

О.С. Завойко

## Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механо-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос

*Чернівецьке відділення, Національний Технічний Університет "Харківський Політехнічний Інститут",  
вул. Головна, 204, м. Чернівці, Україна*

Досліджено новий спосіб фізико-технічної обробки та зміцнення поверхонь за допомогою комбінування трьох технологічних процесів – лазерної, фізико-термічної та поверхнево-пластичної механічної обробок. Вивчення і впровадження фізичних процесів лазерної взаємодії із високо вуглецевими сталевими деталями відкриває нові можливості їх застосування у машинобудуванні та створенні нових технологічних комбінованих процесів виробництва деталей машин. Розглядається вплив лазерної обробки та послідовних термообробок на структуру, мікротвердість, шорсткість поверхні, остаточних напружень, зносостійкість під впливом абразиву і терті ковзанням, а також опір втомного руйнування високоміцного чавуна ВЧ60-2 з метою розробки технології лазерного зміцнення колінчатих валів тепловозів та подібних валів вантажних автомобілів.

**Ключові слова:** комбінована фізико-технічна обробка, лазерна обробка, поверхнево-пластична механічна обробка, фізико-хімічна термічна обробка.

*Стаття постуила до редакції 23.05.2014; прийнята до друку 15.09.2014.*

### Вступ

Лазерні методи обробки матеріалів і покриттів відносяться до нових перспективних технологій, широке впровадження у виробництво яких датується ще із початком 80-х років ХХ ст. Однак, не дивлячись на те, що до нашого часу проведено достатньо велика кількість досліджень, спосіб лазерного зміцнення недостатньо вивчений для конкретних матеріалів і умов виготовлення деталей машин, особливо в області тепловозних, судових і великовантажних автомобілів.

Найефективнішим способом зміцнення виробів із залізвуглецевих сплавів [1, 2] являється лазерна обробка, а саме, колінчатих валів тепловозних двигунів із високоміцного чавуна із шаровидним графітом. Властивості і структура зони лазерного випромінювання змінюються у широких межах в залежності від висхідної структури та умов випромінювання. При розробці технології лазерного зміцнення чавунів особливу увагу набуває оптимізація режимів і умов опромінення, що направлені на формування необхідного структурного стану у поверхневому шарі заданої глибини. Структура закаленої зони залежить, як від параметрів лазерної обробки (потужності випромінювання, розміру лазерної плями на поверхні, швидкості переміщення променя), так і від характеристик оброблюємої поверхні (шорсткості, поглинаючої спроможності) [1, 11, 12, 39, 40].

Якщо прийняти постійними властивості

поверхні, то оптимізацію режимів вироблення можна проводити за двома показниками: густині потужності ( $W_p$ , Вт/мм<sup>2</sup>) і густині енергії ( $W_e$ , Дж/мм<sup>2</sup>), які в загальному випадку дозволяють оцінювати відповідно ймовірність оплавлення поверхні і глибину зони лазерної взаємодії.

При розробці лазерної технології зміцнення необхідно враховувати вплив опромінення на шорсткість поверхні, що визначає припуск на фінішну обробку, що особливе для чавунів із шаровидним графтом, частинки якого можуть коагулювати і впливати на поверхню розтопленої ванни.

Найважливішою експлуатаційною властивістю колінчатих валів є зносостійкість поверхні шийок валів, яка забезпечується лазерною обробкою і надає чавунам суттєвого зростання опору довільним видам зношування [5, 6], а також зниженню коефіцієнту тертя [2]. Однак рівень підвищення зносостійкості у великій ступені залежить від режимів, площі і схеми опромінення [3, 7].

Для колінчатих валів особливе значення має вплив лазерного зміцнення на втомні властивості. Лазерне загартування у залежності від режимів обробки, наявності оплавлення, розміщення зон зміцнення може призводити як до підвищення, так і до пониження границі втоми залізвуглецевих сплавів [8, 9, 10, 11, 32].

На границю втоми поряд із міцністю великий вплив мають і інші фактори: мікрогеометрія поверхні, величина і знак остаточних напружень,

наявність дефектів у поверхневому шарі. Останні особливо важливі для чавунів, тому що наявність графіту може служити дефектом, що ініціює зародження втомлюваної тріщини [12, 13, 41],

Згідно з цими даними лазерне загартування чавуна із шаровидним графітом від'ємно впливає на втомлювану міцність, незалежно від глибини зміцненої зони.

Для підвищення границі втоми ефективно був застосований метод поверхнево пластичного деформування [14]. Зниження загального рівня остаточних напружень у зміцненому поверхневому шарі досягається проведенням відпуску, який може привести до замітного зниження твердості і зносостійкості загартованого лазером чавуна.

Основною метою досліджень в даній роботі є проведення комплексних досліджень по розробці технології лазерного зміцнення колінвалів із високоміцного чавуна ВЧ60-2 для тепловозних дизель-генераторів та вантажних машин: встановлення енергетично-часових параметрів лазерної обробки, що визначають ймовірність оплавлення поверхні і глибину зміцненої зони; визначення параметрів шорсткості поверхні після довільних режимів опромінення; аналіз структури, фазового складу, мікротвердості і зносостійкості (при терті і абразивному зносі) зони лазерного впливу, а також змін вказаних характеристик при відпуску у інтервалі температур 150 – 650 °С; вивченню впливу лазерного зміцнення чавуна на трибологічні характеристики кольорових металів і сплавів, що використовуються у якості матеріалу, що спряжений із чавунним валом-вкладишем; аналіз впливу лазерної і послідовних обробок (відпуску, пластичної деформації) на рівень остаточних напружень у поверхневому шарі на втомлювані властивості чавуна ВЧ60-2, [36, 38, 37, 4].

В даній статті була використана методика підходу та лазерне обладнання із останніх робіт, опублікованих, виконаних автором [32, 33] та проведених досліджень [34, 38, 5, 6, 7, 39].

## I. Методика експерименту

Досліджувався високоміцний чавун ВЧ60-2 такого складу (мас.%): 3,60 С; 2,15 Si; 1,40 Mn; 0,07 S; 0,06 P; решту - Fe. Обробку неперервним випромінюванням CO<sub>2</sub>-лазера в режимах із оплавленням і без оплавлення поверхні проводили на установці ЛТ1-2М у повітрі при потужності випромінювання P = 0,5 - 2,5 кВт, швидкістю переміщення зразків під променем V = 250 - 2000 мм/хв. Промінь на поверхні зразків мав форму прямокутника із різними розмірами (довжиною 5,0 - 10,5 і шириною 0,7 - 5,5 мм) [3].

Вивчався вплив режимів випромінювання на розміри і структуру зони лазерної взаємодії на зразки розміром 30x30x10 мм. З метою збільшення поглинання лазерного випромінювання поверхню зразків обробляли 10 – 20 %-ним розчином персульфату амонію при температурі 65 °С.

Структуру вивчали за допомогою методів оптичної мікроскопії на поперечних шліфах. Заміри мікротвердості проводилися при навантаженні 0,98 Н на мікротвердомірі, швидкість навантаження піраміди Віккерса 40 мкм/с, витримка під навантаженням 15 с, заміри двох діагоналей відтиску на моніторі комп'ютера. Шорсткість поверхні оприділяли на профілографі-профілометрі «Калібр-201» по параметру Rz.

Перерозподіл вуглецю при лазерній взаємодії у приграничних із графітовими частинками околицями вивчали на мікроаналізаторі MS - 46 «САМЕКА». Фазовий аналіз проводили на дифрактометрах ДРОН-2 у СоКа-випромінюванні і ДРОН-0,5 у Ка-випромінюванні.

Остаточні напруження оцінювали методом багаторазових похилих знімачів [12].

Для випробувань на абразивну зносостійкість торцевої поверхні (8x8 мм) чавунних зразків розміром 8x8x20 мм зміцнювали на глибину 0,8 мм за один прохід лазерного променя (з метою збільшення швидкості тепловідводу зразки в процесі опромінення були частково занурені у воду). Дослідження проводили при ковзанні торцевих поверхонь зразків по закріпленому абразиву – шліфувальній шкурці марки 14A16 (електрокорунд зернистістю 160 мкм) і 81 Kp20(кремій зернистістю 200 мкм) із середньою швидкістю 0,175 м/с при навантаженні 49Н, довжині робочого руху 100мм, шляху тертя 12 м, поперечному зміщенні зразка за один подвійний рух 1,2 мм. Відносну абразивну зносостійкість визначали, як співвідношення втрати маси армо-заліза до втрат маси чавуна по результатам трьох паралельних випробувань [11, 15, 16].

Проводилися випробування на тертя ковзання із змащуванням (дизельне масло М14В2(Д14)) з метою імітації роботи тертя «колінвал- вкладиш» по схемі вал - вкладиш на машині тертя ИСП-2 з продовжуваністю одного випробування 50 год. Валом служили втулки діаметром 60 мм і товщиною стінки 10 мм із чавуна ВЧ60-2 у висхідному стані (твердість 2,8-3,6 Гпа) і після лазерного зміцнення 60 – 75 % поверхні на глибину 0,7 мм у режимі без оплавлення (дорожки під кутом 45° до направлення ковзання). У якості матеріалу вкладиша використані бронза Бр.С30 із приробленим покриттям Pb-Sn-Cu і алюмінієвого сплаву АО20-1.

Для вивчення впливу лазерного випромінювання чавуна на трибологічні властивості контртіла (вкладиша) у парі тертя «чавунний вал-вкладиш» проводилися випробування [17, 18] по схемі палець-диск, при терті в умовах граничного змащування торцевих поверхонь зразків розміром 8x8x20 мм із бабіту Б83, бронзи Бр.С30 і алюмінієвого сплаву АО20-1 по диску із чавуна ВЧ60-2 при навантаженні 285 Н і швидкості ковзання 7,8 м/с. Використовувались диски у висхідному незміцненому стані, а також після лазерного зміцнення робочої поверхні і доповнюваного шліфування з доводкою із видаленням оплавленого шару. Інтенсивність зношування розраховувалася по

формулі  $\Delta h = Q/\rho LS$ ; де,  $Q$  –втрата маси зразка, г ;  $\rho$  – густина матеріалу, г/см<sup>2</sup> (приймали для бабіту,  $\rho = 9,0$ ; бронзи - 9,3; алюмінієвого сплаву -2,7 ) ;  $L$  – шлях тертя, см ;  $S$  –геометрична площа фрикційного контакту, см<sup>2</sup>.

У якості змащування використовувалося дизельне масло М14В2 (Д14), яке подавалося в зону тертя капельним способом із швидкістю 45 капель/хвх [19, 20, 23].

Втомлювану міцність (границю втоми чавуна при циклічному навантаженні) визначали для висхідного стану, після лазерної обробки, послідууючого відпуску при 300 - 550 °С (2 год), а також доповнюваної обробки поверхні (обкатування шариком) [14].

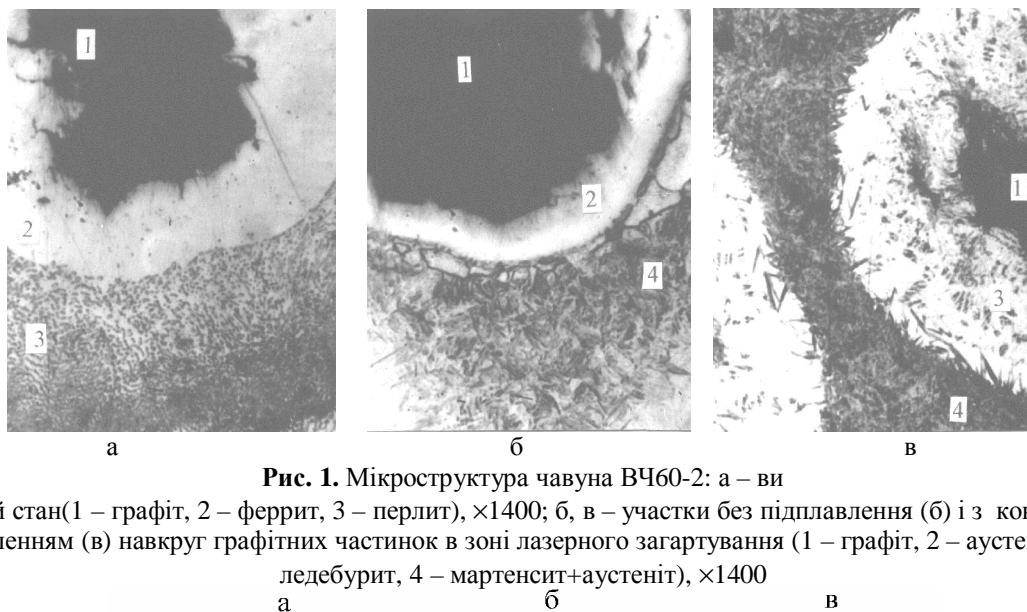
Лазерну обробку зразків з діаметром шийки Ø10 мм, напівнатурних зразків Ø40 мм і шийок відсіків колін валу двигуна 10Д100 проводили по гвинтовій лінії (для зміцненої поверхні 50 – 75 %) у режимі із частковим оплавленням поверхні. Відсік являє собою частину колін валу, що складається із 7 шийок: 3-х шатунних (Ø172 мм) і 4-х корінних (203мм). Глибина загартування складає 0,3 і 0,45 мм для зразків відповідно Ø10 і Ø40мм і 0,8 -1,2 мм –

для відсіків колін валу. Формування лазерної доріжки, яке супроводжується виникненням остаточних напружень, починаючи на віддалі 5 мм від галтельної ділянки (найбільш напруженої), оскільки обрив загартованого шару поблизу зони максимальних вигинних напружень призводить до зниження границі втоми [8, 21, 22]. Після лазерної обробки шийки втомлених зразків і колінвалів механічно шліфували і доводили до розмірів.

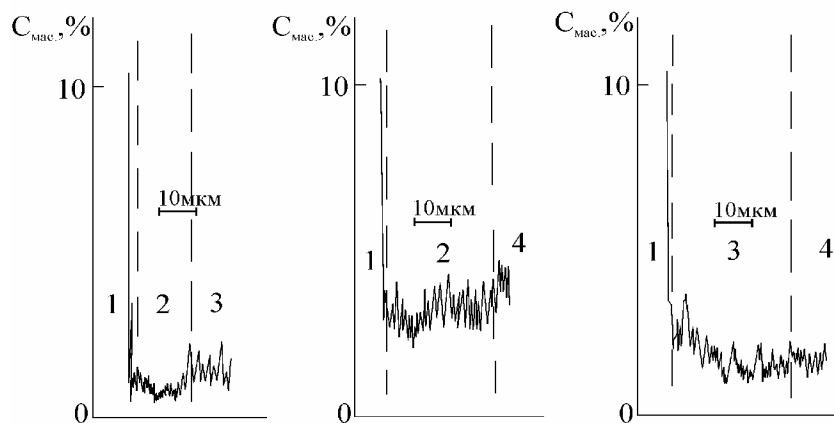
Втомлювані випробування при обертанні із знакозмінним вигином виконували на машині МУИ - 6000 (зразки Ø10мм, база 10<sup>6</sup> симетричних циклів, при  $n = 7$ ) і на універсальній машині МУИ-60 (зразки Ø40 мм, база та ж, при коефіцієнті асиметрії 0,2). Випробування на втому відсіків колін валів проводилися на спеціальному стенді [24, 25, 35].

## II. Обговорення експериментів, аналіз та їх рекомендації

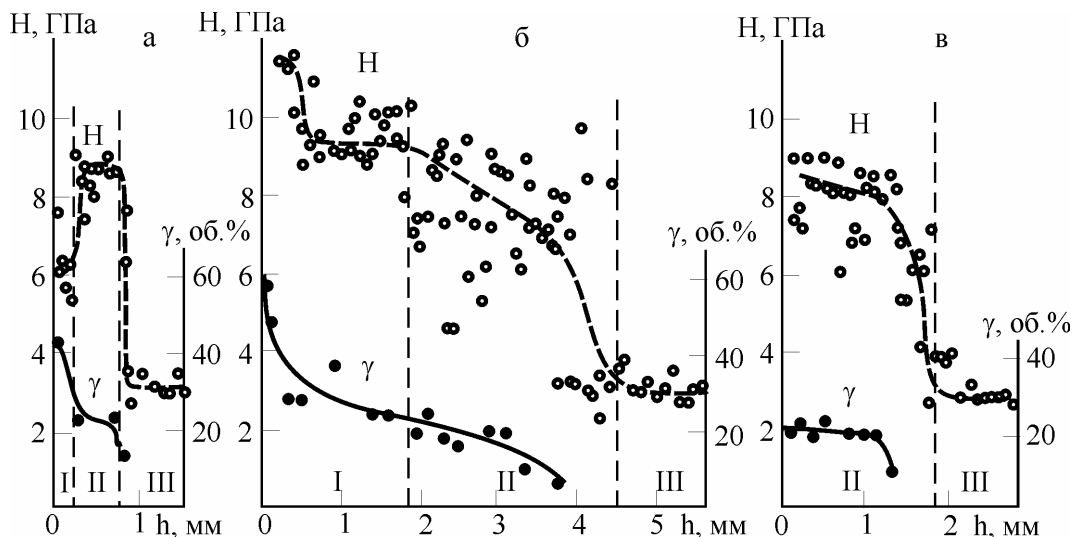
### 2.1. Енергетично-часові параметри лазерної обробки, що визначають ймовірність оплавлення поверхні і глибину зони лазерної взаємодії.



**Рис. 1.** Мікроструктура чавуна ВЧ60-2: а – висхідний стан (1 – графіт, 2 – феррит, 3 – перлит), ×1400; б, в – участки без підплавлення (б) і з контактним плавленням (в) навкруг графітних частинок в зоні лазерного загартування (1 – графіт, 2 – аустеніт, 3 – ледебурит, 4 – мартенсит+аустеніт), ×1400



**Рис. 2.** Розподілення вуглецю в навколо графітних ділянках чавуна ВЧ60-2 : а – висхідний стан (1 – графіт, 2 – феррит, 3 – перлит); б, в – участки без підплавлення (б) і з контактним плавленням (в) навкруг графітових частинок у зоні загартування (1 – графіт, 2 – аустеніт, 3 – ледебурит, 4 – мартенсит +аустеніт)



**Рис. 3.** Зміна мікротвердості  $H$  і кількості остаточного аустеніту  $\gamma$  по глибині  $h$  поверхневого шару чавуну ВЧ60-2, обробленого лазером в режимах із оплавленням (а, б) і без оплавлення (в) поверхні. Зони: I – оплавлення, II – загартування із твердого стану, III – висхідної структури

Після лазерної обробки чавунних деталей зона лазерного впливу складається із зони оплавлення і зони загартування із твердого стану. Порівняння багаточисельних експериментів при довільних режимах лазерного випромінювання показали, що оплавлення чавуна ВЧ60-2 проходить при зростанні потужності вище критичних значень  $W_p = 30 - 32$  Вт/мм<sup>2</sup>. При обробці в режимі без оплавлення по мірі збільшення  $W_e$  до 28 - 29 Дж/мм<sup>2</sup> проходить практично лінійне зростання глибини загартування.

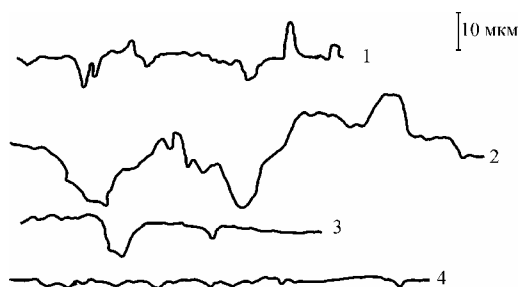
При подальшому підвищенні  $W_e$ , коли проходить оплавлення поверхні, кореляція між густиною енергії і глибиною загартованого шару у загальному вигляді зберігається.

Однак при цьому на різних зразках спостерігається достатньо великий розкид розмірів, як зони загартування із твердого стану, так і всієї зони лазерної взаємодії, що пов'язано із ефектом контактного плавлення навкруг графітових включень [3, 9].

Контактне плавлення обумовлене поглинанням лазерного випромінювання графітом і зниженням температури плавлення навколографітних ділянок металу, що насичені вуглецем. Оплавлений шар внаслідок високої температури володіє підвищеною поглинаючою властивістю [15, 32, 33]. Тому при появленні оплавленого шару зростання глибини зони лазерної взаємодії із підвищенням густини енергії проходить більш інтенсивно у порівнянні із обробкою без оплавлення поверхні.

## 2.2. Структура, фазовий склад і мікротвердість зони лазерної взаємодії.

Висхідна структура чавуна складається із перлитної основи і частинок шаровидного графіту, оторочених феритною складовою (рис. 1, а), яка відповідає найменшій концентрації вуглецю (рис. 2, а, зона 2). Твердість незміцненого чавуну складає 2,8 - 3,6 Гпа.



**Рис. 4.** Профілограми поверхні чавуна ВЧ60-2; 1 – висхідне положення стану після шліфування; 2 – лазерна обробка з оплавленням поверхні; 3 – лазерне оплавлення + шліфування на глибину 35 мкм; 4 – лазерне загартування без оплавлення поверхні.

У процесі лазерного нагрівання і послідуного охолодження на місці бувших перлитних колоній утворюються мартенситно-аустенітні структури [28, 29].

У феритній оторочці проходить повне, або часткове розчинення графітних частинок із утворенням високо вуглецевого аустеніту (рис. 1, б) і аустенітно цементитних структур ледебуритного типу (рис. 1, в). Ледебуритні структури виникають при підплавленні металічної матриці навкруг деяких графітних включень внаслідок ефекту контактного плавлення. В зоні переважно із аустенітної і ледебуритної структурами концентрація вуглецю зростає (рис. 2, б, в, зони 2; 3) у порівнянні із феритною оторочкою навкруг графітної частинки у висхідному чавуні (рис. 2, а, зона 2) [30].

Мікротвердість зони загартування із твердого стану залежить від режиму лазерної обробки і часто досягає 6 - 9 ГПа, при вмісті остаточного аустеніту в межах 20 об.%. (рис. 3, зона II).

Зона оплавлення має мілкодендритну будову, а наявність включень графіту залежить від режимів

обробки. При густині потужності  $W_p = 40 - 60 \text{ Вт/мм}^2$  і малому часі взаємодії, коли внаслідок інтенсивного нагріву поверхневого шару графітні глобули встигають сплинути на поверхню і вигорати, твердість оплавленого шару відносно невелика (5,3 - 7,5 Гпа, рис. 2, а, зона І). При густині потужності більш ніж  $100 \text{ Вт/мм}^2$  і більшому часі взаємодії лазерного променю у оплавленій зоні може проходити повне розчинення графіту і насичення металічної основи вуглецем, підвищується до 8,6 - 11,7 Гпа, при наявності 25 - 55 об.% остаточного аустеніту (рис. 2, б, зона І) [32].

При проміжних значеннях густини потужності у зоні оплавлення проходить спливання до поверхні лише частини графітних включень і їх неповне розчинення.

**2.3. Вплив лазерної обробки на геометричну шорсткість поверхні чавуна.**

Перед опромінюванням шорсткість Rz шліфованої поверхні чавуна складала 20 мкм (рис. 4, крива 1). Після лазерної обробки із оплавленням на глибину 0,55 - 0,85 мм шорсткість поверхні збільшилась до  $Rz = 30 \text{ мкм}$  (рис. 4, крива 2). Це пов'язано із коагуляцією у розтопленій ванні і виходом (спливанням) на поверхню графітових частинок і подальшим їх вигоранням. Після шліфування оплавленого шару на глибину 35 мкм шорсткість зменшується до  $Rz = 11 \text{ мкм}$  (рис. 4, крива 3). При лазерному загартуванні без оплавлення поверхні на глибину 0,25 - 0,48 мм шорсткість понижується до  $Rz = 3 - 5 \text{ мкм}$  (рис. 4, крива 4) за рахунок вигладжування виступів поверхні, що утворюються при шліфуванні, або проточуванні. При цьому величина ямок практично відповідає розміру графітних частинок, які знаходилися безпосередньо на поверхні і вигоріли під дією лазерного випромінювання.

**2.4. Вплив лазерного зміцнення чавуна на опір абразивного зношення.**

Перед випробуванням на абразивну зносостійкість оплавлений шар завтовшки 0,15 мм механічно шліфували. Зона загартування із твердого стану характеризувалася середньою мікротвердістю 8,9 - 9,0 Гпа із вмістом аустеніту в межах 25 об.%. Із рис. 5,а слідує, що лазерне зміцнення приводить до значного росту опору чавуна абразивному зносу (в 2,1 рази при випробуванні по корунду і у 3,3 рази - по кремнію).

При зношуванні корундом (твердість  $H = 20 \text{ Гпа}$ ) руйнування як зміцненого так і не обробленого лазером проходить по механізму мікрорізання, оскільки твердість абразиву підвищує твердість випробуваного матеріалу більш ніж у 1,3 - 1,4 рази [16, 27, 18].

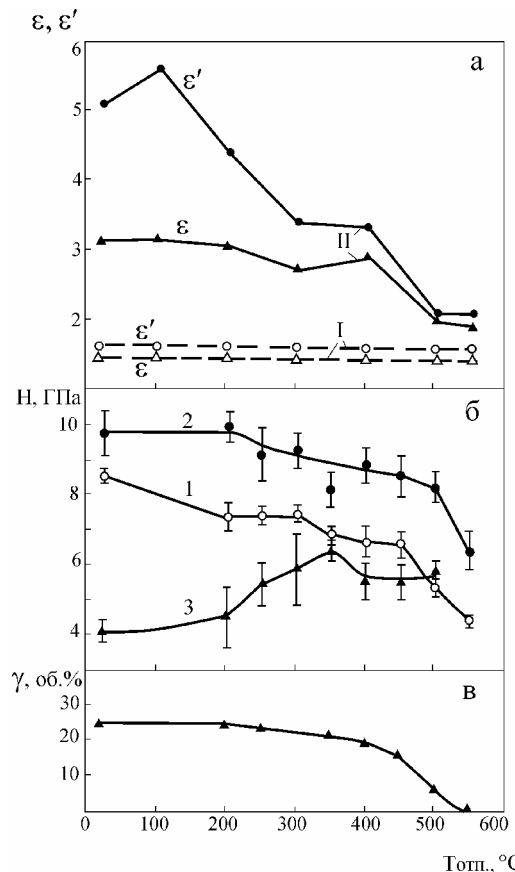
При випробуванні по більш м'якому абразиву - кремнію ( $H = 10 \text{ Гпа}$ ) основи механізмом зносу зміцненого шару, що співставляється із кремнієм по рівню твердості, являється пластичне відтіснення (подряпання), яке характеризується менш інтенсивним руйнуванням матеріалу у порівнянні із мікрорізанням. Це пояснюється більш значним зростанням зносостійкості чавуна внаслідок лазерної

обробки при випробуванні по кремнію.

Підвищена зносостійкість зміцненого лазером чавуна обумовлюється, в першу чергу наявністю у аналізованому шарі коло 75 об.% високо вуглецевого мартенситу, який володіє не тільки великою висхідною твердістю (рис. 3,б, крива 1), але й властивістю до інтенсивного деформаційного зміцнення в процесі абразивного зношування [17]. Останнє пов'язане із ефективним закріпленням атомами вуглецю виникаючих при терті багаточисельних дислокацій внаслідок розвитку у мартенситу лазерного загартування під дією контактної навантаження процесами деформаційного динамічного старіння [17, 18].

Додатною роллю у забезпеченні підвищеної зносостійкості зміцненого шару грають також ледебуритні структури підвищеної твердості (рис. 5, б, крива 2) і високо вуглецевий остаточний аустеніт, який під дією тертя частково перетворюється у мартенсит деформації і впливає на в'язкість руйнування, що реалізується в умовах зношування [19, 20].

Рентгенівський фазовий аналіз у FeKa-



**Рис. 5.** Вплив температури відпуску  $T$  (витримка 1 год) на абразивну зносостійкість при випробуванні по корунду і кремнію (а) мікротвердість окремих складових  $H$ (б) і кількість остаточного аустеніту (ε) у структурі чавуна ВЧ60-2, що підданий лазерній обробці: І - без лазерного зміцнення; ІІ - із лазерним зміцненням; 1 - мартенсит+ аустеніт; 2 - ледебуритна смужка; 3 - аустенітна смужка.

випромінюванні показав, що внаслідок взаємодії корунду і кремнію кількість  $\gamma$ -фази у поверхневому шарі завтовшки 5 мкм зразків, що піддані довільним режимам лазерного зміцнення, знижується лише на 10 об.% при висхідному (до тертя) вмісту аустеніту 25-35 об.%.

Збереження такої значної долі  $\gamma$ -фази на поверхні зношування свідчить про достатньо високу енергію дефектів упаковки у високо вуглецевому аустеніті чавуна ВЧ60-2. Вуглець у більших концентраціях підвищує енергію дефектів упаковки [21, 22], і внаслідок чого понижує ймовірність утворення у аустеніті дефектів упаковки, які стають зародками при утворенні мартенситу деформації [32].

Подібний утруднений деформаційний розклад остаточного аустеніту при абразивному зношенні відмічається у загартованих високо вуглецевих нелегованих сталей У10 і У15 [20, 33]. В той же час у аналогічних умовах абразивної взаємодії проходить процес у легованих сталях і чавунах, що характеризується більш низьким енергетичним рівнем дефектів упаковки  $\gamma$ -фази (цементована хромонікелева сталь [23], білий хромомарганцевий чавун [24], азотовмісна хромомарганцева сталь [25], де спостерігається більш інтенсивний деформаційний розклад остаточного аустеніту [32].

Важливо відмітити, що метастабільний остаточний аустеніт у великих кількостях (60-70 об.%) може впливати на зносостійкість високовуглецевих сплавів заліза не тільки додатно (в умовах мікрорізання), але й від'ємну взаємодію (в умовах пластичного відтіснення) [20, 33]. При відносно невеликій долі  $\gamma$ -фази (20-25 об.%) в структурі чавуна аустеніт додатно впливає на опір обом видам зношування [34, 35].

Графітні вклучення, що присутні в зоні лазерної взаємодії чавуна, не повинні згідно [20] впливати на інтенсивність руйнування матеріалу в умовах мікрорізання і подряпання, оскільки графіт вільно перерізається абразивними частинками обох типів (корундом і кремнієм).

### 2.5. Вплив відпуску на твердість, фазовий склад і абразивну зносостійкість зони лазерного загартування чавуна.

Проведений аналіз рис. 5, б. вказує на різний характер змін при відпуску мікротвердості окремих структурних складових зони лазерного загартування чавуна. Середня твердість загартованої зони визначається твердістю мартенситно-аустенітної основи (крива 1) і в меншій степені – твердістю ледебуритної і аустенітної смужок (відповідно криві 2 і 3), які складають відносно невелику долю зони лазерної взаємодії. Зростання температури відпуску до 200 °С викликає помітне зниження твердості мартенситно-аустенітної основи зони загартування кременистого чавуна (рис. 5, б, крива 1), оскільки кремній, подібно іншим елементам заміщення складає малий вплив на швидкість протікання

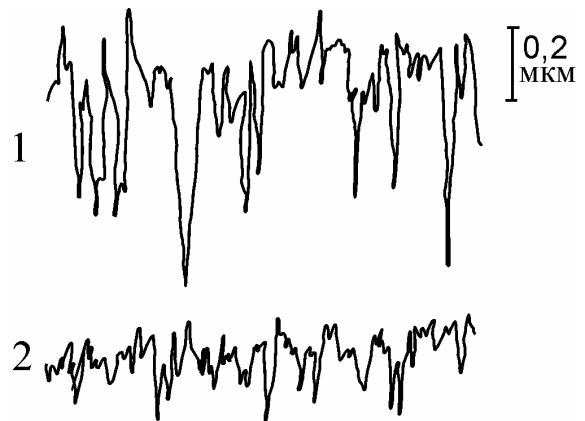


Рис. 6. Профілограми поверхонь зношування чавунних втулок у висхідному (1) і зміцненому лазером (2) станах після випробувань на тертя із змащенням по схемі вал-вкладиш у парі із бронзою Бр.С30 із нанесенням приробленого покриття Pb-Sn-Cu.

початкової стадії розкладу мартенситу [26].

Спостережене при подальшому підвищенні температури відпуску сповільнене зменшення мартенситу обумовлене гальмівним впливом кремнію на процеси розкладу твердого розчину, повернення і рекристалізації  $\alpha$ -фази, на стійкість  $\epsilon$ -карбіду і швидкість коагуляції цементиту [26]. Згідно з рис. 5, в, остаточний аустеніт у зоні лазерного загартування чавуна володіє підвищеною стійкістю до розкладу при нагріві до 400 – 450 °С, що можливо пов'язано із наявністю у  $\gamma$ -твердому розчині кремнію.

У структурі ледебуритного типу (в смужках графітних вклучень) підвищена мікротвердість (більше 8 Гпа), що зберігається до нагріву 500 °С (рис. 5, б, крива 1). У смужках із переважно аустенітною структурою при збільшенні температури відпуску більше 200 °С спостерігається значне зростання твердості (рис. 3, б, крива 3), що обумовлено частковим розкладом високо вуглецевого аустеніту і його фазовим наклепом, що в деяких роботах назване процесом аномалії [32, 33].

Відпуск загартованого лазером чавуна при 300 - 400 °С призводить до зменшення зносостійкості лише на 6 - 12 % при випробуванні по корунду (рис. 5, а) і на 34 - 40 % по кремнію у порівнянні із невідпущеними і відпущеними при 100 °С станами. Більш різкий характер відміченого зниження зносостійкості чавуна при взаємодії із кремнієм обумовлений тим, що при ковзанні по кремнію (на відміну від випробувань по корунду) внаслідок відпуску проходить зміна механізму зношування (від пластичного відтіснення до мікрорізання) внаслідок зменшення твердості зони лазерного впливу і спроможності мартенситу до деформаційного зміцнення [18].

В обробленому лазером кремнієвмісному чавуні відпуск до 450 °С викликає значно більш повільне зниження абразивної зносостійкості у порівнянні із високо вуглецевими нелегованими і легованими 1 - 2 мас.% Mn, Cr, Mo і V сталями, що піддані лазерному і об'ємному загартуванням [18, 20, 27, 28]. Це пов'язано не тільки із гальмівним впливом кремнію на розупорядкування мартенситу, але із наявністю у загартованому шарі чавуні зносостійких структур ледебуритного типу, а також високо вуглецевого метастабільного остаточного аустеніту, присутність якого у відпущеній структурі додатньо впливає на опір абразивного зносу [32, 20].

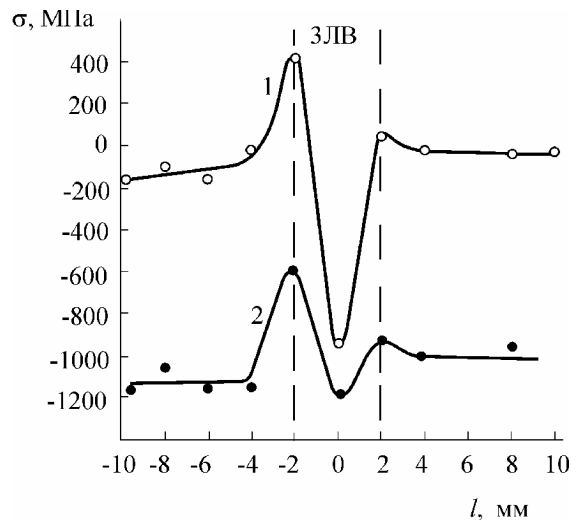
**2.6. Вплив лазерного зміцнення чавуну на трибо логічні властивості в умовах тертя ковзання із змащуванням**

Результати випробувань пари тертя «чавунний вал-вкладиш» на машині тертя ИПС-2, показують, що при лазерному зміцненні втулок (валів) із високоміцного чавуну зменшується знос ,як валу (у 3,9 - 5,3 рази), так і вкладиша із бронзи із природним покриттям (у 30 разів), або із алюмінієвого сплаву (в 7 разів), табл. 1.

Електронномікроскопічним дослідженням встановлено, що висока міцність оброблених випромінюванням лазера чавунних поверхонь обмежує розвиток на них процесів пластичного передеформування і адгезійного зчоплення, що більш інтенсивно розвиваються при фрикційному навантаженні висхідного поверхневого зношування незміцненого чавуну.

Шорсткість Rz поверхонь зносу висхідного і зміцненого лазером чавуну складала відповідно 0,8 і 0,3 мкм, рис. 6 (1; 2). Представлені в табл. 2 результати випробувань по схемі палець-диск показують, що лазерне зміцнення чавуну не призводить до прискореного зношування контртіла із підшипникових сплавів, а також до помітного зростання коефіцієнту тертя.

Навпаки, при терті по оброблюваному лазером



**Рис. 7.** Виявлення розподілення статичних напружень на поверхні лазерної доріжки на зразках Ø 10 мм із чавуну ВЧ60-2, після лазерної обробки (1) і доповнюваного обкатування шариками (2).

диску спостерігається зниження інтенсивності зношування зразків із бабіту, бронзи і алюмінієвого сплаву. При випробуванні зразків із бронзи зафіксовані найбільші коефіцієнти тертя і підвищений фрикційний нагрів [36, 37].

**2.6. Вплив лазерного зміцнення, відпуску і поверхневого пластичного деформування на втомлювані властивості і остаточні напруження у поверхневих шарах чавуну.**

В умовах циклічного навантаження зразків з діаметром шийки 10 мм границя втоми чавуну у висхідному стані складає 140 МПа (табл. 3). Обкатування шариком підвищує границю втоми лише до 150 МПа і внаслідок лазерного загартування границя втоми чавуну знижується у 2 рази і складає 70 МПа, як безпосередньо після загартування, так і після доповнюваного шліфування зміцненої поверхні.

**Таблиця 1**

Вплив лазерної обробки на зносостійкість пари тертя «вал-вкладиш» в умовах тертя ковзання із мастилом

Стан валу Із чавуну ВЧ60-2	Матеріал вкладиша	Знос вала, мкм	Знос вкладиша, г
Висхідне	Бронза Бр.С30-(Pb-Sn-Cu)	5,8	1,7508
Висхідне	Алюмінієвий сплав АО20-1	5,4	0,1454
Лазерна обробка	Бронза Бр.С30-(Pb-Sn-Cu)	1,1	0,0580
Лазерна обробка	Алюмінієвий сплав АО20-1	1,4	0,0211

**Таблиця 2**

Інтенсивність зношування Іп матеріалу пальця і коефіцієнт тертя f пари тертя «палець-диск» в умовах тертя ковзання із змащенням

Матеріал пальця	Стан диска із чавуну ВЧ60-2	Іп, 10 <sup>-10</sup>	f
Баббіт Б83	Висхідний	5,6	0,01
Баббіт Б83	Лазерна обробка	2,5	0,01
Бронза Бр.С30	Висхідний	4,6	0,05
Бронза Бр.С30	Лазерна обробка	2,9	0,07
Алюмінієвий сплав АО20-1	Висхідний	2,6	0,01
Алюмінієвий сплав АО20-1	Лазерна обробка	0,3	0,01

Таблиця 3

Вплив режимів обробки на границю втоми  $\sigma_{-1}$  зразків  $\varnothing 10$  мм із чавуну ВЧ60-2

Стан поверхні матеріалу	$\sigma_{-1}$ , МПа
Висхідний+шліфування	140
Висхідний+шліфування+обкатування (P = 1,5 кН)	150
Висхідний+лазерна обробка	70
Висхідний+лазерна обробка+шліфування	70
Висхідний+лазерна обробка+полірування	110
Висхідний+лазерна обробка+відпуск 300°C+шліфування	120
Висхідний+лазерна обробка+відпуск 550°C+шліфування	130
Висхідний+лазерна обробка+шліфування+обкатування (P = 1 кН)	200
Висхідний+лазерна обробка+шліфування+обкатування (P = 2 кН)	170
Висхідний+лазерна обробка+відпуск 300°C+шліфув.+обкатування (P = 1 кН)	190

Таблиця 4

Вплив режимів обробки на границю втоми  $\sigma_R$  зразків  $\varnothing 40$  мм із чавуну ВЧ60-2

Стан поверхні матеріалу	$\sigma_R$ , МПа
Висхідний+шліфування	80
Висхідний+лазерна обробка+шліфування	75
Висхідний+лазерна обробка+відпуск 350°C+шліфування	80
Висхідний+шліфування+обкатування (P = 5 кН)	115
Висхідний+лазерна обробка+відпуск 350°C+шліф.+обкатування (P = 5 кН)	120

Аналіз і вивчення розподілу остаточних напружень на поверхні лазерної доріжки показали (рис. 7, крива 1), що у центрі доріжки формуються напруження з тиску, що обумовлені мартенситним перетвореннями у даній ділянці. По мірі віддалення від центру рівень стискуваних напружень знижується, що пояснює фазові перетворення (поперечний переріз зони лазерної взаємодії у вигляді сегменту). На кордоні між загартованим і незміцненим металом, у якому фазові перетворення відсутні, виникають локалізовані ділянки із розтягуючими напруженнями (рис. 7, крива 1). Таким чином, основною причиною різкого зменшення границі втоми чавуну при лазерній обробці являється поява на його поверхні зон із розтягуючими остаточними напруженнями, які можуть з'явитися ділянками полегшеного зародження втомних тріщин [29, 31].

При ручній або механічній поліровці зразків шкіркою, за рахунок покращення чистоти поверхні, границя втоми загартованих лазером зразків зростає від 70 до 120 МПа (табл. 3).

Відпуск при 300 і 500 °C після лазерного загартування підвищує границю втоми зразків  $\varnothing 10$  мм відповідно до 120 і 135 МПа (табл. 3). На наш погляд, це пов'язано із зменшенням внаслідок відпуску пікових остаточних напружень розтягу на кордонах лазерних доріжок. Однак лазерна обробка із послідовним відпуском не забезпечує досягнення границі втоми висхідного чавуну. Проведення після лазерного загартування обкатування шариком підвищує границю втоми до 170 - 200 МПа.

Зростання втомлюваної міцності при обкатуванні обумовлене тим, що внаслідок поверхневої пластичної деформації небажані розтягуючі напруження на кордоні лазерної доріжки

перетворюються у стискуючі (рис. 4, крива 2), а також зменшується шорсткість поверхні [14, 37].

При обкатуванні із навантаженням 1 кН досягається більш висока границя втоми лазернозміцненого чавуну ( $\sigma_{-1} = 200$  МПа), ніж при обкатуванні із навантаженням 2 кН ( $\sigma_{-1} = 170$  МПа). Пониження втомної міцності при зростанні зусилля обкатування пов'язане із перенаклепом незміцнених ділянок чавуну, що розташовані між лазерними доріжками, із можливою деформацією шаровидних включень графіту у пластинчаті, які переростають у доповнювані концентратори напружень [30].

Проведений аналіз свідчить про існування оптимальних зусиль поверхневого деформування високоміцного чавуна, зміцненого при лазерній взаємодії. У роботі [30] зроблено висновок про наявність оптимального зусилля (оптимального питомого тиску) у випадку застосування обкатування для підвищення втомлюваної міцності із високоміцного чавуну із шаровидним графітом.

Із таблиці 4 слідує, що лазерна обробка незначно (із 80 до 75 МПа) понижує границю втоми напівнатурних зразків з діаметром шийки  $\varnothing 40$  мм, суттєво менш від'ємно впливає на втомні властивості у порівнянні із лазерним зміцненням зразків  $\varnothing 10$  мм (табл. 3).

Це пояснюється різним співвідношенням глибини зони лазерного впливу і розмірів зразків двох розглянутих типів. Відпуск при 350°C після лазерного загартування збільшує границю втоми зразків  $\varnothing 40$  мм до рівня висхідного стану (табл. 4). Обкатування шариками підвищує границю втоми, як висхідних напівнатурних зразків (до 115 МПа, так і зразків із лазерним зміцненням (до 120 МПа).

Випробування на стенді колінвалів показали, що



границя втоми у висхідному стані складає 60 Мпа на базі 10<sup>n</sup> циклів ,при n = 7. Випробуване послідовне зниження границі втоми незміцненого чавуну на зразках (Ø172 і Ø203 мм) знаходиться у відповідності із відомою тенденцією зменшення границі втоми при збільшенні розмірів зразків деталей [31], а також пов'язане із відмінностями в умовах випробувань.

Внаслідок лазерної обробки шийок валу із послідуочим відпуском при 350 °С границя втоми не змінилася у порівнянні із незміцненим станом, як після зміцнення, так і у висхідному стані вали руйнувалися по шийці. Таким чином, колінвали після лазерної обробки і відпуску не уступають у втомній міцності валам із висхідного незміцненого чавуну, однак зносостійкість останніх суттєво нижча [29].

Обкатування шариком під зусиллям 40 кН шийок колінвалу після лазерної взаємодії і відпуску при 350 °С не вплинуло на втомну міцність, однак, обкатування представляється ціленаправленим для усунення розтягуючих остаточних напружень, які потенційно можуть служити причиною виникнення мікротріщин в процесі продовжуваної експлуатації колінвалу із високоміцного чавуну.

## Висновки

1. Лазерне випромінювання викликає оплавлення поверхні високоміцного чавуну ВЧ60-2 при перевищенні критичної потужності  $W_p = 30 - 32 \text{ Вт/мм}^2$ . При лазерній обробці без оплавлення поверхні встановлена лінійна залежність між густиною енергії і глибиною загартованої зони. При оплавленні із зростанням густини енергії спостерігається більш інтенсивніше (ніж при обробці без оплавлення) збільшення глибини зони лазерної взаємодії при наявності значного розкиду в розмірах загартованих зон, що обумовлюється ефектом плавлення навкруг графітових включень.

2. Підвищення мікротвердості чавуну до 4,5 - 11,8 ГПа при лазерній обробці обумовлено формуванням мартенситно-аустенітних структур на місці перлитних ділянок, а також аустенітно-перлитних структур ледебуритного типу і високо вуглецевого аустеніту внаслідок повного розчинення графітових частинок у феритному прошаруванні.

3. Шорсткість шліфованої поверхні чавуну зростає при лазерній обробці з оплавленням і зменшується при обробці без оплавлення. Достатній припуск під фінішне шліфування оплавленої поверхні складає 25 - 35 мкм.

4. Лазерна обробка підвищує у 2,5 - 3,5 рази опір чавуну при абразивному зношенні в умовах мікрорізання і пластичного відтіснення.

Уповільнений характер зниження твердості і зносостійкості загартованого чавуну при нагріві до 300 – 450 °С обумовлений гальмівним впливом кремнію на перетворення при відпуску мартенситу, наявністю у зоні лазерної взаємодії теплостійких ледебуритних структур, а також додатнім впливом на зносостійкість метастабільного остаточного аустеніту, що володіє підвищеною стійкістю до розпаду при нагріванні.

5. Внаслідок лазерного загартування чавуну зростає роботоспроможність пар тертя «чавунно-кольоровий підшипниковий сплав».

6. Лазерна обробка супроводжується виникненням остаточних розтягуючих напружень на кордонах загартованих ділянок, що суттєво (до 2-х разів) понижує втомну міцність чавуну. Від'ємний вплив лазерного зміцнення на циклічну довговічність понижується при зменшенні співвідношення глибини загартованого шару із розмірами деталі. Послідуочий відпуск при 300 – 350 °С, що зменшує пікові напруження розтягу, і обкатування шариком, що призводить їх до напружень стиску, підвищує границю витримки на втому чавуну, обробленого випромінюванням лазера.

7. Для збільшення терміну експлуатаційної стійкості колінчатих валів тепловантажних двигунів із високоміцного чавуну необхідне проведення лазерної обробки із послідуочим відпуском при 300 - 350 °С і обкатування шариком, що забезпечує суттєве зростання зносостійкості поверхні без зниження втомної міцності і стабільності чавуну.

8. Переваги лазерного поверхневого легування полягають у наступному [32]:

- хороша сприятливість врегулювання параметрів і властивостей поверхневого шару;
- велика швидкість процесу і досягнення високої якості поверхні за стандартами;
- можливість отримання вузьких локальних зон із заданим хімічним складом;
- економія дорогого легуючого матеріалу;
- відсутність необхідності у подальшій обробці (механічній, хімічній, термічній);
- екологічна чистота процесу легування;
- доступність сумісної комбінаційної обробки із іншими технологічними процесами;
- доступність легкого управління режимами у комплексному складі обладнання за прийнятими методиками із подальшими технологічними обробками.

**Завойко О.С.** - здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук кафедри ТОМ.

- [1] P.A. Leont'ev, N.T. Chekanova, M.G. Han, Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov (Metallurgija, Moskva, 1986).
- [2] V.M. Andrijahin, Processy lazernoj svarki i termoobrabotki (Nauka, Moskva, 1988).
- [3] A.A. Levchenko, I.A. Tananko, R.T. Gujva, V.A. Gujva, O.N. Kaftanova, FНOM 1, 62 (1987).
- [4] V.S. Kraposhin, FНOM 6, 88 (1988).

- [5] S.P. Gadag, M.N. Srinivasan, Appl. Phys. A 63(4), 409 (1996).
- [6] J.Adamka, J.Styk, Increase in the surface hardness of spheroidal cast iron by laser treatment and the effect on tribological properties. "Laser Treat. Mater. Eur. Conf. Bad Nauheim, 1986"(Oberursel, 1987), 235.
- [7] V.M. Andrijahin, N.T. Chekanova, Poverhnost'. Fizika, himija, mehanika 1, 129 (1983).
- [8] B.M. Astashkevich, S.S. Voinov, E.A. Shur, MiTOM 4, 12 (1985).
- [9] A.N. Safonov, MiTOM, 1, 7 (1999).
- [10] E.A. Shur, S.S. Voinov, I.I. Kleshheva, MiTOM 5, 36 (1982).
- [11] M.Ja. Gal'perin, I.M. Petrova, L.I. Kuksenova, N.T. Chekanova, A.N. Poljakov, Vestnik mashinostroenija 11, 12 (1985).
- [12] E.G. Stacenko, Ju.N. Konarev, Kolenchatye valy teplovoznih dizeliv (Transport, Moskva, 1985).
- [13] P.A. Molian, ASME: J.Eng. Mater. and Technol. 109(3), 179 (1987).
- [14] L.G. Odincov, Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Spravochnik (Mashinostroenie, Moskva, 1987).
- [15] Promyshlennoe primenenie lazerov. Red. G.Kebner (Mashinostroenie, Moskva, 1988).
- [16] M.M. Hrushhov, M.A. Babichev, Abrazivnoe iznashivanie (Nauka, Moskva, 1970).
- [17] A.V. Makarov, L.G. Korshunov, Izvestija Vuzov. Fizika 8, 65 (2004).
- [18] A.V. Makarov, L.G. Korshunov, A.L. Osinceva, Trenie i iznos 12(5), 870 (1991).
- [19] K.-H. Zum GahrThe, Zs. Metallkunde 68(12), 783 (1977).
- [20] A.V. Makarov, L.G. Korshunov, V.M. Schastlivcev, I.L. Solodova, I.L. Jakovleva, FMM 98(4), 96 (2004).
- [21] W. Charnock, J. Nutting, Metal Sci. J. 1, 123 (1967).
- [22] V.M. Adeev, Ju.N. Petrov, Ukrainskij fizicheskij zhurnal 20(12), 2004 (1975).
- [23] A.V. Makarov, L.G. Korshunov, N.L. Chernenko, N.N. Koval', Ju.E. Krejndel', I.V. Osipov, I.Ju. Chuprakova, FMM 68(1), 126. 1989
- [24] I.I. Koscina, V.V. Sagaradze, A.V. Makarov, A.N. Kozlova, A.I. Ustjuzhaninova, MiTOM 4, 7 (1996).
- [25] A.V. Makarov, L.G. Korshunov, V.M. Schastlivcev, N.L. Chernenko, Ju.I. Filippov, FMM 96(3), 101 (2003).
- [26] M.V. Belous, V.T. Cherepin, M.A. Vasil'ev, Prevrashhenija pri otpuske stali (Metallurgija, Moskva, 1973).
- [27] A.V. Makarov, L.G. Korshunov, L.H. Kogan, Je.S. Gorkunov, I.L. Solodova., A.L. Osinceva, Trenie i iznos 19(5), 633 (1998).
- [28] A.V. Makarov, S.P. Nasonov, L.G. Korshunov, N.L. Chernenko, A.L. Osinceva, FMM 83(2), 128 (1997).
- [29] H. Vol'fart, Vlijanie struktury, sposoba izgotovlenija i nagruzhenija na ustalostnuju prochnost'. Vlijanie ostatocnyh naprjazhenij. V kn.: Povedenie stali pri ciklicheskih nagruzkah. Per. s nem. (Metallurgija, Moskva, 1983).
- [30] V.A. Anan'evskij, M.N. Sultani, V.V. Hil'chevskij, L.A. Dabizha, Problemy prochnosti 4, 87 (1983).
- [31] V.F. Terent'ev, Ustalostnaja prochnost' metallov i splavov (Intermet Inzhiniring, Moskva, 2002).
- [32] O.S. Zavojko, Fizika i himija tverdogo tila 15(2), 418 (2014).
- [33] O.S. Zavojko, Vseukraïns'kij shhokvartal'nij naukovo-tehnichnij zhurnal 3(48), 119 (2013).
- [34] ISSN 2073-1574. Vestnik AGTU, Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija 4, (2010).
- [35] Ju.I. Matveev, P.P. Mordvinkin, Materialy nauch.-tehn. konf. prof.-prep. sostava. Vyp. 283 (Novgorod: VGAVT, 1999), s. 77.
- [36] Ju.I. Matveev, (Novgorod: VGAVT, 2002).
- [37] D. M. Gureev i dr., FiHOM 2, 18 (1985).
- [38] G.A. Akulina, S.Je. Cyrilin, Lazernaja zakalka detalej mashin (NIImash, Moskva, 1984).
- [39] Ju. Vasil'ev, N. V. Edneral, T. T. Kuz'menko, N. T. Chekanova, Zashhita metal lov 3, 45 (1982).
- [40] V.S. Kovalenko, K.K. Jemali, Jelektronnaja obrabotka materialov 1, 28 (1980).
- [41] L.F. Golovko, V.S. Kovalenko, Jelektronnaja obrabotka materialov 6,3236 (1980).
- [42] A.G. Grigor'janc, A.N. Safonov, V.N. Tarasenko, N.Ju. Mareev, Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metal lov 9, 31 (1982).