

УДК 621.74

<sup>1</sup>Чернета О.Г., к.т.н., <sup>2</sup>Кубіч В.І., к.т.н., <sup>1</sup>Скорняков Є.С., д.т.н.<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет.<sup>2</sup>Запорізький національний технічний університет

## АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ЗМІЦНЕННЯ СЕРЕДНЄВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

*В роботі приведений аналіз зміцнення середнє вуглецевих сталей, представлені результати дослідження фізико-механічних властивостей робочих шарів середнє вуглецевих сталей. Розроблений комбінований метод лазерної обробки з утворенням зносостійких шарів з високими фізико-механічними властивостями.*

*Підібрані оптимальні параметри і режими лазерного впливу на поверхневі шари.*

*За результатами проведених досліджень отримані зображення мікроструктур робочих поверхонь, приведені мікротвердості поверхневого шару деталі середнє вуглецевих сталей.*

**Ключеві слова:** середнє вуглецеві сталі, технологічні способи обробки, зміцнення, металографічні дослідження, робочі поверхні, мікроструктура.

**Постановка проблеми.** Експлуатаційні, службові властивості матеріалів виявляються в процесі роботи виробів при їх взаємодії з іншими виробами або зовнішнім середовищем. Найчастіше оцінюють працездатність матеріалів в умовах тертя і зношування (коефіцієнт тертя, зносостійкість), підвищених і високих температур (теплостійкість, повзучість, жароміцність, жаростійкість), а також в хімічно активних середовищах (корозійна стійкість). Багаторічні експериментальні дослідження зносостійкості сталей і сплавів, проведені багатьма авторами й організаціями, не дозволили створити єдиний довідкової інформації з добре відомого переліку сталей і сплавів. Але необхідність у такій інформації (створення банку даних) очевидна.

Важко судити про першопричини високої або низької зносостійкості, коли не зазначені навіть режими термічної обробки, особливо температури відпустки після загартування. Зроблена спроба проаналізувати зносостійкість сталей основних структурних класів з обліком їхніх механічних властивостей у загартованому стані при температурах відпустки. В результаті термічної обробки матеріали здобувають високу твердість, міцність і зносостійкість, необхідні для обробки матеріалів різанням або тиском.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Аналіз основних досліджень і публікацій [1-3] показує, що комплексне вирішення проблем формування поверхневого шару деталей автомобілів недостатньо досліджене і потребує суттєвого відпрацювання.

**Метою роботи** є дослідження процесів зносу і розробка технологічних способів формування робочих поверхневих шарів деталей автомобілів, виготовлених із середнє вуглецевих сталей.

**Матеріали дослідження.** Якість сталей залежить від її хімічного складу, технології плавки, додаткової обробки і рідкому стані і умов плавлення. Основними вимогами до механічних властивостей середнє вуглецевих сталей є вимоги до мети текучості, опору крихкому руйнуванню, порогу холодноламкості, опору втомленості, зносу і корозії.

Зміцнення середнє вуглецевих сталей забезпечується за рахунок наступних механізмів зміцнення: твердо розчинного, дислокаційного, дисперсного, зерногранічного і субструктурного [1]. Необхідні значення зміцнюючих характеристик забезпечуються підбором складу сталі, а також шляхом термічної, термомеханічної, хіміко-термічної та деформаційних обробок. В таблиці 1 наведені основні механізми зміцнення середнє вуглецевих сталей.

Для середнє вуглецевих ферито-перлітних сталей інтенсивність впливу різних факторів на властивості суттєво залежать від вмісту вуглецю або від кількості перліту в їх складі. За мірою росту вмісту перлітної складової вона відіграє основну роль в змінні міцності і пластичності.

Із збільшенням вмісту вуглецю знижується значення ударної в'язкості сталі і збільшується температура в'язко крихкого стану. Морфологія перліту впливає на властивості сталі.

Так зменшення між пластичної відстані в перліті погіршує ударну в'язкість сталі, але одночасне уточнення цементитних пластин впливає протилежним чином – коли ці процеси взаємно урівноважуються, а сумарний вплив морфології перліту не виявляються.

Основні механізми зміцнення середні вуглецевих сталей [1].

Механізм зміцнення	Твердий розчин	Дислокаційний	Дисперсійний	Зерногранічний
Структура	Ферит + перліт Мартенсит	Ферит + перліт Мартенсит	Ферит + перліт Мартенсит	Ферит + перліт Мартенсит
Компоненти механізму зміцнення	Легування фериту Легування мартенситу	Дислокації в фериті ( $\beta=10^7 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$ ) Дислокації в мартенситі ( $\beta=10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ )	Перлітна складова Дисперсійні карбонітриди	Розмір зерен і субзерен фериту Розмір субзерен мартенситних пакетів, двійників,

Для підвищення міцних властивостей сталей найчастіше використовують метод легування хромом, але хром сприяє крихкості. Додання до сталі бору (0,002-0,005%) збільшує прокаліваємість і підвищує поріг холодноламкості. Шкідлива дія азоту проявляється в зниженні пластичності і в'язкості сталі в наслідок її старання. Перехід азоту з розчину в нітриди або карбонітриди робить сталі невтомленими. Мікролегування бором (0,003%) забезпечує подріблення структури, підвищення міцних властивостей термооброблюємих сталей. Отримання сталей високої міцності приводить до зниження характеристик пластичності, в'язкості і опору крихкому руйнуванню [1].

Критеріями конструктивної міцності є характеристики міцності і критерій Ірвіна, що характеризує здібність матеріалу гальмувати розвиток тріщин і визначається наступним співвідношенням:

$$K_{IC} = \alpha \sigma_{cp} \sqrt{\pi l_{кр}}$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує форму тріщини;  $\sigma_{cp}$  – середнє розрахункова напруга;  $l_{кр}$  – критична довжина тріщина.

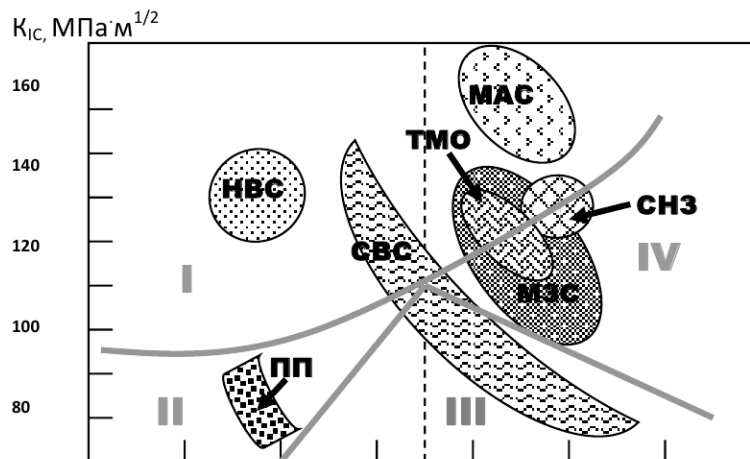


Рис.1 Діаграма конструктивної міцності сталей: MAC – метастабільні аустенітні сталі; CH3 – сталі знад мілким зерном; TMO – сталі після термообробки; M3C – мартенсито зістарені сталі; SVC – середньо – вуглецеві сталі; HVC –низько вуглецеві сталі; ПП – евтектоїдні сталі з пластинчастим перлітом; I – область в'язкого руйнування; II – область транскристалітного сколу; III – область інтеркристалітного сколу; IV - область квазі сколу [1].

На рис.1 надана узагальнена діаграма конструктивної міцності сталей різних класів і способів зміцнення [1]. Пунктирною лінією на діаграмі позначено значення  $\sigma_{0,2} = 1400 \text{ МПа}$ , що є нижнім кордоном межі витривалості. Збіг високих значень  $\sigma_{0,2}, K_{IC}$  досягається тільки при використанні термомеханічної обробки, мартенсито – зістарених сталей (M3C), або принципово нових (MAC, CH3) сталей.

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

До основних способів зміцнення, що забезпечують високі пружні властивості є: пластичне деформування з наступним стабілізуючим відпуском; гарт сталей на мартенсит з наступним відпуском; гарт на перенасичений твердий розчин з наступним етапом старіння.

Перспективним напрямом підвищення міцності і зносостійкості сталей є суміщення в них декількох структурних механізмів зміцнення за рахунок використання комбінованих методів обробки поверхневого шару металів (обробка поверхні струмами високої частоти, іона імплантація, лазерна обробка).

Поглинання металами лазерного випромінювання призводить до миттєвого збільшення енергії вільних і пов'язаних електронів. Енергія лазерного випромінювання трансформується в рух атомів, а збуджені електрони стикаються з атомами решітки (час релаксації –  $10^{-12}$  с).

Швидкий тепловий відвід в глибину металу сприяє утворенню в поверхневих шарах деталі особливих загартованих структур.

До комбінованих методів зміцнення поверхневого шару деталей за допомогою лазерного випромінювання слід віднести:

- лазерне легування легкими елементами і карбонітридами, де під шаром карбонітридів (15 -20 мкм) утворюється шар азотистого мартенситу (150 -200 мкм), а надалі зона вуглецевого мартенситу ( 2-3мм);

- лазерне легування з наступним азотуванням (зносостійкість підвищується в 15 разів в порівнянні з азотуванням);

- послідовне іонне і лазерне випромінювання (зменшення розмірів зерен, подріблення блоків з підвищенням на 15 -20% мікротвердості в порівнянні з окремою імплантацією азоту або лазерною обробкою;

- термопластична обробка при лазерному оплавленні (ріст дисперсної структури та стискуючих напруг при підвищенні мікротвердості);

- цементація з лазерною обробкою (підвищення тимчасового опору і зносостійкості);

- нанесення інтерметалідних покриттів з наступною лазерною обробкою(70% насичення матеріалу підшару порошком системи Ni - Al при товщині шару 0,3 – 0,4 мм з підвищенням гідро абразивної стійкості в 1,6 -2 рази);

- лазерне випромінювання і наступна електродугова обробка (зменшуються параметри шорсткості і хвилястості);

- бромохромування з лазерною обробкою (мікротвердість на сталі 40X підвищується до 2340 МПа);

- електроерозійне покриття, що наноситься на середньо вуглецеві сталі електродом ВК8 з наступним лазерним оплавленням для формування зони термічного впливу великої товщини з низькою пористістю і значною мікротвердістю;

- лазерна обробка з електроіскровим легуванням, що підвищує зносостійкість в 2,5 рази;

- борування з лазерним випромінюванням робочої поверхні деталей з підвищенням мікротвердості від 1400 до 18000 МПа.

На практиці для азотування використовують леговані сталі. Наявність легованих елементів, як і вуглецю, суттєвих принципів змінень в кінетику утворення азотованого шару не вносить. При наявності легованих елементів відбувається послідовне утворення насичених азотом шарів  $\alpha$ , потім  $\gamma' + \alpha$ , а потім  $\varepsilon + \gamma' + \alpha$ . Одночасно утворюються нітриди спеціальних елементів (CrN, MoN, AlN і т.п.). Наявність вуглецю призводить до утворення на поверхні карбонітридних фаз типу  $Fe_3(C,N)$ ,  $Fe_2(C,N)$  [6].

Карбіди типу  $Me_3C$ ,  $Me_{23}C_6$ ,  $Me_7C_3$   $Me_6C$ , що відносяться до першої групи, мають складну кристалеву решітку. Порядок розчинення карбідів в аустеніті визначається їх відносною стійкістю, а ступінь переходу у розчин – їх кількістю.

Імплантація азоту в низько вуглецеву сталь підвищує втомлену стійкість [3]. Азот в зоні імплантації (~ 1000Å) сприяє до значного зростання радіаційних дефектів, частково руйнує кристалічну решітку металу і карбіду і модифікує структуру. Стаціонарні метастабільні структури, що утворюються в результаті імплантації, можуть розпадатися на більш стабільні фази. Так пересичений азотом мартенсит, що утворився при імплантації може перетворитися в метастабільний нітрид. Імпантована азотом сталь містить частки  $Fe_{16}N_2$  (100Å) на поверхні [3].

Крім того дифракційна картинка свідчить про утворення голчастих включень (т.е. мартенситу). Мартенситна фаза утворилася при імплантації, але її складно виявити поки не відбулося декоруючи її падіння нітридів (або карбідів).

Високо енергетична імплантація при підвищених температурах визиває появу під поверхневої області, де зміна складу і структури визначається насам перед потоками дефектів

до поверхні [4]. Міграція атомів в з'єднаннях супроводжується фазовими перетвореннями, що часто спостерігається при іонній імплантації [5].

Вихідна структура сталі 50ХФА є ферито-цементитною, а фазові і структурні перетворення в цій сталі при охолодженні після нагріву в  $\gamma$  – області описуються в літературі [6] ізотермічними і термокінетичними діаграмами перетворення аустениту. В залежності від швидкості охолодження аустеніт в сталі 50ХФА розпадається з утворенням структур ферито-перлітного або бейніто-мартенситного типів, т.е. фаза типу в  $Me_7C_3$  в сталі 50ХФА при звичайних режимах термічної обробки не утворюється.

Аналіз фазового складу поверхневої зони азотованих зразків після лазерної обробки проводили на дифрактометрі ДРОН-2,0 в мідному монохроматизованому випромінюванні. Розшифрування дифрактограми, показала наступне. Основними фазами азотованої поверхні з лазерною обробкою, є  $\alpha - Fe$ , карбонітрид  $Me_7(CN)_3$ , де  $Me(Fe, Cr, Mn)$ , и нітрид  $Fe_3N$  (рис.2).

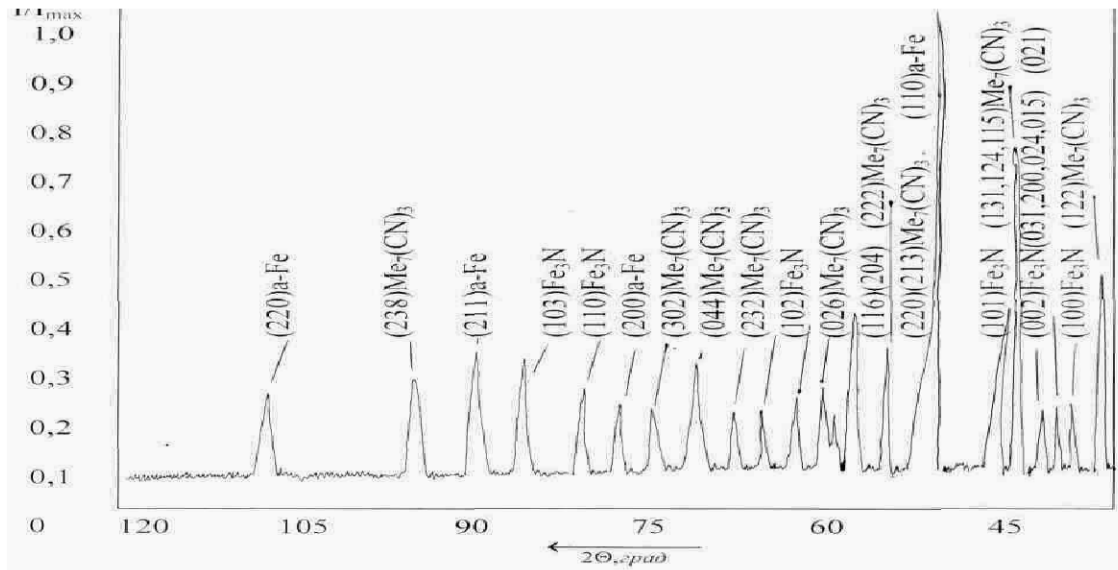


Рис.2. Дифрактограма робочій поверхні азотованого зразка з наступною лазерною обробкою

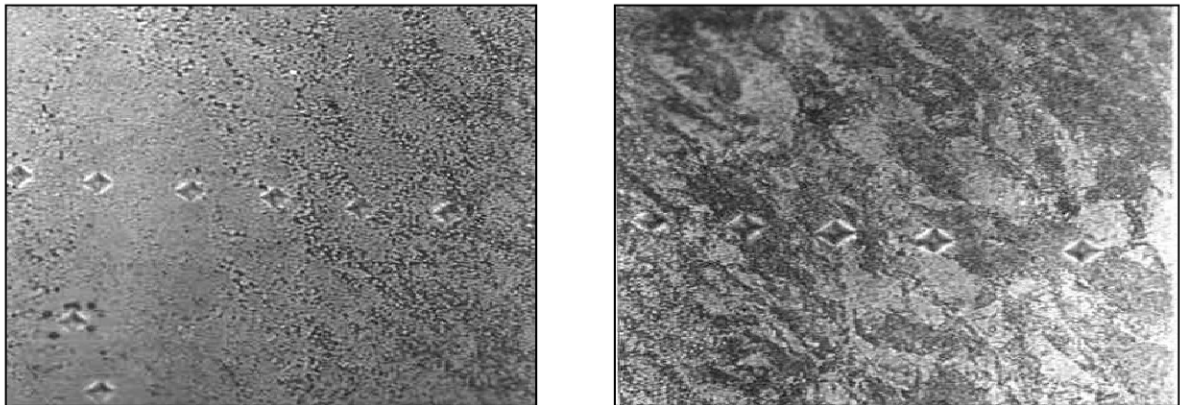


Рис.3. Мікроструктура ділянок робочих поверхней, що оброблені лазером, x 400

Визначаємо, що  $\alpha - Fe$  - це гарденит білих плям і ферит темних ділянок поверхні [7].

Фаза  $Me_7(CN)_3$  є карбонітрид зі складною орторомбічною решіткою, де частину позицій атомів вуглецю займають атоми азоту. На дифрактограмі рис.2 вдалося виявити 13 ліній, що властиві ізоморфним фазам типу  $Mn_7C_3$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $(Fe, Cr)_7C_3$ ,  $Me_7C_3$  [8,9].

**Висновки.** Зроблений аналіз існуючих технологічних способів зміцнення поверхневого шару. Досліджено динаміку трансформації мікроструктур при застосуванні ряду технологічних способів зміцнення. Проведене дослідження про зміцнення середньо вуглецевих сталей дозволяє підібрати оптимальну технологію зміцнення з відповідними фізико-механічними характеристиками і властивостями поверхневого шару деталей середньо вуглецевих сталей.

**Інформаційні джерела**

1. Качество машин / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. //Справочник .Т2 М. Машиностроение 1995 – 19.430.
2. Surface modification and alloying by laser, ion, and electron beams /J.M. Poate, G. Foti, D.C.Jacobson / М. Машиностроение 1987 – с. 301.
3. Hu W.W., Herman H., Clayton C.R. et.aI. In: Ion Implatation Metallurgy/ ed. G.M.Preece and J.K. Hirvonen. New York: TSM-AIME, 1980.
4. Marvick A.D. Nucl. Instr. Methods. 1981. vol.182/183, p.827
5. Mantl S., Sharma B.D., Antesberger G. Phil. Mag. 1979. vol.39A, p.389
6. Металловедение / А.П.Гуляев / Из-во «Металлургия». Москва 1996 - с.262.
7. Зав'ялов А.С., Теплухін Г.Н., Габеев К.В. Условия и механизм образования безструктурного мартенсита (гарденита). Металловедение и термическая обработка метал лов. №10-1979. –С11-12.
8. Дослідження технологічних способів формування зносостійких покриттів на основі лазерної обробки. Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади»//м. Луцьк листопад 2014 р. – Луцьк: ЛНТУ, – Вип.5(2) – 2014. С171-176.
9. Дослідження мікроструктури зношених деталей автомобілів із сталі 45 при відновленні і багатократній термічній обробці. //Перспективні технології та прилади. м. Луцьк червень 2017 р. –ЛНТУ, – Вип.10(1) – 2017. С.212-217.

<sup>1</sup>Чернета О.Г., к.т.н., <sup>2</sup>Кубич В.И., к.т.н., <sup>1</sup>Скорняков Э.С., д.т.н.

<sup>1</sup>Днепровский государственный технический университет.

<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ УПРОЧНЕНИЯ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

*В работе приведен анализ повышения износостойкости среднеуглеродистых сталей, представлены результаты исследования физико-механических свойств рабочих поверхностей среднеуглеродистых сталей. Разработан комбинированный метод лазерной обработки с образованием износостойких слоев с высокими физико-механическими свойствами.*

*Подобраны оптимальные параметры и режимы лазерного воздействия на поверхностные слои. По результатам проведенных исследований получены фотографии с микроструктурами рабочих поверхностей после азотирования и лазерной обработки.*

**Ключевые слова:** *среднеуглеродистые стали, технологические способы обработки, упрочнение, металлографические исследования, рабочие поверхности, микроструктура.*

<sup>1</sup>O. Cherneta, <sup>2</sup>V. Kubich, <sup>1</sup>E. Scornyakov

<sup>1</sup>Dneprovsky State Technical University

<sup>2</sup>Zaporosky National Technical University

**THE ANALYSIS MECHANISM OF INCREASING RELIABILITY MIDDLE CARBON STEELS**

*The analysis of microstructures of increasing wear resistant transformation wear layers from the middle carbon steel, depending on technological methods and physical-mechanical properties of work surfaces are given in the article. The methodology of the work is founded on an establish to formation behavior of physical and mechanical as well as properties of wear resistant surface at all stages of manufacturing method of laser treatment. The influence behavior of spatial and temporal characteristics of laser beam are established on the basis of heat make for laser treatment process and experimental date of qualitative parameters of formed layers. Due to the results of the research the pictures of the microstructures of work surfaces by nitric and laser treatment are received.*

**Key words:** *middle carbon steel, technological methods of treatment, metallic graphic research, work surface, microstructures*