

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**КУКАЛ ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ**

**УДК 621.78**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЬНИХ  
ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНЕВИМ НАКЛЕПОМ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Д.А. Кукал

**Керівник роботи**

Савченко В.М.

к.т.н., доцент

**Житомир – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Кукал Дмитро Анатолійович. Підвищення зносостійкості сталевих деталей поверхневим наклепом.** – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Основними факторами, що впливають на глибину та ступінь поверхневої пластичної деформації, на шорсткість, а також на величину залишкових напружень, розмір блоків, щільність дислокацій та зносостійкість деформованого шару, є середній тиск у зоні контакту робочого інструменту з деталлю, поздовжня подача та число проходів. Технологічні режими обробки поверхневої пластичної деформації у кожному конкретному випадку повинні бути уточнені експериментально з урахуванням масштабного фактора, фізико-механічних властивостей та шорсткості поверхні, що обробляється.

Зносостійкість поверхонь деталей, оброблених поверхневою пластичною деформацією за оптимальними режимами та працюючих в умовах тертя ковзання з мастилом, підвищується при значному скороченні періоду приробітку. Однак сприятливий вплив наклепу обмежується такими параметрами тертя, як швидкість ковзання, тиск, при яких температура на поверхнях тертя не призводить до інтенсивного розміцнення та зміни властивостей матеріалу, а також розрідження мастила та порушення окисних плівок на поверхнях тертя.

Обробка поверхневою пластичною деформацією деталей, які працюють без мастила, не завжди доцільна. Попередній наклеп у цьому випадку створює на поверхні тертя сприятливі умови для відриву частинок матеріалу в точках справжнього контакту, що призводить до збільшення зносу та зміни мікропрофілю поверхні.

*Ключові слова: поверхнева пластична деформація, зміцнення, сталь, шорсткість, зносостійкість.*

## ANNOTATION

**Kukal Dmytro Anatoliyovych. Improving the wear resistance of steel parts by surface hardening.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The main factors influencing the depth and degree of surface plastic deformation, roughness, as well as the magnitude of residual stresses, block size, dislocation density and wear resistance of the deformed layer are the average pressure in the contact area of the work tool with the part, longitudinal feed and number of passes. Technological modes of surface plastic deformation treatment in each case should be specified experimentally taking into account the scale factor, physical and mechanical properties and roughness of the surface to be treated.

The wear resistance of the surfaces of parts treated with surface plastic deformation in optimal conditions and operating in conditions of sliding friction with oil, increases with a significant reduction in the period of production. However, the favorable effect of hardening is limited by such parameters of friction as sliding speed, pressure at which the temperature on the friction surfaces does not lead to intensive softening and changes in material properties, as well as oil thinning and oxidative films on friction surfaces.

Surface plastic deformation treatment of parts that work without oil is not always advisable. Preliminary slandering in this case creates favorable conditions on the friction surface for the separation of material particles at the points of real contact, which leads to increased wear and changes in the microprofile of the surface.

*Key words: surface plastic deformation, hardening, steel, roughness, wear resistance.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
РОЗДІЛ 2. ЗНОШУВАННЯ СТАЛЕЙ, ЯКІ ЗМІЦНЕННІ НАКЛЕПОМ.....	19
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВОГО НАКЛЕПУ.....	32
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Одним із шляхів вирішення завдань подальшого розвитку виробництва, збільшення випуску продукції є впровадження в промисловість і особливо в машинобудування принципово нових та досконаліших технологічних процесів.

Підвищення надійності та збільшення довговічності машин і механізмів багато в чому залежить від правильного підбору та обробки деталей, що сполучаються, що у свою чергу пов'язано з фізико-механічними властивостями і зносостійкістю матеріалів.

Повне використання потужності та продуктивності машин обмежується недостатньою зносостійкістю окремих деталей та вузлів, що тягне за собою величезні витрати коштів на ремонт, що часто становлять 30—40% вартості нової машини, на утримання надзвичайно великої мережі ремонтних підприємств та виробництво запасних частин. Аналіз показує, що через знос робочих поверхонь вибраковується 80-90% деталей тракторів і автомобілів. Вихід деталей з ладу відбувається в основному через порушення первинної форми та збільшення зазорів у сполученнях. Тому при виготовленні нових та відновленні зношених деталей машин основним є застосування таких технологічних процесів обробки, які зменшили б можливість створення на поверхнях тертя умов для виникнення небезпечної втомної напруги та інтенсивного зносу, технології, яка дала б можливість отримати потрібну мікроструктуру поверхневого шару матеріалу при сприятливому профілі та шорсткості поверхні.

Підвищені вимоги до працездатності та довговічності деталей машин викликають необхідність подальших комплексних досліджень прогресивних способів зміцнення поверхні, вивчення кількісного та якісного характеру її зносу в різних умовах тертя ковзання. Експериментальні методи оцінки зносостійкості, що використовуються в даний час, вимагають великого обсягу випробувань,

проведення яких особливо на стадії проектування та виготовлення виробів часто утруднено або неможливо. Усунення цих труднощів можна досягти тільки шляхом раціонального поєднання експериментальних н розрахункових методів оцінки зносостійкості та надійності сполучених пар тертя ковзання.

Незважаючи на те, що вже близько ста років проблема тертя та зносу матеріалів привертає увагу багатьох видатних учених та дослідників, вона досі залишається актуальною та недостатньо дослідженою.

За останні 50 років у нашій країні поряд з численними дослідженнями проблемі тертя та зносу присвячено низку узагальнюючих монографій [7]. Тим часом стан теорії тертя та зносу в машинах ще такий, що не можна повністю відповісти на численні питання, що висуваються практикою у зв'язку з розвитком нових машин, підвищенням швидкостей та навантажень, застосуванням нових матеріалів та способів їх обробки. В даний час ще немає єдиного погляду на природу сил тертя, відсутня загальноприйнята класифікація видів зношування матеріалів, є безліч різних способів досліджень явищ зносу, що робить результати різних авторів майже незрівнянними. Недостатньо вивчені питання, пов'язані з впливом твердості, пластичності, характеру і величини залишкових напруг у поверхневих шарах пар, що труться. На жаль, ще немає єдиної теорії тертя та зносу матеріалів, як немає і єдиних уявлень про фізичну сутність явищ зносу, про зв'язок цих явищ із механічними та фізичними властивостями поверхонь тертя залежно від методів їх зміцнення. Відомо, що підвищення зносостійкості та міцності тільки за рахунок легування та термічної обробки не завжди раціонально, оскільки ці процеси неминуче супроводжуються підвищенням чутливості поверхні до концентраторів напруг.

Різноманітні результати досліджень у галузі впливу шорсткості поверхні, попереднього наклепу металу, а також результати дослідження впливу режимів тертя ковзання на якісні та кількісні характеристики зносу матеріалів. Натомість знос і пластична деформація невіддільні одна від одної. Наклеп — одне з найпоширеніших явищ у техніці. Немає жодного виду механічної обробки

сплавів і металів, виду зносу, які не були б пов'язані певною мірою з незворотними структурними змінами поверхневих шарів, а також форми всього тіла або окремих його частин. Ось чому в останні роки у вітчизняному та зарубіжному машинобудуванні набула широкого поширення обробка деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД). У машинобудуванні застосовуються різні способи поверхневого зміцнення, кожен з яких має переваги та недоліки в конкретних умовах. Відмінність схем поверхневого деформування зумовлює різний характер епюр залишкової напруги. Залишковим напругам у поверхневому шарі належить вирішальна роль збільшення довговічності при зміцненні деталей машин ППД.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення зносостійкості поверхонь деталей сільськогосподарських машин поверхневою пластичною деформацією.

Відповідно до мети досліджень передбачено рішення наступних задач:

- провести аналіз поверхневого пластичного деформування;
- провести огляд властивостей сталей після поверхневого пластичного деформування;
- розробити технологію поверхневого пластичного деформування для деталей сільськогосподарських машин.

**Об'єкт дослідження:** сталі, які найбільше поширені в сільськогосподарському машинобудуванні

**Предмет дослідження:** вплив характеристики мікропрофілю поверхні на швидкість зношування і на процес утворення нового мікропрофілю поверхні до моменту закінчення періоду припрацювання.

**Методи дослідження.** Основні завдання роботи вирішувалися з урахуванням поєднання теоретичних і експериментальних методів дослідження. Дослідження проведені з використанням загальнонаукових методів пізнання, прикладної фізики та трибології. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою методів математичної статистики.

### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. Савченко В. М., Кукал Д. А., Новицький О. Р., Бугайчук В. В., Примак М. А. Обробка деталей сільськогосподарських машин наклепом. Збірник тез доповідей XXII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячену 121-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 16–18 жовтня 2021 року, м Ніжин. Ніжин. 2021. С. 204-206.

2. Грабар І.Г., Федорчук А.М., Примак М.А., Кулак Д.А., Шуляр І.В. Стійкість до абразивного зношування покриття на основі порошку STELLITE 6. Матеріали МНПК «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв». Харків: ДБТУ, 2021. 551-553.

3. Кулак Д.А. Зношування сталей, які зміцненні наклепом. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 30-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 234.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблений спосіб зміцнення підвищення зносостійкості робочих органів і деталей сільськогосподарських машин за рахунок використання поверхневого пластичного деформування.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 44 сторінки комп'ютерного тексту, містить 6 таблиць і 11 рисунків.



## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метали та технічні сплави мають полікристалічну будову. Різномірноорієнтовані зерна за рахунок механічних та молекулярних сил утворюють міцну сполуку. Поверхня полікристалічного металу є скупчення пов'язаних перехідним шаром кристалітів та їх уламків з різною орієнтацією.

Відомо, що механічні властивості металу залежать від величини молекулярних сил у кристалічній решітці. Фактична міцність металу або сплаву в десятки та сотні разів менша від теоретичного значення сил міжатомного зчеплення. Сучасна фізика пояснює цей факт наявністю в кристалічній решітці низки недосконалостей (дефектів). Недосконалості всередині реальних кристалів грають значної ролі у процесі деформації. Реальні кристали, крім атомів основного металу, містять велику кількість атомів домішок. Займаючи певні місця в міжвузлях кристалічних ґрат, атоми під дією температури п напруг здатні переміщатися, тобто дислокуватися.

Холодна пластична деформація (зсувна) відбувається шляхом зміщення (ковзання) окремих частин кристалітів один щодо одного за площинами та напрямками, що найбільш густо заповнені атомами. Вздовж цих площин і напрямків опір зсуву, яким володіє кристалічна решітка, мінімально. Орієнтування залежить в основному від типу решітки.

При обробці деталей поверхневою наклепом розвиток процесу пластичної деформації протікає не відразу, їй передують пружна деформація, що розповсюджується зі швидкістю звуку. Але й у першій фазі при пружній деформації можливі часткові переміщення зерен та міжкристалічна деформація. Під дією деформуючої сили відбувається акумулювання енергії деформації і відбувається робота, еквівалентна теплоті плавлення даного матеріалу [10]. Подальший процес пластичної деформації переважно протікає шляхом ковзання,

т. е. переміщення окремих частин кристалів за певними площинами. Початок процесу обумовлено наявністю критичних зсувних напруг.

У міру збільшення деформації ковзання поширюється і менш сприятливі орієнтовані системи. У кристаліті починає діяти кілька систем ковзання одночасно - виникає множинне ковзання. Процес ковзання - результат одночасного зміщення однієї частини кристаліту щодо іншої та переміщення в кристаліті особливого роду дефектів, недосконалостей, що отримали назву дислокацій [8, 12].

Характерно, що енергія спотворень кристалічних ґрат акумулюється нерівномірно, вона зосереджена в основному в найтонших шарах у площин зсуву, що охоплюють 2-3% загального числа атомів [14]. Настає орієнтація кристалітів за кристалографічними напрямками. Це орієнтування одержало назву текстури.

Незважаючи на широке застосування поверхневого зміцнення металів холодним пластичним деформуванням, природа наклепу досі залишається не зовсім ясною [2, 11]. Механізм пластичної деформації та супроводжуючі її структурні зміни розглянуті у ряді монографій та оглядів [12]. Для пояснення фізичної природи наклепу та механізму зміцнення висунуто низку гіпотез, проте найбільшого поширення набула теорія дислокацій [4].

Деякі автори вважають, що раціональні методи створення поверхневого наклепу та його вплив на експлуатаційні властивості деталі здебільшого пов'язані зі зміною втомної міцності, причиною підвищення якої є сприятливі зміни напруг у поверхневих шарах. Залишкові внутрішні напруги стиснення максимальні на поверхні, вони поступово зменшуються до повної рівноваги з напругами розтягування в більш глибоких шарах металу.

І. А. Одинг пояснює позитивну роль залишкових стискаючих напруг тим, що ці напруги створюють асиметрію циклу, середнім значенням якого є напруга стиснення. У цих випадках витривалість сталі підвищується, зародження та розвиток тріщин втоми відбувається повільніше. Крім підвищення межі втоми,

відбувається зниження чутливості поверхні до локалізації залишкової напруги, як і напруги від зовнішніх зусиль, біля надрізів.

Розвиток теорії дислокацій полегшив пояснення природи пластичної деформації металів. Передбачалося раніше, що пластична деформація кристалів металу є результатом зсуву по площинах ковзання однієї частини кристала по відношенню до іншої, що всі атоми частини, що зрушується, переміщуються одночасно в напрямку зсуву і при цьому не відбувається порушення в правильності будови кристалічної решітки.

Виходячи з дислокаційної теорії пластичної деформації, мала величина сколювальних напруг у реальних кристалах пояснюється тим, що процес деформації таких кристалів через недосконалість їх ґрат розвивається не одночасно по всьому кристалу, а послідовно, в результаті переміщення дислокацій. Відповідно до статичної теорії, в металі завжди є певна кількість дислокацій, рух яких починається при скільки завгодно малих напругах [2].

Наклеп можна пояснити зменшенням кількості дислокацій у міру подальшого розвитку процесу, якби не було спотворення ґраток кристала, не зростала його енергія і не збільшувалася щільність дислокацій. Число дислокацій у литому металі або сплаві зазвичай лежить у межах  $10^4$ - $10^7$  на  $1 \text{ см}^2$ . У пластично деформованому металі щільність значно зростає: для помірно деформованого металу становить  $10^{11}$ , сильно деформованого— $10^{13}$ . У деяких випадках можна довести густину до  $10^{19}$  на  $1 \text{ см}^2$ . Щільність дислокацій після припинення дії деформуючої сили дещо знижується, проте має більш високі значення, ніж у недеформованому металі.

Дослідження у сфері фізики металів показують, що основу пластичної деформації лежить механізм руху дислокаційних петель, генерованих джерелами Франка — Ріда.

Зміцнення сталі при наклеп, згідно з теорією дислокацій, пояснюється концентрацією дислокацій біля лінії зрушень. Так як дислокації оточені полями пружних напруг, то для подальшої пластичної деформації необхідно значно

більше напруги, ніж у не зміцненому металі. Це пов'язано з необхідністю подолати під час просування дислокацій

опір полів напрузі, що існують біля інших дислокацій, масовий розвиток яких породжує наклеп. При цьому підвищується енергетичний рівень металу, що сприяє збільшенню дифузійного проникнення наклепу. Пропорційно до ступеня пластичної деформації зменшується щільність металу, що пояснюється збільшенням кількості дислокацій та вакансій у наклепаному металі [12, 13].

Внаслідок підвищення енергетичного рівня в деформованому поверхневому шарі метал знаходиться у структурно-нестійкому стані і в ньому спонтанно (самовільно) виникає явище відпочинку. Це пояснюється термодинамічно неминучим прагненням дислокацій взаємовикладатись або приймати таку конфігурацію, яка відповідала б найменшому енергетичному рівню, тобто меншому числу дислокацій.

Наклеп металу, як вважає більшість авторів, процес повністю оборотний. Вихідні властивості металу можна відновити шляхом нагрівання. При цьому основним фактором, що змінює структуру деформованого металу при нагріванні, є перерозподіл дислокацій зі зменшенням енергії кристалічних ґрат, але без помітного зменшення кількості дислокацій, якщо ступінь пластичної деформації невеликий. Якщо ж температура досягає температури рекристалізації, що дорівнює приблизно  $0,4 T_{пл}$  ( $T_{пл}$  - абсолютна температура плавлення металу), можливе повне зникнення наклепу. При цьому явищу відпочинку сприяє пружна деформація наклепаного металу. Наклеп в оптимальних межах призводить до зміцнення матеріалу. Досліди підтвердили, що в більшості випадків наклеп призводить до зміцнення поверхневих шарів, але іноді при надмірних зусиллях обкатки та великому числі проходів або недостатньому мастилi спостерігається явище «перенаклепу». У цих випадках поверхневий шар розпушується, з'являються тріщини, спостерігається лушення поверхні, відшаровування металу. У поверхневому шарі оброблюваної деталі

утворюються відокремлені кристалічні зерна-кристаліти. Розміщення відбувається при вичерпанні здатності кристалічних ґрат зміцнюватися.

На думку І. А. Одінга, надзвичайно велике скупчення дислокацій призводить, як правило, до виникнення субмікротріщини. Мікротріщини утворюються за рахунок зриву нерухомих дислокацій і є елементами, що сприяють руйнуванню металу. Тому при зміцненні сталі методом пластичного деформування ефект наклепу у кожному разі впливає режим зміцнення [5, 11].

"Перенаклеп" - процес незворотний (будь-яке підвищення температури не відновлює вихідних властивостей металу). Однак останнім часом все частіше стали говорити про «спадковість» наклепу, про те, що навіть незначні пластичні деформації повністю не знімаються нагріванням і згодом впливають на властивості сталей [5, 13].

Таким чином, можна вважати, що при обробці сталевих деталей поверхневою наклепом пластична деформація супроводжується виникненням дислокацій і є одним із наслідків їх щільності. Вона залежить від дислокації як таких та від їхньої колективної поведінки. Це ж підтверджується і виконаними дослідженнями: збільшення напруги в зоні контакту ролика з поверхнею деталі при обкатуванні призводить до зростання дислокацій до  $10^{11}$  на  $1 \text{ см}^2$ , до збільшеного наклепу, підвищення твердості поверхневого шару сталі. Зміцнення сталі при пластичному деформуванні пов'язане з певною взаємодією дислокацій.

При обкатуванні циліндричної поверхні роликом, як говорилося, має місце пружно-пластична контактна задача, вирішивши яку, можна було б отримати якісні та кількісні характеристики зміни механічних властивостей по глибині поверхневого шару. Тому було здійснено ряд теоретичних та експериментальних досліджень [11], що дозволяють з достатнім наближенням визначати глибину деформації залежно від режимів обкатування. С. Г. Хейфец, використовуючи залежності Герца і Беляєва, встановив залежність між безрозмірними величинами, яка дозволяє обчислити або прийняти значення параметрів і знайти величину наклепу.

Глибина наклепу в наших дослідженнях визначалася щодо зміни твердості від поверхні зразка до його середини. Відстань між відбитками піраміди, що характеризує максимальну та мінімальну твердість, замірялося на мікроскопі (рис. 1.1). Справжня глибина наклепу обчислювалася за такою формулою. Значення твердості по глибині наклепаного шару порівнювалися з вихідною, яка визначалася на тому ж шліфі. Це було критерієм ступеня наклепу. Досліди показали, що проникнення пластичної деформації вглиб деталі насамперед залежить від тиску в зоні контакту, тобто від зусилля, прикладеного до роликів, а також від фізико-механічних властивостей матеріалу оброблюваної деталі.

Таблиця 1.1. - Величина наклепаного шару за даними різних авторів

Марка сталі	Діаметр, мм		Контурний радіус, $p$	Тиск на ролик, $P$ , кг	Теоретична глибина наклепу ( $t_m$ ) при вирішенні контактної задачі	Експериментальна глибина наклепу $t_a$	Результати по даним
	зразка $d$	ролика $D$					
35	30	60	18	500	2,6	2,4-2,6	С. Г. Хейфеца
35	30	60	18	1000	3,7	3,4-3,6	
5	60	170	40	2000	5,4	7,8	В. В. Иванова
5	60	170	40	4000	7,6	10,0	

Зі збільшенням глибини застосування ролика збільшується глибина проникнення пластичної деформації, яка тим більша, чим пластичніша сталь. Для сталей, що розглядаються, за інших рівних умов найбільша глибина наклепу у сталі 15, найменша — у сталі 45Г2. Навіть незначне збільшення вмісту вуглецю у сталі веде до зменшення проникнення пластичної деформації.

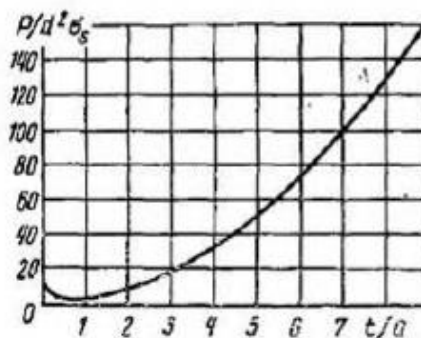


Рис. 1.1. Графік для визначення глибини наклепаного шару за методом С. Г. Хейфеца

У деталей зі сталі 45Г2 порівняно з деталями зі сталі 45 більша деформація спостерігається в безпосередній близькості від поверхні. Ця особливість обумовлена сприятливим поєднанням високої міцності із пластичністю, що надається стали марганцем.

Глибина наклепу досліджуваних сталей немає прямої пропорційної залежності від зусилля обкатування. Зміна твердості наклепанного шару відбувається по плавній кривій, що переходить майже горизонтальну пряму. Порівнюючи відносини глибин наклепу, отриманих при різних зусиллях обкатування, було зазначено, що їхня величина для досліджуваних марок сталей коливається майже в одній межі. Відношення найбільшої глибини наклепу до найменшої для середньовуглецевих сталей – величина стала, тобто.

$$\frac{t_{\text{макс}}}{t_{\text{мін}}} = \frac{5,74}{2,61} = \frac{5,76}{2,67} = \frac{5,21}{2,41} = \text{const} \quad (1.1)$$



Рис. 1.2. Мікроструктура поверхневого шару сталі 15 після обкатування із зусиллям 4.9 кН,  $\times 200$

Глибина зміцнення, отримана експериментально і визначена методом З. Р. Хейфеца, узгоджується непогано [14, 15]. Значення досвідчених даних дещо вище теоретичних у зв'язку з тим, що при розрахунку не враховувалося вплив масштабу, що згладжує п масштабного фактора.

Дослідження впливу числа проходів на глибину пластичної деформації показало, що глибина наклепу, близька до максимальної, досягається вже при першому проході. Зразки, обкатані за один і десять проходів, не мали великої різниці у глибині наклепаного шару. Кількість проходів, особливо перших,

підвищення твердості оброблюваної поверхні впливає мало. Результати експериментів свідчать, що у виробничих умовах слід проводити обкатування поверхні за один прохід. Це забезпечить виконання технологічних вимог та високу продуктивність праці.

Таблиця 1.2. - Глибина наклепу залежно від зусилля обкатування, мм

Зусилля обкатування $P, \text{кН}$	Сталь 45		Сталь 35		Сталь 15		Сталь 45Г2	
	$t_e$	$t_T$	$t_e$	$t_T$	$t_e$	$t_T$	$t_e$	$t_T$
4,9	2,61	2,44	2,67	2,50	3,30	3,27	2,41	2,03
9,8	3,70	3,52	3,91	3,86	5,00	4,52	3,30	3,00
14,7	4,33	4,44	4,51	4,80	5,64	5,52	4,27	3,90
19,6	5,01	5,21	5,40	5,40	—	—	5,00	4,50
24,5	5,74	5,61	5,76	6,26	—	—	5,21	5,05

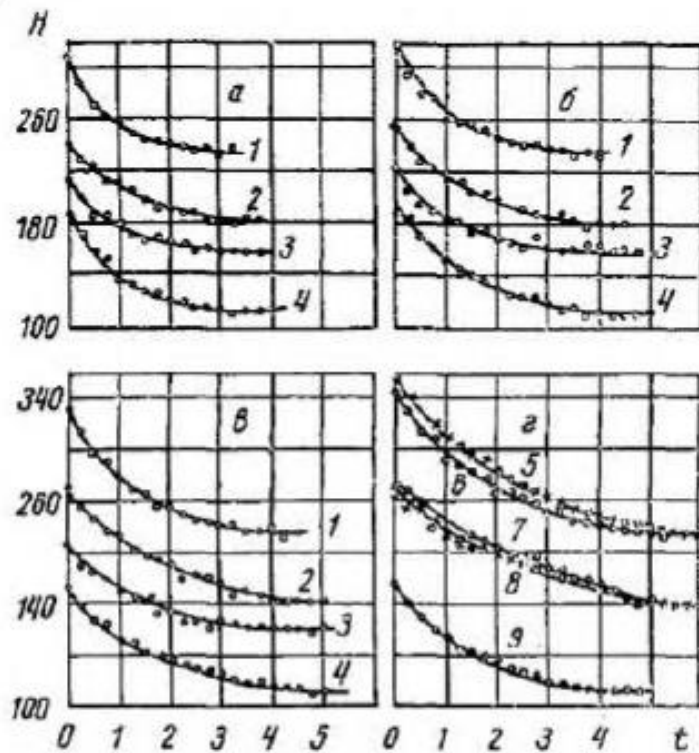


Рис. 1.3. Зміна твердості деформованого шару за глибиною залежно від зусилля обкатування та кількості проходів: а – зусилля обкатування 4,9 кН, б – 9,8, в – 14,7, г – 19,6 (6, 8), 24,5 (5, 7), 9,8 кН (9). 1, 5, 6 – сталь 45Г2; 2, 7, 8 – сталь 45; 3 – сталь 35; 4 – сталь 15, число проходів – один, число оборотів деталі – 300 об/хв.



Таблиця 1.3. – Твердість поверхні залежно від зусилля обкатування

Марка сталі	Зміна твердості поверхні в залежності від зусилля <i>P, кН</i>						Шліфована поверхня
	0	4.9	9.8	14.7	19.6	24,5	
45	182	241(32)	254(39)	268(47)	274(50)	262(14)	211 (15)
35	162	212(31)	221(36)	229(41)	227(40)	225(39)	184 (14)
15	113	187(65)	190(67)	192(70)			128 (13)
45Г2	236	310(31)	317(34)	332(41)	345(46)	353(49)	251 (7)

Примітка. У дужках-відносний приріст твердості,%.

Досліди показали, що ступінь наклепу поверхні залежить в основному від зусилля обкатування. Як видно з таблиці (обкатування за один прохід), зі збільшенням зусилля на ролику жорсткість підвищується. Збільшення твердості поверхні спостерігається кожної марки сталі до «оптимальних» зусиль обкатування, понад яких значення твердості залишаються одному рівні чи кілька знижуються.

Останнє, ймовірно, викликане перенаклепом поверхневих шарів сталі. Найбільший приріст твердості (70%) відзначений у зразків із маловуглецевої сталі.

На ступінь наклеп впливає структура сталі, її хімічний склад. Зі збільшенням вуглецю зменшується пластичність сталі, збільшується вихідна твердість і, як наслідок, опір пластичної деформації.

Заміри мікротвердості структурних складових у різно орієнтованих зернах показали, що ступінь наклепу в них різна. Феритні зерна зазнають значних змін, наклепуються сильніше, ніж перлітні, причому вони набувають більшого зміцнення по периферійній частині.

Проведені експерименти дозволяють зробити висновок, що вибрані режими обкатування забезпечують достатню глибину наклепу і достатнє підвищення твердості на поверхні зразка, причому для сталі 45, 35, 45Г2 перенаклеп спостерігається лише при зусиллі на ролики понад 24,5 кН або надмірному зменшенні подовжньої подачі. Великі зусилля обкатування впливають на сталь 15 негативно: спостерігається деякий перебіг металу

попереду зміцнювального ролика з наступним виходом його па торець зразка. В цьому випадку не завжди було отримано потрібне зміцнення поверхні, так як там, де спостерігалось протягом металу, наклеп був незначний або повністю був відсутній.

### **Висновки по розділу**

Дослідження показали, що холодна пластична деформація викликає в поверхневому шарі сталевих деталей ряд змін фізичних, механічних та хімічних властивостей. При пластичній деформації відбувається спотворення кристалічних ґрат, зміна форми та розмірів зерен, настає напружений стан. При великих ступенях деформації зерна не тільки змінюють свою форму, але й помітно подрібнюються; змінюється субмікроструктура кристалітів - блоки зерен стають дрібнішими.

## РОЗДІЛ 2

### ЗНОШУВАННЯ СТАЛЕЙ, ЯКІ ЗМІЩЕННІ НАКЛЕПОМ

З розвитком молекулярної фізики гідродинамічного і граничного тертя визначення «сухе», «напівсухе», «рідинне» і «напіврідке» тертя вже не відображають справжніх уявлень про явища, що відбуваються при терті та зношуванні матеріалів. У технічній літературі дедалі частіше говорять про необхідність конкретизації термінології. У цьому заслуговує на серйозну увагу визначення А. З. Ахматова. Автор підрозділяє тертя на два види: «тертя ідеально чистих (ювенільних) поверхонь» та «гідродинамічне тертя». Між цими граничними станами фрикційної системи знаходяться два проміжні режими граничного тертя, що відповідають переходам від тертя незмащених, «чистих» поверхонь до граничного та від граничного трійня до гідродинамічного. У реальних умовах експлуатації деталей машин граничне тертя майже не зустрічається. Найчастіше воно проявляється спільно з елементами «сухого» тертя (найнебезпечнішого в даному випадку), що викликають форсований знос деталей.

Застосування нових методів обробки деталей машин, у тому числі і методом поверхневого пластичного деформування, що дозволяє значно збільшити зносостійкість, створює передумови для більш сприятливих умов роботи пар ганчір'я при граничному мастиллі. Цьому також сприяє те, що між утворюються на поверхнях адсорбованими плівками з орієнтованими молекулами сили тертя в кілька разів менше, ніж у масляному шарі. Тонкий шар мастила (до 0,1 мкм і менше), що утворився на поверхнях тріщини, не руйнуючись, може витримувати навантаження, що дорівнює тисячам кілограмів на квадратний сантиметр. У той же час така масляна плівка виявляється цілком достатньою, щоб заповнити поглиблення нерівностей, внаслідок чого виступи вже не можуть входити в зачеплення на всю висоту через несжимаємість рідини. Товщина масляного шару значно перевищує розмір двох-трьох молекул (радіус

дії молекулярних сил), що перешкоджає силам молекулярного взаємодії поверхонь тертя. Сили тертя при граничному мастилі виявляються тільки між адсорбованими плівками, при цьому знос деталей, як правило, мінімальний. Взаємодія поверхонь у присутності граничного шару при контакті тертя характеризується сукупністю тісно пов'язаних між собою явищ, що протікають у молекулярній структурі граничного шару, на фазових поверхнях і прилеглих шарах металу.

Таким чином, в одному випадку граничне тертя може сприяти форсованому зносу пар тертя, в іншому - сприятливо позначатися на їх довговічності. Поки зустрічається частіше перше, для глибшого пізнання процесів, що відбуваються, потрібні подальші дослідження. У цих дослідженнях знос пар тертя підпорядковується загальної закономірності, він характеризується трьома основними періодами: приробітку, нормальної роботи н форсованого (аварійного) зносу.

Період приробітку характеризувався найбільш інтенсивним зношуванням сталей, період нормальної роботи – більш стабільним зносом. Аварійний знос в експериментах був відсутній, оскільки збільшення проміжків у поєднанні при даній методиці випробувань не було. Тільки за надмірного розрідження мастила, порушення масляної плівки виникали умови, характерні для «напівсухого» тертя. І тут знос був надзвичайно великий, а якісні показники іншими. Нерідко відзначалися задираки та схоплювання поверхонь. Форма, розміри та характер сполучення зразка та контртіла наведені на рисунку. Тривалість випробувань завжди встановлювалася дослідним шляхом виходячи з величини відсутнього зносу. З метою отримання можливості застосування експериментальних даних та отриманих на їх основі висновків до пар тертя, що мають іншу площу та шлях тертя, абсолютний знос зразків віднесений до одиниці площі та одиниці шляху тертя. Питомий знос ( $I$ ), інтенсивність зношування ( $I_w$ ), зносостійкість ( $W$ ) та витрачена робота тертя ( $A$ ), взяті разом, дали повнішу картину процесу, а також

дозволили провести порівняння сталей різного хімічного складу залежно від виду механічної обробки поверхні .

На процес тертя і знос деталей істотно впливають пружні коливання, які залежать від висоти мікронерівностей, мікропрофілю поверхні та інших геометричних параметрів сполучення. Джерелом коливання можуть бути періодичні імпульси, властиві, наприклад, двигунам внутрішнього згоряння, або сили інерції мас, що рухаються. Експерименти показали, що зовнішній збудник коливань сполучення особливо в діапазоні ультразвукових частот впливає на зміну моменту тертя, часу приробітку, зносу поверхонь, кавітаційні та інші процеси, що протікають в граничних шарах мастила. У досліджуваному діапазоні навантажень під впливом високочастотних коливань момент тертя знижується на 40...45%, а знос поверхні зростає. Ця закономірність зберігається і після періоду припацювання. При вивченні процесу тертя та зносу деталей відзначені явища кавітації мастила, утворення потоків рідини, форма та інтенсивність яких залежать від мікропрофілю поверхні. Зважаючи на те, що відстань між, сполученими поверхнями надзвичайно мала, вона проявляє себе як капіляр, що забезпечує подачу мастила та зниження моменту тертя. Під дією зовнішнього збудника, що посилює енергію пружних коливань, відбуваються деформації стиснення і розтягування, які чергуються, що викликає збільшення температури поверхневих шарів деталей, виникнення динамічних явищ в зоні тертя і збільшення зносу.

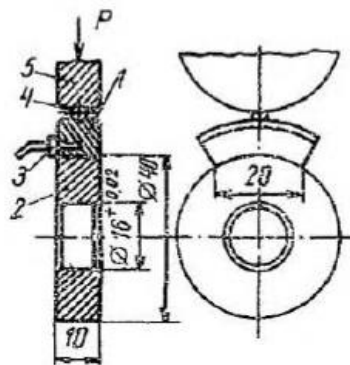


Рис 2.1. Схема випробування зразків по зношуванню: 1 – контртіло; 2 – зразок; 3 – термопара; 4 – кулька; 5 – фіксатор.

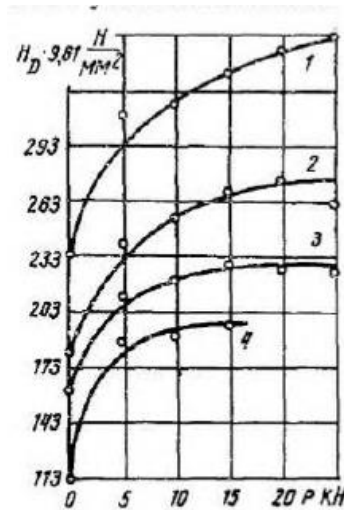


Рис. 2.2. Зміна твердості поверхні та залежності від зусилля обкатування: 1 – сталь 45Г2; 2 – сталь 15; 3 – сталь 35; 4 – ст.аль 15

Результати досліджень показують, що поверхня, обкатана за оптимальними режимами, має підвищену твердість та сприятливий для мастила мікропрофіль. Збільшення несучої здатності поверхні підвищує її зносостійкість. Ці властивості, як і скорочення часу опрацювання, збільшують період нормальної роботи сполучення. Зразки, що отримали оптимальну і навіть незначну наклеп, прироблялися швидше за шліфовані і перенаклепані.

У обкатаних зразків порівняно зі шліфованими на початку приробітку не виявлено стрибкоподібного зношування. Навпаки, на великому відрізку шляху відзначено стабільність умов тертя, які забезпечували більш постійну інтенсивність зношування і тим самим збільшували час нормальної роботи.

Час приробітку залежало від хімічного складу та фізико-механічних властивостей сталей: воно менше для сталі 15 і поступово збільшується відповідно до зростання вуглецю в сталі.

Знос у період опрацювання виявився найменшим у зразків, обкатаних за оптимальними режимами. Так, наприклад, за 18,8 км шляху тертя для сталі 15 він дорівнює  $0,405 \text{ мг/км-см}^2$ , для сталі 45-0,130, для сталі 35-0,133, для сталі 45Г2-0,083  $\text{мг/км-см}^2$ , що становить 43-66% від зношування шліфованих поверхонь за цей же шлях. Характерним для середньовуглецевих сталей було те, що в період приробітку знос інтенсивніше протікав ближче до торців зразка, що

утворюється набирає форми дуги з певним радіусом кривизни. Слід гадати, що це із за специфічної будови мікроструктури наклепаного шару. Перерізані у торці волокна металу відкрили доступ мастилу мікропори, які, розклинюючи їх, сприяє відриву частинок металу зразка при його стиранні. Крім того, відрив частинок сприяють також концентрація напрузи на гострих кромках і втраті пластичності матеріалу.

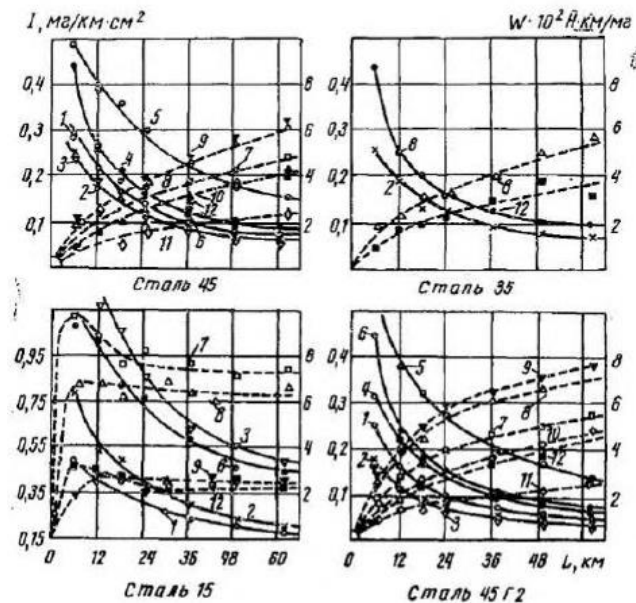


Рис. 2.3. Знос і зносостійкість сталевих, зміцнених ППД: поверхні деталей, обкатана відповідно до зусиль: 4,9, 9,8, 14,7, 19,0, 24,5 кН (15 – знос; 7-11 – зносостійкість); поверхня шліфована: 6 – знос; 12 – зносостійкість.

Відзначено, що величина зношування і тривалість приробітку залежать не тільки від ступеня попереднього наклепу і зміцнення поверхневого шару в процесі зношування, але від висоти, форми шорсткості і характеру мікропрофіля. Поверхня, обкатана роликками, характеризується не тільки наявністю сприятливих фізико-механічних властивостей, а й відсутністю загострених неоднорідних за формою та зміцненням мікронерівностей. Після приробітку висота шорсткості не залишалася постійною. Характер мікропрофілю та чистота до кінця приробітку залежали від умов тертя та фізико-механічних властивостей поверхні. Поверхня зразків після обробки та випробувань на знос представлена на рис. 2.5, 2.6.

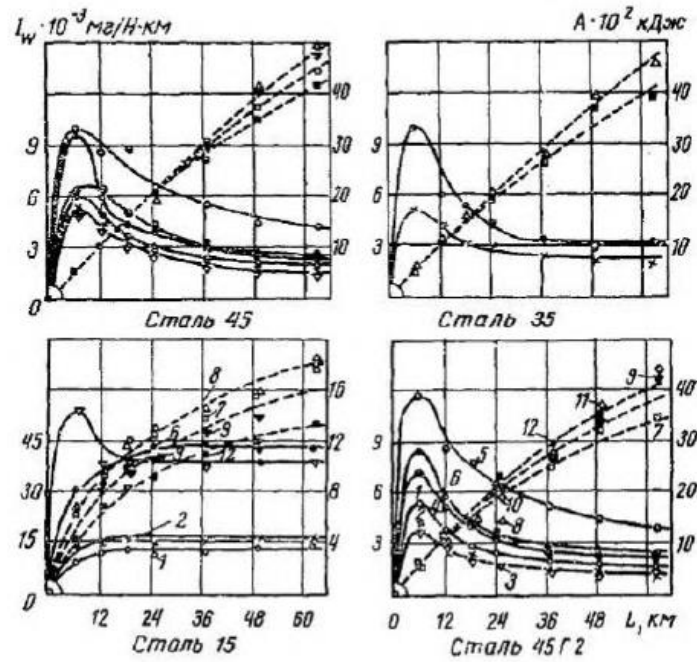


Рис. 2.4. Інтенсивність зносу (1-5) і робота, затрачена на знос поверхні (7-11), обкатана відповідно зусиллям 4,9; 9,8; 14,7; 19,6; 24,5 кН і інтенсивність зносі та роботи, затраченої на знос шліфованої поверхні.

Експерименти підтвердили результати дослідників, які дотримуються точки зору, що основа фізичної сутності процесу зношування перебуває у зміні фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу під впливом пластичної деформації.

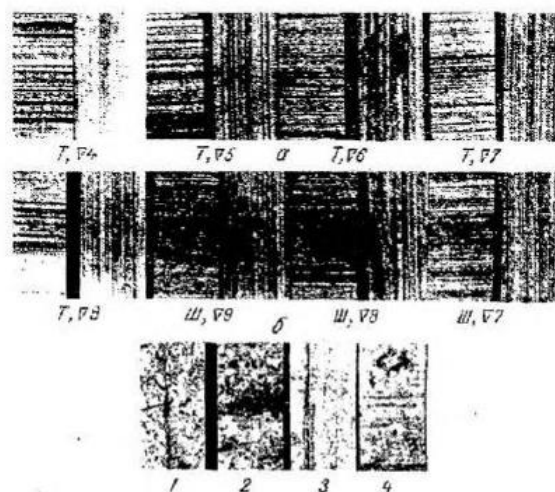


Рис. 2.5. Поверхня зразків (8-й клас чистоти) після різних видів обробки.  $\times 200$ : а - точіння; б - обкатування із зусиллям 4,9 кН. 1 - сталь 45; 2 - сталь 35; 3 - сталь 15; 4 - сталь 45Г2





Рис. 2.6. Поверхня зразків після випробування на: а – поверхню тертя і період опрацювання (сталь 15); б-г – поверхня після 62 км шляху тертя (відповідно стали 15, 45, 45Г2); д – шаржування поверхні тертя мікрочастинкою продуктів зносу (сталь 45Г2); е – вузол схоплювання на поверхні тертя (сталь 45, ж – локальне втомне руйнування поверхні тертя (сталь 45).

Відомо, що, виходячи з конкретних умов роботи сполучення, взаємодія поверхонь, що труться, можна розділити на механічне і молекулярне або те й інше. Якщо вважати, що механічне впровадження переважає, то зниження зносу можна досягти шляхом зменшення взаємного впровадження поверхонь, що труться, тобто шляхом зміни характеру мікро-профілю, а також за рахунок підвищення твердості поверхні. Процес молекулярної взаємодії та подальшого схоплювання протікає інтенсивно лише у разі безпосереднього контакту чистих поверхонь металу та пластичної деформації у місці контакту. Тому попереднє наклеп поверхонь тертя знижує можливість їх подальшого деформування в період стирання і тим самим зменшує ймовірність схоплювання.

Температурний фактор істотно змінює якість і зносостійкість оброблених поверхонь, що труться. Теплове зношування при підвищених тисках стає визначальним. Величина його може зростати у кілька порядків проти звичайних умов роботи деталей машин чи інструмента. Тому дослідження теплових процесів становить значний інтерес.

Експерименти показали, що між ступенем наклепу, твердістю, хімічним складом сталі, характером мікропрофіля та зносом поверхні існує певна закономірність. З порівняння результатів видно, що за один і той же шлях тертя, що дорівнює 62,8 км, знос поверхні зразків із середньовуглецевих, легованої та маловуглецевої сталей неоднаковий. Характер зміни величини питомого зносу за весь шлях тертя у всіх випадках має одну і ту ж закономірність. Деталі зі сталі 45, твердість поверхні яких дорівнювала 241 і 274 Нр, мали знос відповідно 0.071 п 0.153 мг/км см<sup>2</sup>.

Зі збільшенням ступеня пластичної деформації величина зносу спочатку зменшується, а потім, незважаючи на деяке підвищення твердості поверхні, що продовжується, зростає. Це пояснюється тим, що до певної міри наклеп щільність дислокацій сприяє зміцненню поверхневого шару і перешкоджає відриву мікрочастинок металу. Коли ж пластичні можливості вичерпані, хоча зовнішніх ознак (підвищення шорсткості, луцення поверхні) не виявлено, мікрооб'єми стали вже на межі перенапруги. Подальший неминучий розвиток пластичної деформації в процесі тертя призводить до втоми металу, зниження його міцності, утворення мікротріщин, окислення під дією високої температури мастила та повітря поверхневого шару («ефект Ребіндера»). Ці зміни інтенсифікують зношування сталі.

З малюнка видно, що на початку шляху тертя наклеп і знос поверхні сталей робить більш помітний вплив, потім цей вплив поступово зменшується. Зразки, обкатані за оптимальними режимами, мали менший знос, ніж шліфовані та «перенаклепані». У цьому випадку на одиницю питомого зносу витрачається більша робота тертя. Вимірювання моменту тертя і температури в процесі випробувань показало, що їх величина для зразків з різним ступенем наклеп відрізняється мало. Була відзначена деяка тенденція до зменшення моменту тертя та температури при стиранні поверхні, обкатаної за оптимальними режимами і що має мінімальну висоту мікронерівностей до попереднього приробітку (зразки, обкатані із зусиллями на ролики від 9,8 до 14,7 кН), Слід

сказати, що температура у місцях дійсного контакту поверхонь тертя більш значна у зразків, шліфованих та обкатаних режимами вище оптимальних. Це викликано наявністю великої кількості локальних зачеплень. Останні виникають через несприятливу форму шорсткості: цими ж причинами слід пояснити підвищення моменту тертя. Коефіцієнт тертя при зносі для всіх зразків був неоднаковий і знаходився в межах 0,065 - 0,070. У початковий період випробувань він трохи вищий у зразків, що мають максимальний ступінь наклепу, а також у зразків зі шліфованою поверхнею, що дорівнює 0,110.

Висота мікронерівностей поверхні в процесі випробувань не залишалася постійною. Відхилення шорсткості від середньої лінії профілю змінювалося в певних межах (для кожної пари тертя). У поверхні, обкатаної із зусиллями 9,8, 14,7 кН, величина була меншою, ніж у зразків, обкатаних із зусиллями вище оптимальних. В останньому випадку чистота поверхонь у процесі випробувань на зношування погіршувалась значно швидше. У ряді випадків спостерігалися вириви металу, подряпини, сколювання окремих частинок. Це підтверджує припущення, що мікрооб'єми вичерпали пластичні можливості. Зрушення по площинах ковзання і дроблення блоків, що почалися при обкатуванні, досягли критичних значень, що призвело до зниження міцності сталі. Частки, що відокремилися, що мають більш високу твердість, ніж основний метал, шаржували поверхні тертя, погіршували їх чистоту і збільшували знос.

Аналогічні результати отримані при випробуванні зразків сталі 35 обкатаних з зусиллям 9,8 кН. Однак їх знос за інших рівних умов був дещо більшим  $0,0645 \text{ мг/км-см}^2$ , витрачена робота на одиницю питомого зносу, температура при зносі і момент тертя дещо меншими. Подібні явища пояснюються тим, що твердість поверхні зразків після обкатування була нижчою, ніж у зразків зі сталі 45. Зменшення сталі вуглецю дещо знизило її зносостійкість.

Аналіз зношування і зносостійкості поверхні від шляху тертя говорить про найбільш інтенсивному зносі в початковий період. Після опрацювання інтенсивність зношування стабілізується.

Досліди показали, що найбільш зносостійкою є поверхня, оброблена за оптимальними режимами обкатування, тобто по режимах, що дає можливість отримати мінімальну висоту мікроєрости і достатнє зміцнення сталі за рахунок наклепу.

Дослідження, аналогічні викладеним вище, були проведені на зразках з маловуглецевої та легованої сталей. Сталь 15 має крупнозернисту перліто-феритну структуру і має велику здатність до наклепування. У сталі 45Г2, навпаки, дрібнозерниста структура. Порівняно невелика відмінність у параметрах решітки між Fe та Mn та майже однакова кристалічна будова зумовили взаємне розчинення цих алотропічних форм елементів. Розчинення марганцю та зміна параметра решітки призвели до подрібнення зерен фериту та підвищення твердості.

Випробування на зношування маловуглецевої сталі показали, що зразки, обкатані з зусиллями 4,9, 9,8 і 14,7 кН і отримали твердість 187, 190, 192 одиниць Нр (вихідна твердість 113 Нр), за 62.8 км шляхи тертя зношення відповідно на 0,183; 0,212; 0,478 мг/км-см<sup>2</sup>. Найменший знос поверхні, обкатаної із зусиллям 4,9 кН, при найбільшій роботі на одиницю питомого зносу пояснюється тим, що остання витрачається як на зношування поверхні, так і на подальше пластичне деформування поверхневого шару.

У зв'язку з тим, що знос супроводжується пластичною деформацією, зношування матеріалу може бути виражене залежністю

$$W=W_1+W_2=\frac{G}{\gamma} + W \quad (2.1)$$

де  $W_1$ - об'єм частинок, видалених з поверхні тертя;  $W_2$ - об'єм частинок, переміщених за рахунок пластичних деформацій;  $G$  - вага частинок, видалених із поверхні тертя;  $\gamma$  -питома вага матеріалу (сталі).

Слід зазначити, що процес зносу, що складається з пружних та пластичних деформацій, з руйнування та зрушень, пов'язаний також із фізико-механічними властивостями поверхневих шарів сталі. Найбільша інтенсивність зношування у перші 6-8 км шляху тертя відзначена у зразків, обкатаних із зусиллям 14,7 кН, а найбільша зносостійкість - у зразків, обкатаних із зусиллям 4,9 кН. В останніх на цій ділянці шляху тертя зносостійкість досягає свого максимуму, потім дещо знижується. Це пояснюється тим, що в початковий період зносу, як було показано вище, відбувається лише пластична деформація поверхневого шару без відриву частинок сталі поверхні. В результаті механічних сил тертя дуже тонкий поверхневий шар металу зазнає структурних та фізико-механічних змін.

Експерименти показали, що інтенсивність зношування та зношування поверхні збільшуються з деякого значення ступеня наклепу, незважаючи на зростання її твердості. Збільшення зносу у разі викликано надмірним дробленням блоків і локалізацією дислокацій та його полів. Крім того, при обкатуванні із зусиллям 14,7 кН відбувається погіршення характеру мікропрофілю поверхні. Метал вичавлюється з-під роликів і на поверхні утворюється хвилястість. У процесі випробування на зношування гребінці хвиль першими вступають у контакт з контртілом і стираються значно швидше, ніж інші ділянки. Продукти зносу, що утворилися, збільшують інтенсивність зношування сполучених деталей. При експериментах був відзначено значних змін температури, моменту і коефіцієнта тертя від ступеня наклепу. При зносі температура була рівною 323°К, момент 39,4Нсм, коефіцієнт тертя 0,0266. Значення знаходилося в межах 0,32-0,35 мкм.

Випробування на знос марганцовистої сталі показали її перевагу перед середовуглецевою. Зносостійкість поверхні значно вища, питомий знос при оптимальному наклепі в кінці шляху тертя дорівнював 0,0437 мг/км-см<sup>2</sup>, що становить 74% від зношування зразків зі сталі 45. Раніше було відзначено, що марганець підвищує твердість і пластичність сталі, покращує її мікроструктуру, чим сприятливо впливає на характеристики зміцнення і зносостійкість.

Дисперсність структури, незначна наявність карбідів також веде до підвищення зносостійкості сталі. Питоме зношування зразків, обкатаних із зусиллям 4,9 кН, склало 0,0495, а обкатаних із зусиллям 24,5 кН — 0.136 мг/кг-см<sup>2</sup>. При цьому закономірність впливу наклепу на зношування збереглася і для даної марки сталі (чим більший наклеп, тим більший знос). Причому велика робота, витрачена на одиницю питомого зносу, знадобилася для зразків, обкатаних із середніми зусиллями – 9,8; 14,1 кН.

Температура на відстані 0,1 мм від зони тертя при зносі, що встановилася, була 410 °К. Зі збільшенням ступеня наклепу до оптимальних значень відзначено деяку тенденцію до її зниження. Це пов'язано з тим, що поверхня тертя має більш сприятливий мікропрофіль для утримання мастила. Гребінці обтічної форми зменшують можливість порушення масляної плівки. Слід припустити, що граничний шар має найменшу товщину, тобто в даному випадку, згідно з поглядами Гарді, коефіцієнт і сила тертя будуть мінімальним.

Таким чином, зносостійкість сталевих поверхонь, що працюють в умовах граничного тертя ковзання, підвищується до певних (оптимальних) величин попереднього наклепу. Наклеп понад оптимальне значення збільшує інтенсивність зношування, погіршує кількісні характеристики зносу. Ступінь попереднього наклепу для конкретного матеріалу може бути визначений лише досвідченим шляхом з урахуванням його фізико-механічних властивостей.

### **Висновки по розділу**

Експерименти показали, що питомий знос зменшується зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі. Збільшення вуглецю підвищує твердість сталі, що веде в наших дослідах підвищення зносостійкості поверхні. Введення в сталь незначної кількості марганцю дає змогу отримати більш високий комплекс механічних властивостей. Він сприяє більш стабільному зносу, так як уповільнює процес відпуску наклепу при терті, зберігаючи при цьому високу пластичність сталі.

У наших дослідках при певному кожної сталі оптимальному наклепі більш зносостійкою виявилася сталь 45Г2, менш зносостійкою - сталь 15, сталі 45 і 35 займають проміжне положення.

Одним з найбільш цінних для практики ефектів обробки поверхні наклепом є отримання на поверхні деталей стискаючої залишкової напруги. Наявність макро- та мікронапружень, як показали дослідження, тягне за собою підвищення зносостійкості поверхонь, що працюють при терті ковзання в умовах граничного мастила.

Пластична деформація поверхневого шару змінює його фізико-механічні властивості і ці зміни залежать від вихідних властивостей. Добре наклепуються метали та сплави, що мають гранецентровану кристалічну решітку. Схильність до зміцнення залежить і від ступеня легування сталі: що більший легований метал і вище його вихідна твердість і міцність, тим менша його зміцнюваність при деформуванні.

### РОЗДІЛ 3

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВОГО НАКЛЕПУ

Шліци на валах, як правило, виготовляються на шліцефрезерних станках методом обкатування. Найбільш перспективним методом отримання шліців за продуктивністю, універсальністю, охопленням номенклатури валів, що випускається, є поздовжнє накочування. Однак ряд питань, пов'язаних із цим методом, ще недостатньо вивчений (механізм зміцнення матеріалу, зміна мікроструктури, твердості тощо). Тому було досліджено мікроструктуру, мікротвердість заготовки та деталі після накатки, а також мікрогеометрію поверхні. Експерименти проводилися на заводі шестерень на ведучій шестерні трактора ДТ. Накатка здійснювалася на шліценакатному верстаті МА-49 за один прохід із зусиллям накатки 54 -104 Н, швидкостях прямого ходу 500 мм/хв, зворотного - 1000 мм/хв, зі змащувальною рідиною МС-20.

Дослідження показали, що мікроструктура сталі до накатки шліц складається з зерен перліту та фериту.

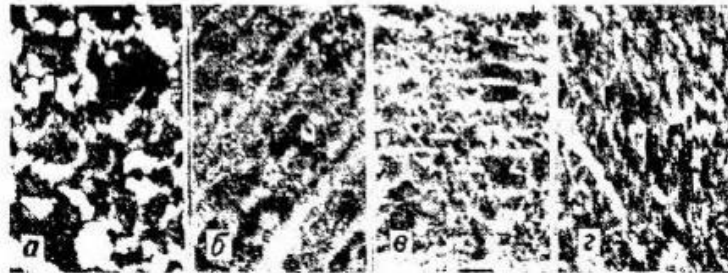


Рис. 3.1. Мікроструктура сталі 30X ГТ у поперечному перерізі,  $\times 100$ : а – до накатки; б – у западині шліца; в – у виступі шліца; г – у місці переходу від западини до виступу.

Після накатки зерна деформовані: вони сильно стиснуті в тангенціальному напрямку у западині шліца, витягнуті в радіальному напрямку області самого шліцю. Особливо це помітно у його бічних поверхонь. У центрі валу зміни мікроструктури незначні. Слід зазначити, що у місцях переходу від шліца до



западини зерна сильно витягнуті, а кутах переходу завихрені. У цих місцях можлива концентрація внутрішньої напруги.

Таким чином, поверхневі слон металу на бічній стороні шліця і в западині зазнають значних змін.

Результати вимірювань твердості показують нерівномірність розподілу деформації та напруг у поперечному перерізі накатаного шліцевого валу. Помічено збільшення твердості від центру валу до його периферії та зниження її біля самої поверхні. Це викликається різним ступенем деформації у різних обсягах профілю. Поверхневі слон у западині деформовані дещо менше, ніж нижчі. Його пояснюється тим, що матеріал цієї частини валу перерозподіляється і йде не лише на подовження, а й на розширення шліць. Крім того, внаслідок перерозподілу відбувається збільшення зовнішнього діаметра шліцевого валу. У міру наближення до центру валу деформація має загасаючий характер, що є результатом зменшення дії деформуючих сил у процесі накатки.

В результаті пластичної деформації твердість порівняно з вихідною заготовлею в шліці зростає на 20-25%, у западині - на 30-32, в кутах западини - на 40-45% (вихідна твердість дорівнює 170 HRC).

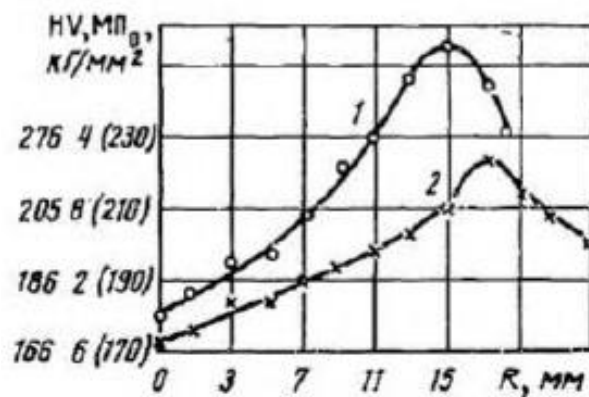


Рис. 3.2. Твердість шліцевого валу в поперечному перерізі: 1 – по радіусу до поверхні западини шліця; 2 – по радіусу до поверхні валу.

Оцінка шорсткості поверхонь шліців, отриманих фрезеруванням та накаткою, визначалася за висотою мікронерівностей. Вимірювання показали, що вали, отримані фрезеруванням, мають 3-4 клас. Чистота поверхні зовнішнього діаметра відповідає вихідній заготовці, оскільки ця поверхня інструментом не

обробляється. На всіх зразках зовнішній діаметр оброблявся на токарному верстаті та відповідав 5-му класу. Величина шорсткості западини валу при фрезеруванні дещо вище, ніж на боці. Це в основному залежить від геометричних параметрів фрези та встановлених режимів різання. Обробка черв'ячними фрезами збільшує чистоту оброблених поверхонь до 5-го класу.

Вали, отримані накаткою, мають значно меншу шорсткість бічної сторони на поверхні внутрішнього діаметра. Середньоарифметичне відхилення профілю знаходиться в межах 0,63-0,32 мкм, що відповідає 8-му класу чистоти.

Технологічний процес холодного накатування шліцевих валів економічно доцільний. Це підтверджується теоретичними розрахунками, в основу яких покладено дані технологічного процесу і діючі витратні норми часу, зарплати, матеріалів, інструменту, електроенергії.

Одним з найбільш універсальних та ефективних способів підвищення втомної міцності є поверхнева наклеп, і зокрема дробоструминна обробка заготовок та деталей машин. Як правило, призначення режимів дробоструминної обробки проводиться за аналогією з режимами зміцнення таких деталей або після проведення лабораторних експериментів на зразках.

Для більш точного визначення режимів дробоструминної обробки необхідно подальше вивчення впливу окремих параметрів на ефективність зміцнення. Це особливо важливо при знаходженні оптимальних режимів поверхневої дробоструминної обробки деталей, що працюють у складних умовах навантаження (наприклад, шатуни, колінчасті вали двигунів внутрішнього згоряння та ін.).

У роботі наведено результати досліджень на витривалість зразків 010 мм із сталі 40Х (табл. 3.1). Експерименти проводилися при симетричному круговому вигині машиною У-20.

Таблиця 3.1. Хімічний склад та фізико-механічні властивості сталі

Марка сталі	Вміст елементів. %						$\sigma_{\text{п}}$	$\sigma_{\text{т}}$	$\delta$	$\varphi$	$\frac{a_k}{\text{Дж}} \frac{\text{см}^2}{\text{см}^2}$
	С	Mn	Si	S	P	Cr	МН/м <sup>2</sup>		%		
40Х	0,41	0,62	0,26	0,025	0,027	1,0	771,0	628,8	21,6	52,0	51
40Р	0,44	0,63	0,18	0,016	0,014	0,1	741,6	574,8	22,7	56,3	44,1

Випробовувалися такі серії зразків: зразки, піддані термообробці та шліфовані на глибину безвуглецевого шару; зразки, піддані термообробці; зразки, термооброблені та піддані дробоструминному зміцненню сталевим дробом діаметром 0,6-0,8 мм при часі наклепу 2 хв; такі ж зразки, зміцнені за часу наклепу 1 хв; зразки, термооброблені та піддані дробоструминному зміцненню сталевим дробом діаметром 1,0-1,2 мм при часі наклепу 2 хв; зразки, термооброблені та піддані дробоструминному зміцненню сталевим дробом діаметром 1,0-1,2 мм при часі наклепу 1 хв; такі ж зразки при часі наклепу 0,5 хв.

Після термічної обробки зразки пройшли контроль на твердість, яка знаходилася в межах 217 - 249 *НВ*. Нагрів зразків перед нормалізацією проводиться з метою одержання на поверхні без вуглецевого шару, що відповідає без вуглецевому шару на поверхні шатуна (глибина безвуглецевості 0,15-0,25 мм).

Режим зміцнення кожної серії зразків відрізнявся або часом наклепу, або діаметром дроби. Режим дробоструминної обробки наступний: діаметр дроби - 0,6-0,8 мм або 1,0-1,2 мм, витрата дроби - 40 кг/хв, швидкість потоку дроби - 42 м/с, матеріал дроби - пружинна сталь, число оборотів ротора турбіни - 2250 об/хв.

Дробеструминному зміцненню піддавалися радіус переходу від  $\varnothing$  20 мм до стрижня зразка і сам стрижень.

В результаті випробування отримано межі витривалості зразків залежно від режимів їх обробки.

Таким чином, поверхнева обробка зразків дробом 006-12 мм підвищує їх межу витривалості на 40%; шар без вуглецю знижує межу витривалості на 40%.

Встановлено, що діаметр дробу при обробці суттєвого впливу на зміну межі витривалості не надає, а тривалість обробки дробом істотно впливає на зміцнення зразків, причому зі збільшенням часу обробки до 1 хв межа витривалості зростає, а потім знижується. З метою визначення впливу наклепу на межу витривалості проведено дослідження на реальних деталях-шатуна дизельного двигуна Д-50. Експерименти виконані на машині резонансного типу, що забезпечує навантаження деталі за симетричним циклом розтягування - стиснення. Частота навантаження до 3000 циклів на хвилину. За основу прийнято 107 циклів. Визначення дійсних напруг у шатуні здійснювалося тензометричним методом (використані датчики опору з базою 20 мм, підсилювач та осцилограф Н-102). Режими обробки взяті оптимальними.

Таблиця 3.2 – Межа витривалості деталей залежно від виду та режимів обробки

№ серії	Час надклепування зразка, хв.	Діаметр дробу, мм	Обробка поверхні зразка	Межа витривалості, МН/м <sup>2</sup>
I	-		Шліфування на глибину безвуглецевого шару	184,5
II	-		Нешліфування	196,2
III	2,0	0,6-0,8	Дробеструмний наклеп	230,5
IV	0,5	0,6-0,8		186,4
V	1,0	0,6—0,8		274,7
VI	2,0	1.0-1,2		210,9
VII	1,0	1,0-1.2		264,9
VIII	0,5	1.0—1.2		225,6

Експерименти показали, що шатуни марки сталь 40х без поверхневого зміцнення дробом мають межу витривалості  $\sigma_{-1} = 142,2$  МН/м<sup>2</sup>. Характерні злами у шатунів цієї серії сталися по стрижню. Наприклад, один шатун зруйнувався при напрузі  $\sigma = 166,7$  МН/м<sup>2</sup> і навантаженні 1,52-106 циклів, а інший при напрузі  $\sigma = 196,2$  МН/м<sup>2</sup> і навантаженні 0,26-106 циклів. У першому випадку тріщина втоми розпочалася з поверхні відбитка преса Бринелля. Зона втоми займає близько 30% поверхні зламу, що вказує на наявність значних навантажень при

випробуваннях. У другому випадку осередком втомного руйнування з'явилися глибокі ризики від наждачного кола. Зона втоми у разі становила 20% всієї поверхні зламу.

При випробуванні серії шатунів, виготовлених зі сталі 40Х і підданих дробоструминному наклепу, значення межі втоми підвищилося до 186,4 МН/м<sup>2</sup>, тобто на 32%. Під час випробування руйнування відбувалося лише за стрижнем. Вогнищами втомного руйнування з'явилися макронерівності поверхні двутавра шатуна, вплив яких не змогла ліквідувати дробоструминна обробка.

В результаті випробувань шатунів, виготовлених зі сталі 40Р, отримано межу витривалості при розтягуванні стисненні 147,1 МН/м<sup>2</sup>. Руйнування шатунів відбувалося або за стрижнем, або за поршневою головкою. Один з шатунів при напрузі 106,7 МН/м<sup>2</sup> витримав 1,84 10<sup>6</sup> циклів та аружепія і зруйнувався по поршневій головці. Тріщина втоми почалася з краю отвору під втулку поршневого пальця. Вогнищем стала гостра кромка в отворі верхньої головки під втулку поршневого пальця (відсутність фаски).

Результати випробування цієї серії показують, що вогнищами руйнування втоми шатунів з'явилися або дефекти поверхні, отримані в результаті обгару штампю або недбалого транспортування шатуна, або технологічні концентратори напруг.

Шатуни, виготовлені зі сталі 40Р і піддані дробоструминному зміцненню, при випробуванні мали межу витривалості 176,6 МН/м<sup>2</sup>, що на 20% вище за межу витривалості неукріплених шатунів.

У шатунах, зруйнованих по поршневій голівці, осередками з'явилися найглибші місця контактної корозії. Тріщини втоми починалися із внутрішньої поверхні поршневої головки з місць глибоких раковин, утворених контактною корозією.

Таким чином, дробоструминна обробка шатунів, виготовлених зі сталі 40Х, підвищує межу витривалості по стрижню до 186,4 МН/м<sup>2</sup> (на 32%), а шатунів, виготовлених зі сталі 40Р, до 176,6 МН/м<sup>2</sup> (на 20 %). Експерименти

показали, що втомні руйнування незміцнених шатунів, виготовлених зі сталей 40X і 40P, головним чином відбуваються по стрижню шатуна і лише в окремих випадках по поршневій головці, що є наслідком відсутності фаски на торцях отворів під втулку поршня.

У зміцнених шатунів зі сталі 40X руйнування також відбуваються по стрижню, а у шатунів, виготовлених із сталі марки 40P, відзначені руйнування як по стрижню, так і по поршневій головці, що вказує на достатню рівномірність цих елементів після дробустрімінного зміцнення.

Усунення концентраторів напруг, таких, як штампувальні клейма, поперечні ризики від зачищення стрижня шатуна наждачним кругом, його випробування на твердість і самих відбитків кульки, гострих кромки на торцях отворів під втулку поршневого пальця, в поєднанні з дробнеструминою обробкою, це відкриває можливості зниження його ваги та підвищення надійності двигунів внутрішнього згорання.

Вивчення поверхні та характеру зносу деталей сільськогосподарських машин та промислового обладнання, що працюють при терті ковзання в умовах, близьких до граничного мастила, дозволило зробити деякі узагальнення. Сталеві деталі типу осей: осі сівалок, шахраїв, варіаторів комбайнів та ін., штоки ковальських молотів, напрямні стійки, дзеркало гідравлічних циліндрів н т. д., як правило, мають нерівномірне зношування як в осьовому, так і в радіальному напрямку. На деталях сільськогосподарських машин у більшості випадків відмічені задираки, місцеві виривання.

При вивченні металу по перерізу деталі можна було виділити шар, структура якого, отже, і пов'язані з нею властивості відрізнялися від структури та властивостей основного металу. Вимірювання твердості поверхні тертя осі варіатора жнивarki комбайна показали, що її твердість вище твердості основного металу на 6-7 од. Відзначено також, що дотик геометричних контурів сполучених деталей, як правило, відбувається по вершинах найбільш нерівностей, що виступають, що утворилися в процесі механічної обробки та

експлуатації. Під дією зовнішнього навантаження виступи, що входять в контакт, деформуються, що призводить до об'ємних деформацій окремих ділянок поверхневого шару, до зміни залишкових внутрішніх напруг. Як було показано вище, наклепаний шар складається з роздроблених кристалічних зерен, міжатомні зв'язки яких значно зменшені.

Найчастіше площа істинного контакту поверхонь тертя значно менше їх номінальної площі. При цьому навантаження сприймається окремими частинами поверхні тертя, чим і пояснюється нерівномірне, а в ряді випадків інтенсивне зношування. Це є наслідком геометричних похибок форми деталей, і навіть характером мікропрофілю поверхонь тертя. Від останнього залежать, як ми бачили при лабораторних дослідженнях, несуча здатність та зносостійкість поверхні. Ці висновки підтверджені експлуатаційними випробуваннями, у яких методика досліджень переважно збережена.

Порівняльні випробування на зношування поверхні в залежності від виду її обробки проведені на деталях, що перебували в реальних умовах роботи. Були випробувані деталі № 60421 А та 60422 як зі шліфованою, так і з обкатаною поверхнею. Вісь варіатора мотовила жнивarki комбайна працює в парі з втулкою із сірого чавуну СЧ 15-32. Вона є одночасно гідроциліндром, у якому зворотно-поступально рухається шток.

Поверхня деталей була обкатана за попередньо обраними оптимальними режимами: зусилля на ролики – 2,4, 4,9 кН, поздовжня подача – 0,21 мм / об, число оборотів - 500 об / хв, число проходів – один. Діаметр роликів 30 мм, профільний радіус що зміцнює 10, що згладжують - 500 мм. Висота мікронерівності поверхні заготовок була в межах 6-го класу. після обкатування - у межах 8-го класу. Величина абсолютного зношування визначалася як різниця діаметра деталі до випробувань і після них.

Таблиця 3.3 – Зношування деталей комбайна в залежності від виду обробки поверхні

Прибрано зернових, га	Діаметр деталі, мм		Середній знос на діаметр. мм	Питомий знос. 10 мм/га	Вид обробки поверхні	Матеріал деталі - сталь
	до дослідю	після дослідю				
965	44,820	44,620	0,200	0,0021	Шліфування	45
1020	45,000	44,740	0,260	0,0026		45
265	45,080	44,980	0,100	0,0030		45
240	45,010	44,972	0,038	0,0016	Обкатка	45
198	45,040	45,002	0,038	0,0019		15
190	45,060	45,006	0,054	0,0028		15
211	45,000	44,964	0,036	0,0017		45
183	45,010	44,990	0,200	0,0011		45

Спостереження показали, що зношування поверхні осі варіатора відбувається нерівномірно, велике вироблення з одного боку з кутом охоплення 130 -150°. Це відбувається через односторонню дію сили від натягу ремня. Після дослідів поверхня деталей мала клас чистоти нижчий, ніж до дослідів. У деяких випадках на шліфованій поверхні були сліди задир. У осей та поршнів з обкатаною поверхнею цих явищ не було. Зношення сполученої деталі (чавунної втулки) завжди було рівномірним і незначним. Поверхня мала висоту шорсткості таку ж, як до досвіду. Питоме зношування осей з обкатаною поверхнею було вдвічі менше, ніж у деталей зі шліфованою поверхнею.

За час роботи в різних господарях республіки не відзначалося простою комбайнів через виходу з ладу вузла, деталі якого оброблені обкатуванням. Гумові кільця, що працюють на поверхні поршня, і сам поршень не мали слідів зносу. Не спостерігалось також витoku олії. Проведення експлуатаційних випробувань у господарствах, що мають різний рельєф місцевості та врожайність зернових, дозволило виключити суб'єктивні причини, що впливають на зношування. Отримані дані кажуть, що обкатування має переваги перед шліфуванням, що при обробці деталей поверхневим пластичним деформуванням можлива заміна середньовуглецевої сталі дешевшою маловуглецевою, без шкоди для експлуатаційних властивостей деталей.



## **Висновки по розділу**

Ефективність наклепанного шару в експлуатаційних умовах все ж таки проявляється по-різному. Найкращі результати досягаються при роботі пар з невеликими тисками та швидкостями ковзання. За рахунок підвищення мікротвердості поверхневого шару зменшується його стирання, проте зв'язок мікротвердості зі зносостійкістю носить більш якісний характер і поки що важко піддається математичному опису.

## ВИСНОВКИ

Основними факторами, що впливають на глибину та ступінь ППД, на шорсткість, а також на величину залишкових напруг, розмір блоків, щільність дислокацій та зносостійкість деформованого шару, є середній тиск у зоні контакту робочого інструменту з деталлю, поздовжня подача та число проходів. Технологічні режими обробки ППД у кожному конкретному випадку повинні бути уточнені експериментально з урахуванням масштабного фактора, фізико-механічних властивостей та шорсткості поверхні, що обробляється.

У зв'язку з тим що при обробці деталей ППД нова поверхня виходить в результаті одночасної дії геометричних факторів та пластичної деформації, основну увагу необхідно приділяти питанню топографії та геометричної точності форми інструменту та попередньо обробленої поверхні заготовки.

Зносостійкість поверхонь деталей, оброблених ППД за оптимальними режимами та працюючих в умовах тертя ковзання з мастилом, підвищується при значному скороченні періоду приробітку. Однак сприятливий вплив наклепу обмежується такими параметрами тертя, як швидкість ковзання, тиск, при яких температура на поверхнях тертя не призводить до інтенсивного розміцнення та зміни властивостей матеріалу, а також розрідження мастила та порушення окисних плівок на поверхнях тертя.

Обробка ППД деталей, які працюють без мастила, не завжди доцільна. Попередній наклеп у цьому випадку створює на поверхні тертя сприятливі умови для відриву частинок матеріалу в точках справжнього контакту, що призводить до збільшення зносу та зміни мікропрофілю поверхні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Григорьев С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего інструмента. Старый Оскол: ТНТ. 2011. 379с
2. Калмин Б. И. Физико-химические процессы при обработке металлов резанием. Омск: СибАДИ, 2003. 109 с.
3. Драгобецкий В.В. Технология получения износостойких слоистых композиций со сталью Гадфильда. *Новые решения в современных технологиях. Вестник ХГПУ*. Вып. 80. Харьков. 2000. С. 63-65.
4. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. Москва : Машиностроение, 1976. 164 с.
5. Добровольский А. Г. Абразивная износостойкость материалов : Справочное пособие. Киев : Техника, 1989. 126 с
6. . Эдигаров В. Р. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения. *Современные наукоемкие технологии*. 2012. № 3 С. 32–35.
7. Калініченко В.І. Електроіскрові покриття для зміцнення різального інструменту. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. Вип. 3(72). С. 40-46.
8. Лабунець В. Ф. Трибобіомінералогія – новий напрямок в науці про тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. Вип. 4(73). С. 40-46.
9. Маковкін О. М. Тертя та зношування інструментальних матеріалів зі зносостійкими покриттями : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. : спец. 05.02.04 – тертя та зношування в машинах / Маковкін О. М. Хмельницький, 2009. 21 с
10. Ляшенко Б. А. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. *Зб. Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: міжнар. наук.-техн. конф.* Тернопіль.: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2004. С. 381-386.

11. Кіндрачук М. В. Напружено-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії. *Проблеми тертя та зношування*. 2006, Вип. 46. С. 29-39.

12. Арзамас Б. М. Матеріалознавство. Москва : Из. МГТУ ім. Н. Е. Баумана, 2003. 648 с.

13. Алексеев В. В., Максимов И. И., Мишин П. В. Получение функциональной зависимости для коэффициента трения в почвах. *Вестник НГИЭИ*. 2018. №5 (84). С. 34–43

14. Аулін В. В., Тихий А. А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія. Кропивницький : Лисенко В. Ф. 2017. 278 с.

15. Денисенко М. Опальчук А. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. *Вісник ТНТУ*. 2011. Спецвипуск, Частина 2. С. 201–210.