31.

53 Асташкевич Б.М., Вершинина Н.И., Епархин О.М., Мазнова Г.А. Влияние остаточных напряжений в поверхностном слое на износостойкость гильз цилиндров // МиТОМ.-1993.-№ 2.- С.21-23.

54 Асташкевич Б.М., Воинов С.С., Шур Е.А. Лазерное упрочнение втулок цилиндров тепловозных дизелей // МиТОМ.-1985.-№ 4.- С.12-15.

55 Седунов В.К., Евсеев Ю.К., Ильин Н.И. Износостойкость пары трения гильза цилиндра – компрессионное кольцо // МиТОМ.-1984.-№ 7.- С.41-44.

56 Седунов В.К., Андрияхин В.М., Чеканова Н.Т., Белов В.М. Изменение структуры и свойств гильзы цилиндра ДВС после лазерной обработки // МиТОМ.-1980.-№ 9.- С.10-13.

57 Губкин С.И., Юшков А.В., Руденок П.П. Деформируемость серого и ковкого чугунов // Сб. науч. трудов ФТИ АН СССР.- Минск.-1955.- С.3-15.

58 Татаринцев М.И., Сидашенко А.И. К вопросу исследования восстановления чугунных деталей наплавкой с термомеханическим упрочнением // Ремонт машин и технология металлов. - М.: Изд-во Моск. ин-та инженеров сельскохоз. произ-ва, 1975.- Т.12.- №4, ч.2.- С.44-49.

59 Витензон С.И., Бажанов Л.М. ТМО высокопрочного чугуна // Литейное производство.-1974.-№ 2.- С. 22.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 94    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

60 Леоненко А.Н., Савченков Б.В. Некоторые аспекты упрочнения чугуновых деталей двигателя // Тракторная энергетика в растениеводстве. - Харьков: Изд-во ХГТУСХ.- 2002.- №5.- С.314-319.

61 Садовский В.Д. Что такое ВТМО // МиТОМ.-1983.-№ 11.- С.48-50.

62 Топоров Г.В. Влияние структуры чугуна на его абразивное изнашивание // Трение и износ в машинах. - М.: Изд-во АН СССР, 1958.- С.42-63.

63 Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2-х кн. / Под. ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1978.- 400 с; 1979.- 380 с.

64 ДСТУ 2823 – 94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення.– Чинн. від 01.01.96.- К.: Держстандарт України, 1995.-32 с.

65 ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. - Введ. 01.01.87.- М.: Изд-во стандартов, 1986.- 28 с.

66 РД 50-339-82. Методические указания. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой. - Введ. 01.07.82.- М.: Изд-во стандартов, 1985.- 12 с.

67 Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин./ Сост. В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Э.Д. Браун и др.- К.: Наук. думка, 1990.– 264 с.

68 Бернштейн М.Л., Дёмина Э.Л., Сафонова К.Э. Термомеханическая обработка шарикоподшипниковой стали // МиТОМ.-1962.-№ 1.- С.23-29.

69 Крагельский И.В. Основы расчётов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977.- 526 с.

70 Расчёт и конструирование автомобильных и тракторных двигателей / Б.Е. Железко, В.М. Адамов, И.К. Русецкий и др.- Минск: Высшая шк., 1987.-247 с.

71 Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.-279 с.

72 Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техника, 1975.- 168 с.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 95    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |

73 Box G.E.P., Wilson K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions // Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B.- 1951.-№ 1.- P.1-45.

74 Кузнецов В.Д. Поверхностная энергия твёрдых тел. - М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1954. – 220 с.

75 Примак Т.О. Економіка підприємства: навч. посіб. – К.: Вікар, 2002.- 176 с.

76 Сідун В.А. Економіка підприємства: навч. посіб. – Харків: вид-во Харк. держ. ун-та харчування та торгівлі, 2003.- 263 с.

77 Бойчик І.М., Харів П.С., Хопчан М.І. Економіка підприємств: навч. посіб. – Львів: СПОЛОМ, 1998.- 212 с.

78 Бондар Н.М. Економіка підприємства: навч. посіб. – К.: вид-во А.С.К., 2004.- 400 с.

79 Мякота В. Себестоимость продукции: от выпуска до реализации. – Харьков: Фактор, 2003. – 268 с.

|     |      |          |        |      |                          |       |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-------|
|     |      |          |        |      | КРМ.133ГМмд_21.07.000 ПЗ | Аркуш |
|     |      |          |        |      |                          | 96    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |       |