

Міністерство освіти та науки України

Шифр – «Успіх»

«Можливість покращення експлуатаційних властивостей виробів шляхом  
поверхневої обробки »

2020

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
1 Аналіз публікацій.....	5
2 Мета і завдання дослідження.....	9
3 Матеріали та методики досліджень.....	10
4. Результати досліджень .....	12
4.1 Вплив різних видів механічної обробки поверхні на границю витривалості і довговічність виробів зі сталей, що цементуються.....	12
4.2 Вплив іонного бомбардування на зміну стану поверхні виробів та підвищення їх циклічної довговічності . .....	16
Висновки .....	26
Перелік посилань.....	27

## ВСТУП

Безвідмовність і довговічність виконання своїх функцій виробом в машинобудуванні визначаються рядом експлуатаційних властивостей ( статичною і втомною міцністю, корозійною стійкістю, зносостійкістю та інш.), які в значній мірі залежать від стану поверхні ( залишкових напружень, глибини і ступеня наклепу, шорсткості), що формується під впливом технологічних умов ( методів і режимів різних видів обробки).

Поверхневі шари визначають міцність деталі в цілому тому, що при експлуатації піддаються найбільшому фізико-хімічному впливу і зазнають максимальних напружень від зовнішніх навантажень.

Значна кількість деталей машин і конструкцій працюють під дією циклічних напружень, і, як свідчить статистика, понад 80% всіх випадків експлуатаційного руйнування відбувається внаслідок розвитку втомних процесів. Саме стан поверхні істотно впливає на об'ємні механічні властивості виробів, і, в першу чергу, на опір втомному руйнуванню, оскільки зародження втомної тріщини відбувається на поверхні, або поблизу поверхні.

Підвищення втомної міцності деталей машин успішно досягається шляхом застосування різних видів поверхневої обробки, які впливають на протяжність періоду зародження втомного руйнування.

Якість механічної обробки поверхні, яка формує мікрорельєф, отже концентрацію напружень в місцях надрізів, скорочує період зародження тріщин в загальному циклі втомного процесу.

Мікроскопічні залишкові напруження в поверхневому шарі виникають при будь-якому виді поверхневої обробки. Розтягувальні залишкові напруження сприяють інтенсивному утворенню втомних тріщин, в той час як стискальні діють протилежно. Обробку необхідно проводити так, щоб поряд зі зміцненням в поверхні виникли стискальні напруження, які компенсували б дію шкідливих розтягальних напружень у внутрішніх шарах виробу.

Фазовий і хімічний склад поверхневого шару має позитивний вплив на втомні характеристики лише в разі, коли зміцнений поверхневий шар сильніше чинить опір циклічній деформації, ніж внутрішні шари деталі. Тому деформаційне зміцнення поверхневого шару, що підвищує опір протіканню циклічної пластичної деформації, є радикальним і ефективним заходом підвищення втомної міцності деталі в цілому.

У зв'язку з ускладненням сучасних конструкцій, режимів експлуатації, інтенсифікацією робочих процесів здатність виробу чинити опір втомному руйнуванню набуває особливого значення. Треба підкреслити, що втома розвивається при напруженні нижче границі текучості матеріалу і призводить до зменшення експлуатаційної стійкості. Втомні пошкодження локальні, не супроводжуються якими-небудь видимими ефектами і тому дуже небезпечні

Особливо важливе підвищення втомної міцності високоміцних сталей, використання яких необхідно для забезпечення більшої несучої здатності виробів при зменшенні їх ваги. Однак, як відомо, при циклічних навантаженнях не вдається повністю реалізувати потенціальні властивості цих сталей, тому що високі значення статистичної міцності матеріалу супроводжуються сповільненням росту границі витривалості. Отже, вирішення питання підвищення опору втомі, особливо високоміцних сталей, є актуальним, так як при цьому збільшується довговічність виробів.

## 1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Автори [1] відмічають, що руйнування деформованого зразка - це детермінований процес, який контролюється станом поверхневого шару, і саме останній відіграє визначальну роль в характері, місці та часі руйнування.

Якість поверхні - це сукупність всіх її службових властивостей і, в першу чергу, втомної міцності і зносостійкості. Із погіршенням стану поверхні, з ростом висоти мікронервностей збільшується концентрація напружень та знижується опір втомі. Сан поверхні визначається не тільки мікрогеометрією нерівностей, та знаком напружень, але й хімічним складом, розміром зерна, структурними змінами, що відбуваються в процесі обробки деталей.

Автори стверджують [2,3], що мікронервності, які утворюються на поверхні внаслідок обробки, є концентраторами напружень і однією з головних причин зниження втомної міцності. Напруження на дні рисок від 2 до 2,5 разів перевищують середню величину напружень поверхневого шару. При цьому концентрація напружень залежить не лише від глибини рисок, але й від їх форми.

В роботі [4] також відмічається, що зменшення висоти шорсткості поверхні деталі підвищує втомну міцність ( рис. 1.1) і пояснюється це зміною радіуса заокруглення западин мікропрофілю. Чим глибша та гостріша западина, тим більше концентрація напружень, швидше зароджується втомна тріщина і деталь буде мати низьку границю витривалості.

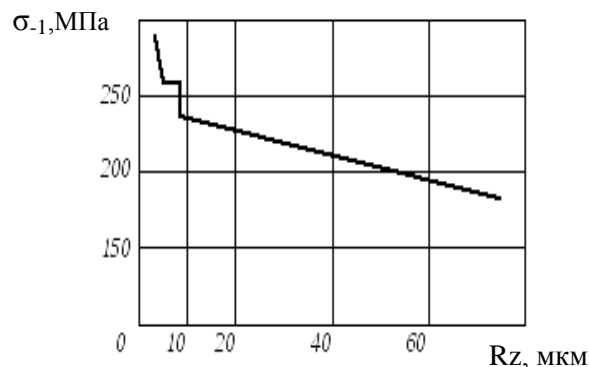


Рисунок 1.1 – Вплив шорсткості поверхні на границю витривалості

Згідно роботи [2] границя витривалості зразків з міцної сталі, поверхню яких не обробляли після прокатки, складає 70% від границі витривалості тонко полірованих зразків. Для високоміцної сталі, більш чутливої до місцевих напружень, це співвідношення істотно менше і становить 35%.

Чутливість поверхні деталі до концентраторів напружень зростає з підвищенням статичної міцності (твердості) матеріалу. У зв'язку з цим шорсткість поверхні після механічної обробки тим більше впливає на міцність від втоми деталі, чим вище границя статичної міцності матеріалу деталі.

В порівнянні із зменшенням шорсткості поверхні, значно більшою мірою втомна міцність підвищується внаслідок зміцнення і появи стискальних напружень. Тому з метою підвищення границі витривалості деталей, що працюють при знакозмінних напруженнях, широко застосовуються цементація, азотування, поверхневе гартування, обдувку дробом, які зміцнюють поверхневі шари деталі і утворюють залишкові стискальні напруження, що перешкоджають зародженню втомних тріщин.

Автор [5] доводить, що збільшення твердості поверхні приводить до підвищення границі витривалості від 2 до 3 разів і пояснює це формуванням в поверхневому шарі стискальних залишкових напружень. Це підтверджується і в роботах [6 і 7].

В роботі [8] відзначається, що в деталях після цементації, залежно від концентрації вуглецю в зміцненому шарі, значення стискальних напружень досягають від 300 до 400 МПа. Після азотування вони зростають від 700 до 800 МПа. Як наслідок границя витривалості збільшилася від 1,3 до 1,5 разів відповідно.

Для підвищення втомної міцності широкої номенклатури деталей машин з успіхом використовується поверхнева пластична деформація (ППД).

В роботі [9] наведені профілі поверхні після різних обробок, з яких чітко видно значне покращення якості поверхні після ППД ( рис. 1.2, крива 3).



Рисунок 1.2– Профілі поверхні зразків після точіння (1), шліфування (2) та ППД (3)

Дуже важливо, що ППД не просто загладжує поверхню, а дуже суттєво збільшує радіус западин, тобто зменшує їх гостроту. Зрозуміло, що при цьому зменшуються піки напружень і тим самим набагато підвищується час до початку утворення зародка тріщини і її розвитку до критичної величини. Позитивна роль ППД ще в тому, що вона може повністю нейтралізувати шорсткість після шліфування.

Одним із найефективніших методів ППД є дробострумінна обробка, оскільки дозволяє досягти максимального рівня стискальних напружень при різних конфігураціях деталей [9]. Ця обробка ефективна для деталей з грубо обробленою поверхнею або після її попереднього знеуглецьовування. Це дуже важливий практичний результат.

В роботі [5] автор доводить, що втомна міцність деталей із м'яких і пластичних сталей в наслідок зміцнення поверхні обкаткою роликком може зрости від 15 до 40% .

Ще одним важливим аспектом у вирішенні проблеми підвищення довговічності деталей машин і устаткування можна назвати можливість заліковування в металі об'ємних дефектів (пор, субмікротріщин), які накопичуються в процесі циклічного навантаження [10]. Заліковування накопичених втомних пошкоджень в результаті поверхневої обробки, коли має

місце пластична деформація поверхневих шарів, значно підвищує опір втомі і довговічність виробів.

В останні часи дослідники все частіше для підвищення втомної міцності використовують інноваційні способи дії на поверхню – ультразвукова ударна обробка (УЗУО), ультрахвильова обробка (УХО), іонне опромінювання (ІО) та іонне бомбардування (ІБ), які кардинально змінюють структурно-напружений стан, щільність та мікрогеометрію поверхневого шару.

В роботі [11] встановлено, що після УЗУО зразків зі сталі Ст3 втомна міцність збільшилася на 50%, а довговічність зросла на порядок. Покращення втомних характеристик автори пояснюють утворенням в поверхневому шарі субзеренної структури, збільшенням густини дислокацій, створенням стискальних напружень. Все це в сукупності утруднює зародження втомних тріщин, а також ефективно гальмує розвиток мікротріщин, які вже є в металі, та їх вихід їх на поверхню.

Такими же змінами структурного стану поверхні пояснюється підвищення втомної міцності після УЗУО і в роботах [12 -14].

Автори [15,16,17] відзначають істотне збільшення втомної міцності після формування на поверхні нанокристалічного шару під впливом іонного бомбардування.

В роботі [18] також встановлено, що наноструктурування поверхневого шару підвищило міцність від втоми високолегованих сталей від 1,5 до 1,8 разів.

Авторами [19] було встановлено, що обробка поверхні виробів з конструкційних сталей іонно-плазмовим методом (КІБ) істотно (~ на 24%) підвищує тимчасовий опір і ~ на 42% умовну границю міцності. При цьому значення показників пластичності не знижуються, але навіть декілька підвищуються, тобто збільшується конструкційна міцність.

За результатами роботи [20] іонне бомбардування із забезпеченням наноструктури поверхні сталевих виробів призводить лише до дуже незначного підвищення границі витривалості  $\sigma_{-1}$  (~ 5%).



Подальші дослідження в цьому інноваційному напрямку викликають значний інтерес і, безумовно, своєчасні.

Згідно аналізу літературних даних саме шляхом використанням сучасних технологій, в тому числі іонно-вакуумних, можливо досягти найкращих результатів як с точки зору механічних властивостей, і в першу чергу втомної міцності, так і с точки зору витрат. Подальші дослідження в цьому інноваційному напрямку викликають значний інтерес і, безумовно, своєчасні, бо диктуються потребами виробництва

### 3 МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета даної роботи – підвищення опору втомі і збільшення довговічності виробів, що працюють в умовах циклічних навантажень, шляхом зміни стану поверхні.

Задачі дослідження:

1. Дослідити вплив різних способів комбінованої ( механічної в поєднанні з хіміко-термічною) обробки поверхні та границю витривалості сталі 20X2H4A, яка широко застосовується для важконавантажених шестерен;
2. Вивчити зміни структурно - напруженого стану поверхневого шару під дією бомбардування низькоенергетичними іонами, та його вплив на показники втомної міцності сталей і довговічність виробів з них.

### 3 МАТЕРІАЛІ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Оскільки стан поверхневого шару складно впливає на характер структурних змін і властивості виробу, в якості матеріалу для дослідження були обрані різні за складом та призначенням сталі: цементовані 20 і 20Х2Н4А, покращувальна 40Х, ресорно - пружинні 65Г .

Для випробувань на втому високоміцної сталі виготовлялись спеціальні нестандартні зразки із скороченою за рахунок перехідних перетинів робочою частиною, що дозволило зменшити викривлення (не більше 0,05 мм) і збільшити жорсткість ( рис 3.1)

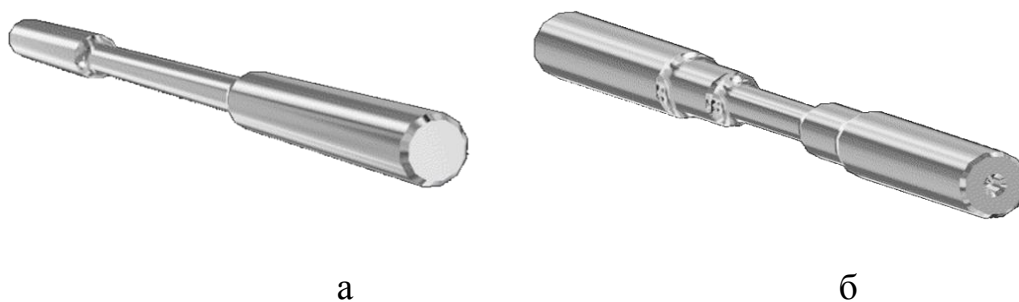


Рисунок 3.1 – Стандартний зразок (а ) та із скороченою робочою частиною (б)

Механічну обробку (шліфування та полірування) зразків для випробування на втомну міцність проводили згідно ГОСТ 25.50.502 –79. Випробування проводили на машині МУІ – 6000 при самому жорсткому циклі навантаження ( чистий згин з обертанням), яке змінювалося за симетричним синусоїдальним законом ( $R = - 1$ ) . Частота навантаження була 2480 об / хв. База випробувань становила  $10^7$  циклів. З метою отримання достовірних результатів для кожного стану матеріалу випробуванням підлягали не менш 6 зразків.

Дробострумінну обробку зубців шестерен здійснювали у камері пневматичної дії за режимом: тиск повітря 5 атм, дробинки діаметром 0,6 - 1,0 мм, відстань від сопла 200 мм, час обробки 5 хв.

Шорсткість і профіль поверхні визначали за допомогою профілометра-профілографа TR200 відповідно стандарту ISO 4287-1997. Шорсткість оцінювали за середнім арифметичним абсолютних значень відхилень  $Ra$ . Похибка вимірювання  $Ra$  не перевищувала 10%.

Випробування на розтяг стандартних циліндричних зразків проводили на електромеханічній машині UIT-STM-50 у відповідності до існуючих стандартів.

Твердість зразків після цементації і подальшого гартування з низьким відпуском вимірювали за методом Роквелла, а після азотування і іонно-плазмової обробки - за методом Віккерса.

Мікроструктуру вивчали у за допомогою металографічного мікроскопа UIT MicroMet-I-102 BD, який оснащений вбудованою камерою, що дозволяє отримувати знімки мікроструктур безпосередньо в цифровому вигляді.

Тонку дислокаційну структуру при великих збільшеннях і з високою глибиною різкості вивчали на електронному мікроскопі PEM-106 виробництва VAT SELMI.

Обробку низькоенергетичними іонами титану виконували на установці «Булат-3т. Матеріалом катода був титан марки ВТ-100. Струм дуги генератора плазми дорівнював 95 - 100А. Напруга на підложці змінювалося від 900 В до 1,1 кВ. Час бомбардування варіювалося до 2-х хвилин. Енергія бомбардуючих іонів не перевищувала 3 кэВ. У процесі обробки зразки оберталися за допомогою планетарного механізму зі швидкістю ~ 9 об/хв.

З метою отримання розподілу компонентів і їх ідентифікації в поверхневих шарах зразків, оброблених ІБ, використовували мікрорентгеноспектральний аналіз Для цього застосовували енергодисперсійну спектральну приставку EPC-1 до мікроскопа PEM-106.

Напружений стан поверхневого шару визначали на дифрактометрі ДРОН-3.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Вплив різних видів механічної обробки поверхні на границю витривалості і довговічність виробів зі сталей, що цементуються.

Згідно із заводським техпроцесом з метою забезпечення зносостійкості робочих поверхонь зубці шестерен зі сталі 20X2H4A піддають цементації (при 950°C), наступному подвійному гартуванню (перше від 880 °C, друге від 760°C) та низькому відпуску. Зразки, цементувалися та гартувалися у вертикальному положенні, щоб запобігти коробленню, яке негативно вплине на показники границі витривалості.

Внаслідок цементації зразків зі сталі 20X2H4A одержали шар глибиною ~ 1,5 мм з вмістом вуглецю 1,2%. Після повного циклу обробки цементований шар має структуру мартенситу відпуску із дрібними включеннями карбідів а структура серцевини – маловуглецевий мартенсит, бо зразки мали наскрізну прогартуваність. Твердість поверхневого шару дорівнювала 59-62 HRC.

Для високоміцного, крихкого стану поверхні зі структурою легованого мартенситу відпуску показники шорсткості особливо важливі, оскільки навіть незначні нерівності є концентраторами напружень і релаксація їх відбувається не за рахунок локальних пластичних деформацій, а за рахунок виникнення мікротріщин. Шкідливі залишкові напруження також знижують опір втоми.

Взявши до уваги ці положення поверхню зразків зі сталі 20X2H4A для випробувань на втомну міцність обробляли за трьома варіантами:

1. Точіння з припуском під шліфування на глибину 0,1 мм на бік, ХТО (цементація + гартування + низький відпуск), шліфування на глибину 0,1 мм.
2. Точіння, шліфування, ХТО, полірування до номінального розміру.
3. Точіння, шліфування, ХТО, полірування, дробострумінна обробка.

Варіант 1 зазвичай застосовується на практиці при виготовленні важконавантажених шестерен. Але, як відомо, в процесі шліфування в поверхневому шарі після цементації внаслідок фазових перетворень створюються залишкові напруження розтягнення і структурна неоднорідність, що негативно впливає на границю витривалості.

Варіант 2 виключає шкідливу дію залишкових напружень від шліфування, так як воно проводилося перед цементацією. Цементування піддаються зразки з меншою величиною концентраторів напружень ( в порівнянні із точінням). Крім того шліфування більш м'якої поверхні до цементування зменшує ймовірність структурних перетворень.

У варіанті 3 переслідувалася мета оцінити вплив поверхневої пластичної деформації (ППД) – обдувка дробом. Як відомо, дробообробка поверхні ще й ефективно «заліковує» структурну неоднорідність.

На рис. 4.1 наведені профілі поверхні зразків після зазначених варіантів обробки.

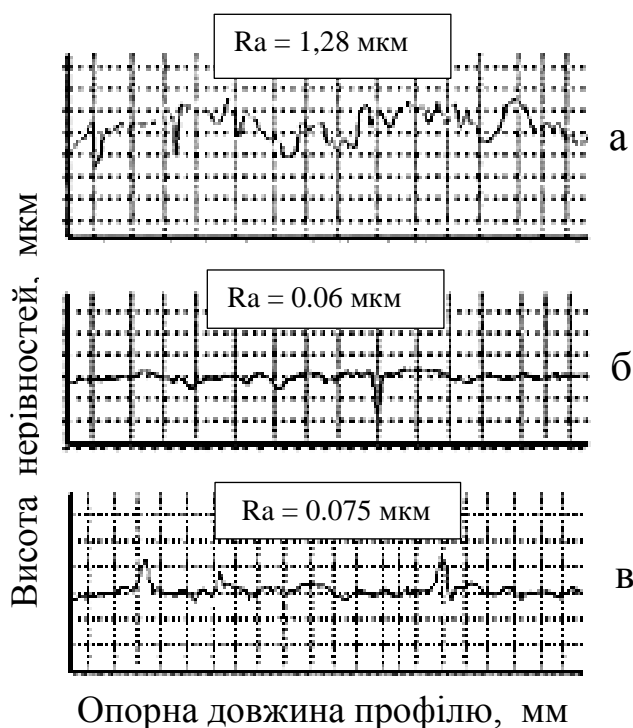
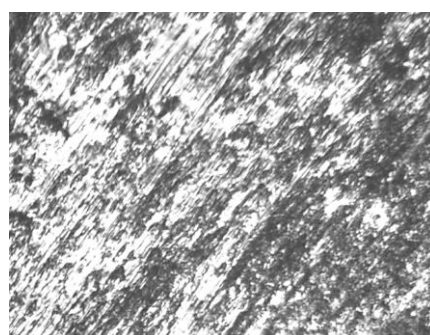


Рисунок 4.1 – Профілі і шорсткість поверхні зразків після різних варіантів її обробки: а - шліфування; б - полірування; в - обробка дробом

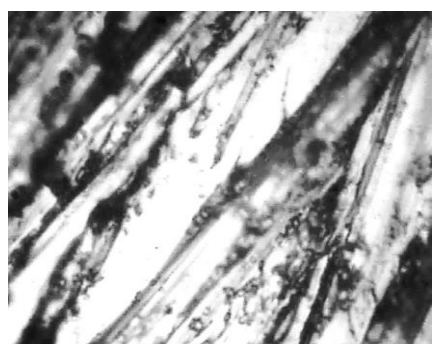
Як видно, після шліфування ( рис. 4.1, а) для профілю поверхні характерні глибокі виступи та впадини. Механічне полірування приводить до значного згладжування виступів та суттєвого зменшення шоркості поверхні (рис. 4.1, б). Це підтверджує зображення поверхні зразків після шліфування та полірування в оптичному та електронному мікроскопах (рис. 4.2). Дробострумінна обробка внаслідок наклепу дещо погіршує шорсткість поверхні ( рис. 4.1, в )



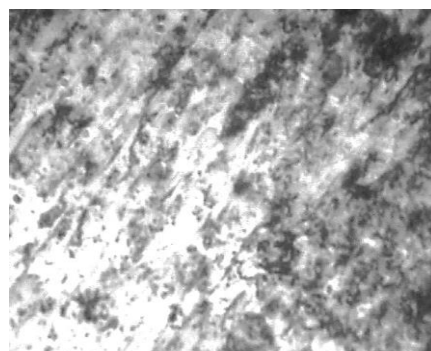
а



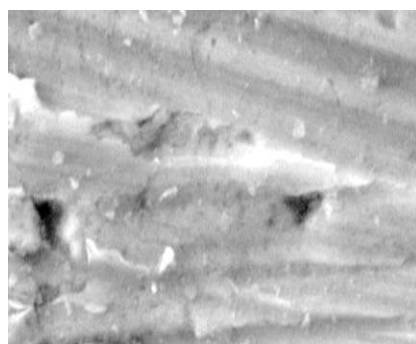
б



в



г



е

Рисунок 4.2 – Загальний вид поверхні після різних варіантів обробки:

а, в – шліфування,  $\times 200$ ; б, г – полірування,  $\times 1000$ ;

е – обробка дробом,  $\times 1000$

За результатами випробувань на втомну міцність зразків із різним станом поверхні побудовані криві втоми, які показані на рисунку 4.3.

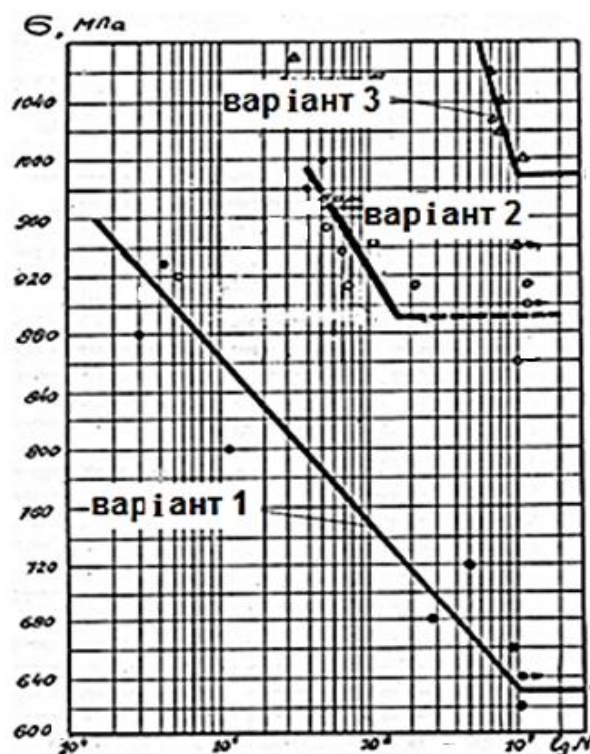


Рисунок 4.3 – Втомні криві для різних видів поверхневої обробки сталі 20X2H4A

В таблиці 4.1 наведені значення границі витривалості зразків зі сталі 20X2H4A, що підлягала цементації, після різних варіантів обробки поверхні.

Таблиця 4.1– Границі витривалості зразків із різною обробкою поверхні

Варіанти обробки поверхні	Границя витривалості $\sigma_{-1}$ , МПа	Підвищення границі витривалості, %
1	630	100
2	890	141
3	990	157

\* Варіант 1 прийнятий за 100%



Вид кривих на рисунку 4.3 та дані таблиці 4.1 свідчать, що шліфування до цементації і полірування (варіант обробки 2) привели до значного підвищення границі витривалості (на 41%), яке обумовлене суттєвим зменшенням шорсткості поверхні (рис. 4.2,б). Помітно збільшилася і довговічність зразків при перевантаженнях. На це вказує той факт, що ліва похила гілка кривої варіанту 2 розташована значно правіше, ніж ділянка похилої гілки кривої варіанту 1 при одному і тому ж рівні напружень.

Заключна дробострумінна обробка поверхні підвищила границю витривалості ще на 16% (всього до 57%) і значно збільшила довговічність при перевантаженнях (варіант 3 на рис. 4.3 – похила частина кривої розташована значно правіше стосовно 2-х інших варіантів). Цей факт можна пояснити виникненням внутрішніх залишкових стискальних напружень порядку 550 МПа, а також практично повним знищенням структурної неоднорідності поверхні в процесі пластичної деформації при наклепі дробом.

Крім того, як відомо, при наклепі відбуваються позитивні зміни внутрішньої зеренної структури (дроблення блоків, збільшення густини дислокацій), які приводять до зміцнення поверхні. Поглиблення від дробу (діаметр 0,8 мм), хоча і збільшують її шорсткість, але через свою округлу форму і дуже мале проникнення (~0,3 мм) в тверду мартенситну структуру поверхні не являються суттєвими концентраторами напружень - осередками розвитку втомної тріщини.

Проведені випробування показали ефективність не тільки завершальної ППД, а й шліфування зразків до цементації. Крім того, використання варіанту 2, там, де це можливо, скорочує технологічний процес обробки поверхні.

4.2 Вплив іонного бомбардування на зміну стану поверхні виробів та підвищення їх циклічної довговічності

Збільшення характеристик статичної міцності не приводить до помітного підвищення втомної міцності і, як правило, визиває зменшення

коефіцієнту витривалості – відношення границі витривалості до границі міцності. Тим більше шляхом покращення показників міцності не можливо підвищити експлуатаційну стійкість реальних деталей, коли у повній мірі проявляються фактори масштабу та форми. Тому вирішення питання збільшення пластичності при збереженні\_\_міцності, тобто підвищення конструктивної міцності виробів, буде сприяти зростанню границі витривалості, оскільки згідно з [20] вона визначається опором крихкому руйнуванню. Як відомо, з підвищенням пластичності та ударної в'язкості критичний розмір тріщини при втомному руйнуванні суттєво збільшується..

Найбільш ефективним фактором, що підвищує міцність без втрати пластичності, є формування субмікро - та нанокристалічні зеренної структури. Однак одержати таке зерно в об'ємі реальних деталей машин із конструкційних сталей сьогодні неможливо. Значно легше сформувати його лише на поверхні виробу, стан якої, згідно із сучасними поглядами, визначає деформаційну поведінку твердого тіла та його властивості.

В роботі використане поверхнєве іонне бомбардування (ІБ) зразків з модельної відпаленої сталі 20. Зразки піддавали випробуванням на розтягання, які значно простіші, ніж випробування на втомну міцність. В той же час існують дослідження, які показали, що руйнування металів під статичним та циклічними навантаженнями супроводжується однаковими структурними змінами [21].

Криві розтягання циліндричних зразків до та після ІБ наведені на рис. 4.4. З рисунка видно, що ІБ привело до зміцнення зразків – крива 2 лежить вище кривої 1, однак пластичність залишилася високою. Звертає на себе увагу, що після ІБ крива розтягування в пружній області йде крутіше, ніж для відпаленого стану. Це свідчить про підвищення модуля пружності  $E$ , що позначиться на показниках втомної міцності.

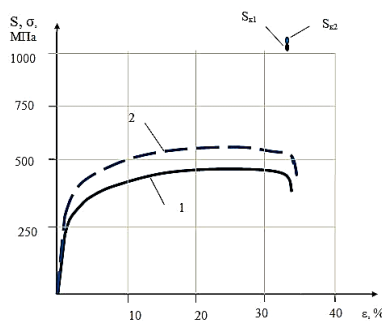


Рисунок 4.4 – Криві розтягання циліндричних зразків сталі 20:

1 – відпал; 2– відпал + ІБ

З рисунка видно, що ІБ привело до зміцнення зразків – крива 2 лежить вище кривої 1, однак пластичність залишилася високою. Звертає на себе увагу, що після ІБ крива розтягування в пружній області йде крутіше, ніж для відпаленого стану. Це свідчить про підвищення модуля пружності  $E$ , що позначиться на показниках втомної міцності.

У таблиці 4.2 наведені кількісні значення механічних характеристик зразків після різної обробки, в тому числі після зняття шліфуванням поверхневого шару, створеного ІБ.

Таблиця. 4.2 – Результати випробувань на розтяг зразків сталі 20 після різної обробки

Стан зразка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$S_k$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Відпал	440	230	1050	30	60
Відпад + ІБ	510 (+ 14%)	290 (+ 20%)	1150 (+ 9 %)	31	62
Відпал + ІБ + шліф.	440	235	1000	30	61

З таблиці випливає, що ІБ призводить до значного приросту міцності. Більшою мірою підвищується границя текучості. При цьому як відносне подовження, так і відносне звуження залишаються на тому ж високому рівні, який був до ІБ. І дуже важливо, що при цьому зростає опір крихкому руйнуванню –  $S_k$ .

Після видалення шліфуванням поверхневого шару, модифікованого ІБ, зміцнення повністю знімається і це свідчить про те, що властивості серцевини під впливом ІБ не змінюються. Тобто мова йде, не про зміни властивостей матеріалу під впливом стану поверхні, а про зміни поведінки зразка при деформуванні розтяганням наслідком чого і є його зміцнення.

Для з'ясування причин зміни під впливом ІБ поведінки зразків при деформації та їх властивостей були досліджені зміни стану поверхневого шару – його структури та шорсткості після ІБ.

Стан поверхні зразків зі сталі 20 до та після ІБ в оптичному та скануючому електронному мікроскопі ілюструє рис. 4.5. Після ІБ в феритних зернах з'являється характерний рельєф травлення (рис. 4.5, б). До бомбардування в зернах фериту із середнім розміром  $\sim 50$  мкм субграніці не виявляються (рис. 4.5, в). Після ж ІБ при великому збільшенні (рис. 4.5, г) в середині зерен фіксується розвинена субструктура із розмірами елементів у межах 500 -700нм.

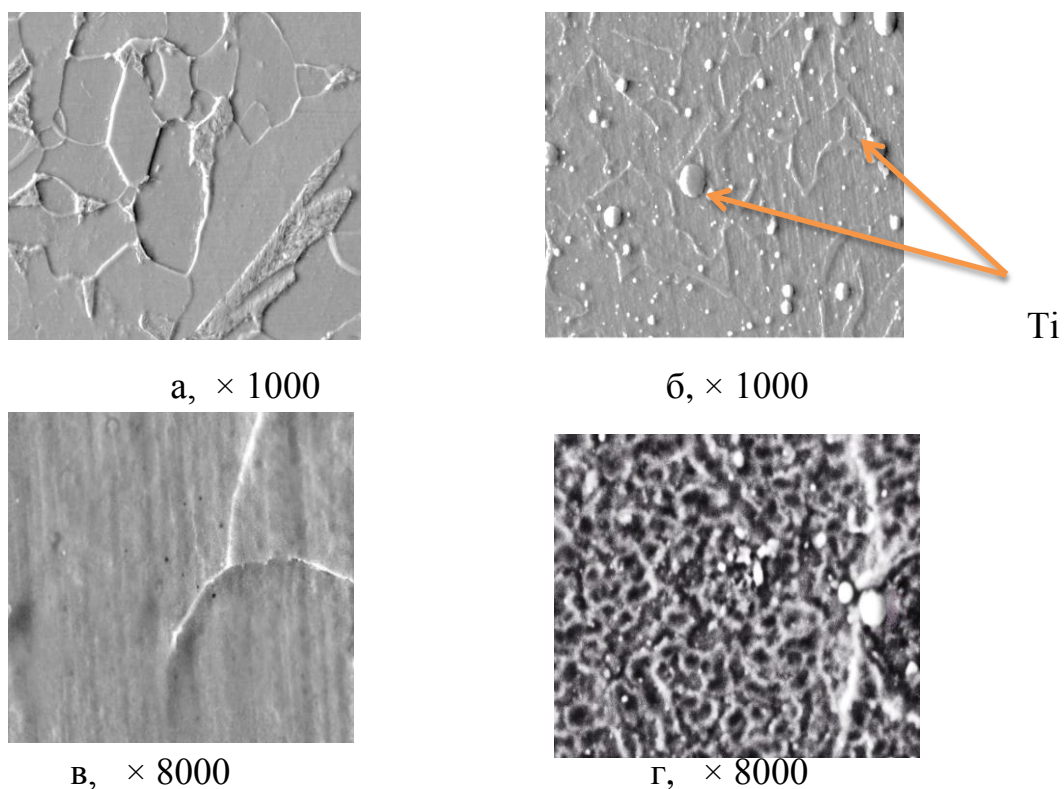


Рисунок 4.5– Мікроструктура (а, б) та субструктура (в, г) поверхні зразка сталі:

а, в – до ІБ; б,г – після ІБ

Особливістю субструктури є широкі межзеренні субграниці, які займають значну частину загального поля мікрошліфа. На рис 4.6 наведено ділянку поверхні, на якій оцінена ширина субграниць

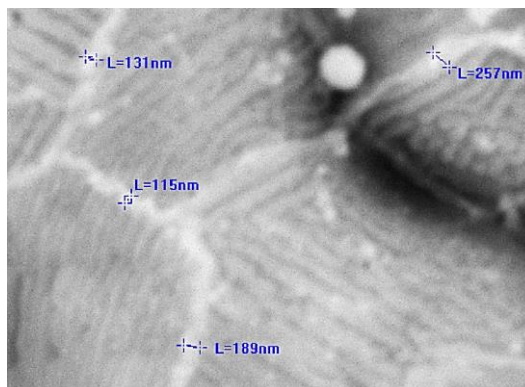


Рисунок 4.6 – Границі розділу в субмікрокристалічній структурі після ІБ;  $\times 15000$

Таким чином, після ІБ на поверхні формується субмікрокристалічна структура з шириною межзеренних границь від 115 до 260 нм. Саме така специфічна структура обумовлює особливу поведінку зразків в процесі деформації, що виключає охрихчення при високому зміцненні.

Методом мікрорентгеномспектрального аналізу визначали хімічний склад поверхні з метою виявлення титану, який міг потрапити під час бомбардування і вплинути на властивості.

Результати показали, що кількість титану на поверхні складає всього 0,35%, ( рис. 4.7 ).

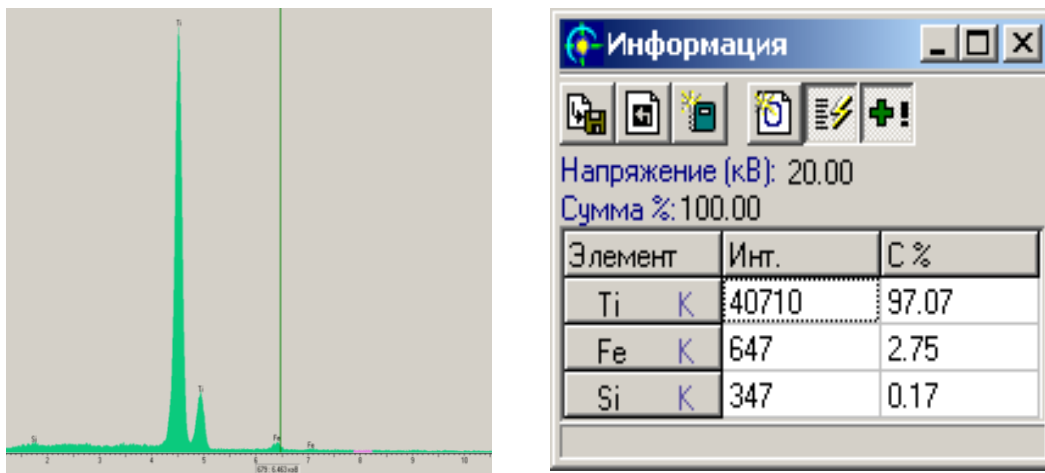
 A screenshot of a software window titled "Информация" (Information). It displays the following data:
 

- Напряжение (кВ): 20.00
- Сумма %: 100.00
- Table with columns: Элемент (Element), Инт. (Int.), С % (C %).

Элемент	Инт.	С %
Fe	34605	98.74
Mn	252	0.72
Ti	815	0.35
Si	342	0.18

Рисунок 4.7 –Хімічний склад поверхні зразків сталі 20 після ІБ

Міститься титан в окремих краплях, що підтверджується дифрактограмою та елементним вмістом однієї з них ( рис. 4.8).



а

б

Рисунок 4.8– Діфрактограма (а) та елементний склад (б) краплі титана

Має місце корисне явище, обумовлене наявністю крапель титану. Вони, потрапляючи в місця поверхневих нерівностей (западин, пор, мікротріщин), «заліковуюють» поверхневі дефекти (рис.4.9 ), що є концентраторами напружень. Тому слід зазначити, що відсутність сепарування крапель при ІБ є позитивним фактором.

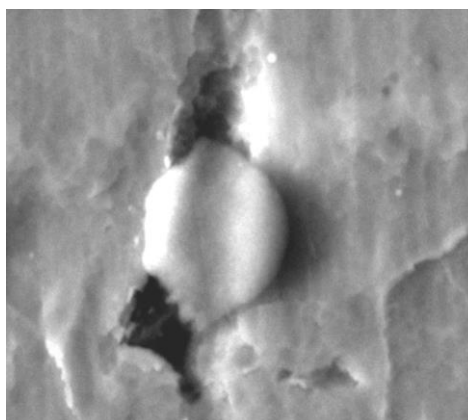


Рисунок 4.9 – Крапля Ті, що потрапила в западину на поверхні зразка під час ІБ; × 8000

Зважаючи на такі суттєві зміни стану поверхні представляло значний практичний інтерес дослідити можливість ІБ поверхні змінювати властивості виробів при циклічних навантаженнях, тобто впливати на втомну міцність, оскільки відомо, що у сталей малої та середньої міцності значний запас пластичності сприяє опору зародження втомної тріщини [21].

Експерименти були виконані на зразках зі сталей 40Х і 65Г, які обрані з практичних міркувань.

Зі сталі 40Х виготовляють вісі, шатуни, шестерні, вали, тобто деталі, які експлуатуються при багаторазово повторюваних циклічних навантаженнях.

Сталь 60Г ресорно-пружинна, а одна з основних вимог до виробів із цих сталей - висока втомна міцність.

Стан поверхні зразків сталі 40Х у вихідному стані після покращення, та після покращення з наступним ІБ ілюструє рис. 4.10.

До бомбардування розмір зерна був 60 мкм (рис. 4.10, а), а після ІБ (рис. 4.10, б) зерно значно подрібнюється ( $< 1$  мкм), появляється розвинена субструктура із широкими границями.

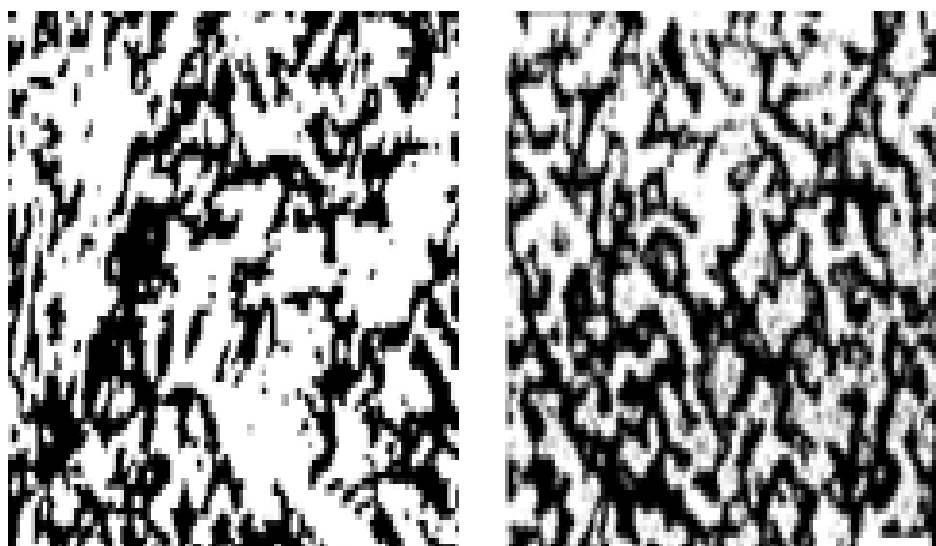


Рисунок 4.10 – Мікроструктура зразків зі сталі 40Х: а – після покращення, б – після покращення та ІБ; 10000

Формується коміркова дислокаційна субструктура (рис.4.11), яка відрізняється досконалою будовою дислокаційних границь, малою густиною дислокацій у тілі комірок та значною розорієнтацією.

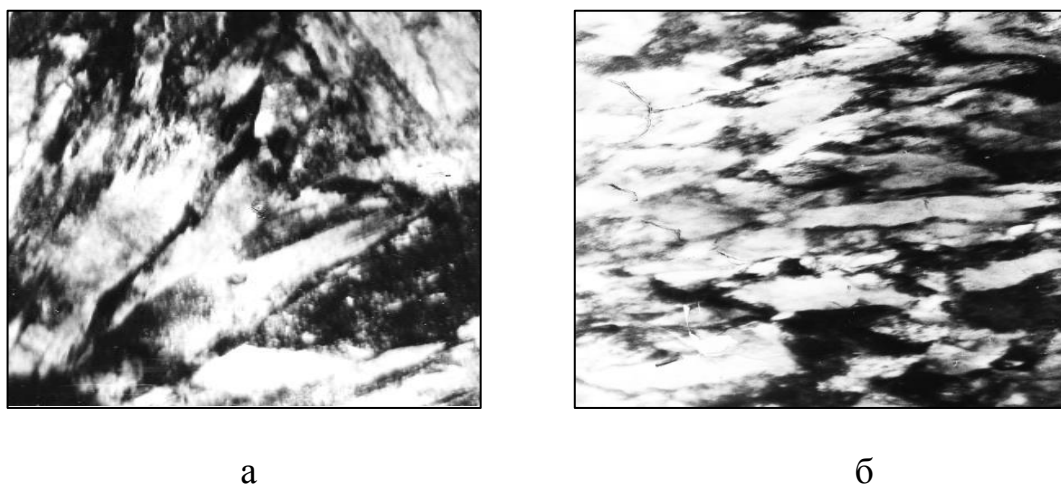


Рисунок 4.11 – Субструктура сталі до (а) та після (б) ІБ

На рисунку 4.12 наведені профілограми поверхні до та після ІБ.

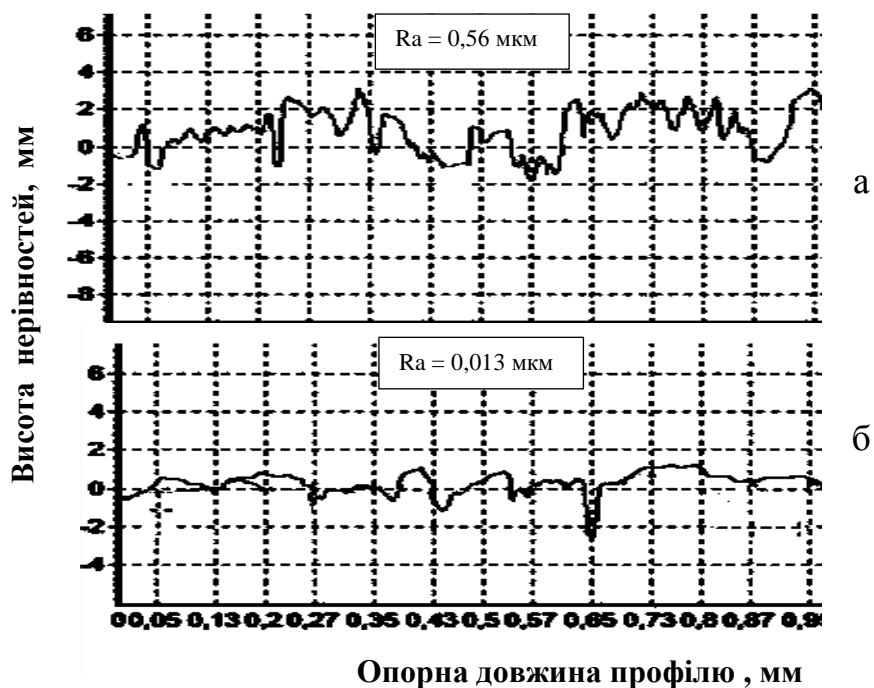


Рисунок 4.12 – Шорсткість поверхні зразка зі сталі 40Х : а – до ІБ, б – після ІБ



Як вище зазначалося при ІБ окремі краплі титану осідають на поверхні і «заліковуюють» дефекти. Однак не зважаючи на наявність крапельної фази титану та утворення розвиненої субструктури, шорсткість поверхні після ІБ суттєво зменшується (рис. 4.12, б), що вказує на малу глибину рельєфу поверхні. Аналогічні структурні зміни відбулися і в сталі 65Г після ІБ.

Зменшення шорсткості, «заліковування» поверхневих дефектів, суттєве подрібнення зерна і наявність розвиненої субструктури в поверхневому шарі не могли не позначитися на довговічності виробів.

Результати випробувань на циклічну довговічність наведені в таблиці 4.3. Виходячи з заводського досвіду, для визначення кількості циклів до руйнування зразків діаметром 7,5 мм було вибрано напруження 380 МПа.

Таблиця 4.3 – Результати дослідження втомної міцності зразків сталі 40Х після ІБ

№ випробувань	Напруження, МПа	Кількість циклів	Результат випробувань
1	380	10282080	не зруйнувався
2	390	10006800	не зруйнувався
3	400	5431200	не зруйнувався
4	410	4014560	не зруйнувався
5	420	5014560	не зруйнувався
6	470	1205280	не зруйнувався
7	490	1190400	не зруйнувався
8	510	1041600	не зруйнувався
9	530	1086240	не зруйнувався
<b>10</b>	<b>548 ( макс )</b>	<b>11160000</b>	<b>не зруйнувався</b>

Аналогічні випробування були зроблені для зразків із сталі 65Г.

Отримані фактичні дані для сталей 40Х та 65Г зведені в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Вплив ІБ на циклічну довговічність зразків зі сталей 40Х та 65 Г

Матеріал і обробка	Величина напруження, МПа	Кількість циклів до руйнування	Результат випробувань
Сталь 40Х, вихід	380	297600	Зруйнувався
Сталь 40Х, вихід + ІБ	380	1000000	Не зруйнувався
Сталь 60Г, вихід	380	937440	Зруйнувався
Сталь 60Г, вихід + ІБ	<b>550</b>	<b>1116000</b>	<b>Не Зруйнувався</b>

Як видно з таблиці, вже при початковому напруженні 380 МПа зразок зі сталі 40Х без ІБ зруйнувався після 297600 циклів, а після ІБ він витримав 1000000 циклів без руйнування.

Ще більше збільшення циклічної довговічності фіксується у зразків зі сталі 65Г. Без ІБ вони зруйнувалися через 937440 циклів при напруженні 380 МПа. Після ІБ навіть при підвищенні напруження на 44% (до 550 МПа – максимального для діаметра випробовуваних зразків) зразки витримали більше 11160000 циклів навантаження і не зруйнувалися.

Таким чином, переконливо показано, що обробка поверхні одним із сучасних методів - бомбардуванням низькоенергетичними іонами, істотно підвищує опір втомі виробів при циклічних навантаженнях.

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження показали:

1. Шліфування поверхні до цементації (а не після) на 40 % підвищує границю витривалості високоміцної сталі 20X2H4A з крихкою мартенситною структурою після гартування.

2. Наступні тонке полірування і дробострумінний наклеп цеменованого шару ще більше збільшують опір втомному руйнуванню за рахунок істотного зменшення шорсткості поверхні і створення сприятливих стискальних напружень.

3. Значний ефект збільшення циклічної довговічності виробів зафіксований після бомбардування тонкого поверхневого шару низькоенергетичними іонами і досягається значним подрібненням зерна, формуванням розвиненої субструктури, збільшенням густини дислокацій, «заліковуванням» поверхневих дефектів, які є місцевими концентраторами напружень і потенційними осередками формування мікротріщин. Цей факт підтверджений успішною апробацією на ДП «Завод ім. Малишева» в м.Харкові.

4. Вирішуючи питання технологічного забезпечення та підвищення якості деталей машин, що експлуатуються в умовах циклічного навантаження, слід вибирати такі процеси обробки, які забезпечать характеристики поверхневого шару, що гарантують підвищення довговічності роботи виробів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Panin V. E. Multilevel wave model of a deformed solid in physical mesomechanics / Panin V. E., Grinyaev Yu. V., Panin A. V., Panin S. V. // Proceedings of the Sixth International Conference for Mesomechanics «Multiscaling in Applied Science and Emerging Technology. Fundamentals and Applications in Mesomechanics», 2004. – P. 335 – 342.
2. Кудрявцев И.В. Усталостная прочность сварных конструкций / И.В. Кудрявцев, Н.Е.Наумченко. – М.: Машиностроение, 1976.– 270 с.
3. Вакуленко К.В. Влияние состояния поверхностного слоя на характеристики сопротивления усталости стали 40Х / К.В. Вакуленко, И.Б. Козак, В.М. Мацевитый // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №3/5(81). – С.53-61.
4. [http://sopromat.vstu.ru/metod/lek/lek\\_22.pdf](http://sopromat.vstu.ru/metod/lek/lek_22.pdf)
5. Рубан Р.Р. Влияние шероховатости поверхности после механической обработки цементованных деталей на характеристики усталости / Р.Р. Рубан // ГТУ.–2001.– С.339-342.
6. Вислоух С.П. Вплив параметрів шпруктості оброблених поаерхонь на хаактеристики опору втоми деталей / С.П. Вислоух, К. С. Барандич, О. І. Паткевич // Вісник ЧДТУ, 2015,–№ 1,– С. 115-120.
7. Гурьев А.В. О влиянии состояния поверхностного слоя образцов на величину экспериментально определяемого предела упругости / А.В. Гурьев, В.И. Водопьянов // Заводская лаборатория, 1971. – № 9. – С. 124 – 126.
8. Гордиенко Л.К. Рассеяние энергии при колебаниях механических систем / Л.К. Гордиенко. В.Н. Степанов Степанов В.Н. // Киев: Наук. Думка, 1968, с. 347-349.
9. Dyachenko S.S.. Acceleration of Saturation Process and Improving Nitrided Layer Properties / S.S. Dyachenko, O.V Sverdlin, V.A. Zolotko , S.V. Kaftanov //Industrial Heating,1998. – V. 65. – №9. –P. 99–105.

10. Дяченко С.С. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості: навчальний посібник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, І.В. Пономаренко, С.І. Бондаренко, Х.: ХНАДУ, 2016.–348с.

11. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов / В.С. Иванова, М.: Гос науч.-техн. изд. по чёрной и цветной металлургии, 1963.–272с.

12. Волосевич, П. Ю. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости / П. Ю. Волосевич, Г. И. Прокопенко, В. В. Кныш, О. В. Войтенко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – Т. 30, № 10. – С. 1429–1443.

13. Панин В. Е. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов / В. Е. Панин, В. П. Сергеев, А. В. Панин, Ю. И. Почиваев. // Физика металлов и металловедение. – 2007. – Т. 104, № 6. – С. 650–660.

14. Дьяченко С. С. Возможности получения наноструктуры в массивных изделиях и влияние наноструктурирования на их свойства / С. С. Дьяченко, И. В. Пономаренко, В. А. Золотко // Физическая инженерия поверхности. – 2009. – Т. 21, № 4. – С. 385–396

15. Волосевич, П. Ю. Принцип Д’Аламбера и современные представления о пластической деформации / П. Ю. Волосевич // Металлофизика и новейшие технологии. – 2007. – Т. 29, № 10. – С. 1393–1406.

16. Дяченко, С. С. Оцінка внеску різних чинників у підвищення конструкційної міцності виробів після іонного бомбардування [Текст] \: сб. науч. тр. / С. С. Дяченко, І. В. Пономаренко, В. В. Білозеров, Г. І. Махатілова, В. І. Гриценко // Вестник ХНАДУ. – 2008. – Вып. 42. – С. 71–73. Металловедение

17. Tatarkina I. Use of the ion-plasma treatment for improving the structural strength of items / S. D’yachenko, I. Tatarkina, I. Doshchekina, I. Ponomarenko // Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 4, # 1, Sumy State University, 2012 1 – 4.

18. Дощечкіна І.В. Вплив поверхневого зміцнення на механічні властивості виробів / І.В. Дощечкіна, С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко, С.І Аксьонова, В.К. Лобанов // Автомобильный транспорт .Сб. научн. трудов., 2005. – Вып. 16. – С. 79–82.

13. Дяченко С.С. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості: навчальний посібник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, І.В. Пономаренко, С.І. Бондаренко, Х.: ХНАДУ, 2016.–348с.

14. [www.metalimprovement.co.uk/russian.htm](http://www.metalimprovement.co.uk/russian.htm)

15. Пашкова Г.И. Поверхностное пластическое деформирование – эффективный способ повышения долговечности деталей машин / Г.И. Пашкова // Вісник НТУ «ХП», 2013. № 42 (1015).– С. 135 -138

16. Вакуленко К.В.. Влияние состояния поверхностного слоя на характеристики сопротивления усталости стали 40Х / К.В. Вакуленко, И.Б. Козак, В.М. Мацевитый // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №3/5(81). – С.53-61.

17. Tatarkina I. Use of the ion-plasma treatment for improving the structural strength of items / S. D'yachenko, I. Tatarkina, I. Doshchekina, I. Ponomarenko // Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 4, # 1, Sumy State University, 2012 1 – 4.

18. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов / В.С. Иванова, М.: Гос науч.-техн. изд. по чёрной и цветной металлургии, 1963.–272с.

19. Панин В. Е. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов / В. Е. Панин, В. П. Сергеев, А. В. Панин, Ю. И. Почиваев. // Физика металлов и металловедение. – 2007. – Т. 104, № 6. – С. 650–660.

20. Дяченко С. С. Фактори, що зумовлюють підвищення конструкційної міцності сталевих виробів після іонно-плазмової обробки [Текст]: наук. пр. конф. / С. С. Дяченко, І. В. Пономаренко. // Міжнародна наукова конференція «Іван Федченко- Чопівський: вчений і патріот». Секція № 2: Наукова діяльність Івана Федченка-Чопівського та сучасні проблеми матеріалознавства.– Львів :

Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – С. 22-30.

21. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин / М.А. Балтер. – М.: Машиностроение. –1978. – 184 с.





