

**М. С. СТЕПАНОВ, О. Ю. РЕБРОВ, С. М. ШЕВЧЕНКО, О. М. РЕБРОВА,
М. А. ПОГРІБНИЙ**

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТА ТРАКТОРНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ

В статті наведений приклад різних методів поверхневого зміцнення деталей транспортної та тракторної техніки. Показана особлива роль шліфування, як багатофакторної обробки, на базі якої в стадії розвитку, вивчення та впровадження знаходиться обробно-зміцнювальна технологія електро-ерозійного алмазного шліфування. Запропоновано оцінювати можливість формування зміцненого шару, що отримується при виконанні технологічного процесу з урахуванням енергетичного впливу на заготовку. Приведені формули енергетичного коефіцієнту, який обумовлює виникнення зміцненого шару при електро-ерозійному алмазному і абразивному шліфуванні. Показана структура поверхневого шару після електро-ерозійного алмазного шліфування та проведено дослідження розподілу вмісту вуглецю за глибиною поверхневого шару. Проаналізовано технологічні особливості електро-ерозійного алмазного шліфування як комбінованого обробно-зміцнювального методу. Для формування заданих характеристик поверхневого шару і оптимізації структури оброблюваних прецизійних деталей в процесі електро-ерозійного алмазного шліфування представлена схема для вибору технологічних параметрів обробно-зміцнювальної технології на стадії проектування з урахуванням вмісту вуглецю в сталі, глибини шліфування і сили струму.

Ключові слова: методи поверхневого зміцнення, шліфування, енергетичний вплив, електро-ерозійне алмазне шліфування (ЕАШ), алмазне шліфування (АШ), технологічний процес, поверхневий шар, «білий шар» – гарденіт, зносостійкість.

М. STEPANOV, O. REBROV, S. SHEVCHENKO, O. REBROVA, M. POGRIBNIY

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF WEAR RESISTANCE OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR PARTS BY SURFACE HARDENING METHODS

The article presents an example of various methods of surface hardening of parts of transport and tractor equipment. The special role of grinding as a multifactorial processing is shown, on the basis of which the processing and strengthening technology of electro-erosion diamond grinding is at the stage of development, study and implementation. It is proposed to evaluate the possibility of forming a hardened layer obtained during the technological process, taking into account the energy impact on the workpiece. The formulas of the energy coefficient, which determines the formation of a hardened layer during electro-erosion diamond and abrasive grinding, are given. The structure of the surface layer after electro-erosion diamond grinding is shown and the distribution of carbon content along the depth of the surface layer is studied. The technological features of electrical discharge diamond grinding as a combined machining and hardening method are analyzed. To form the specified characteristics of the surface layer and optimize the structure of machined precision parts in the process of electrical discharge diamond grinding, a scheme for selecting the technological parameters of the machining-hardening technology at the design stage is proposed, taking into account the carbon content of steel, grinding depth, and current strength.

Key words: surface hardening methods, grinding, energy impact, electrical discharge diamond grinding (EDM), diamond grinding (DG), technological process, surface layer, “white layer” - gardenite, wear resistance.

Вступ. Забезпечення тривалої експлуатації та надійної роботи деталей автомобільної та тракторної техніки, машин і механізмів, ріжучих інструментів, технологічного обладнання, устаткування й спорядження є однією з ключових задач сучасного машинобудування. Це обумовлено значними витратами матеріальних, економічних і соціальних ресурсів на їх виготовлення, ремонт і технічне обслуговування. Сучасні машини характеризуються постійним зростанням потужності та робочих навантажень при одночасному збільшенні швидкостей і прискорень виконавчих органів, а також передачею все більших зусиль і крутних моментів. Усе це призводить до підвищення вимог до їх надійності. Здебільшого причиною втрати працездатності та передчасного виходу з ладу під час експлуатації є процеси, що відбуваються у поверхневих та приповерхневих шарах деталей, зокрема: тертя і зношування, перерозподіл залишкових напружень і їх локалізоване накопичення, поява мікротріщин,

ослаблення матеріалу. Саме приповерхневі шари, як зона контакту із зовнішнім, часто агресивним середовищем, найбільше піддаються його впливу. Зменшення або усунення цих негативних чинників сприяє підвищенню точності контактних поверхонь, зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості та контактної жорсткості. Досягти покращення властивостей приповерхневих шарів можна завдяки вдосконаленню конструкцій, оптимальному вибору матеріалів із покращеними фізико-механічними характеристиками, а також шляхом впровадження нових технологій зміцнення поверхонь деталей. Серед таких методів свою впевнену позицію займає електро-ерозійне алмазне шліфування (ЕАШ). Технологічний процес механічної обробки ЕАШ вигідно відрізняється від нині існуючих оздоблювальних методів обробки деталей автомобільної та тракторної техніки своєю технологічністю і ресурсоекономічністю. ЕАШ можна розглядати не тільки, як спосіб отримання тіл певних геометричних розмірів та форми, але і як цілеспрямований спосіб зміни структури і властивостей металу. У зоні контакту шліфувальний круг–деталь виникають умови, характерні для імпульсних зміцнювальних технологій, метою яких є отримання на обробленій поверхні наноструктурного мартенситу – структури «білого шару» (БШ), званого також гарденітом.

Аналіз тенденцій розвитку шліфування як багатокомпонентної структури робить наочними очікування результати науково-технічного прогресу в механічному обробленні деталей [1]. Наприклад, запропоновано новий високопродуктивний спосіб однопрохідної обробки торцевих поверхонь роликів підшипників кочення на двосторонніх торцешліфувальних верстатах орієнтованими шліфувальними кругами, що мають калібрувальну ділянку, яка забезпечує високу точність обробки. Цей спосіб дозволяє зменшити діапазон розсіювання розмірів та перейти до методу повної взаємозамінності при складанні підшипникових вузлів [2]. Визначимо, що обсяг світового ринку шліфувальних верстатів у 2018 році становив 4,72 млрд доларів США, а до 2027 року він сягне 6,73 млрд за прогнозами компанії Fortune Business Insights™, що пропонує маркетингові дослідження та консалтингові послуги для глобального бізнесу. При цьому прогнозується середньорічний темп зростання 4,6% протягом аналізованого періоду.

Прогнозований темп зростання ринку США - 3,1%, темп зростання Китаю - 5,7% за аналізований період з 2020 по 2027 р., для порівняння в Європі - зростання в Німеччині прогнозується приблизно на 1,5%. Зростання пов'язане зі збільшенням попиту з боку автомобільного сектора і металообробної промисловості. Проаналізовано найбільш значущі сфери застосування сучасних шліфувальних верстатів: автомобільний сегмент займає найбільшу частку світового ринку протягом прогнозованого періоду до 2027 р. через розширення автомобільної інфраструктури в країнах з ринковою економікою, що формується, і через збільшення виробництва та продажу електромобілів у всьому світі. [1, 3]

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Одним із найбільш ефективних способів підвищення надійності машин є надання деталям необхідних експлуатаційних характеристик за допомогою методів поверхневого зміцнення. Сучасні методи і технологічні процеси поверхневого зміцнення дозволяють контролювати якість обробки та оптимізувати характеристики поверхонь і приповерхневих шарів. До таких характеристик належать мікро- та макронерівності, мікротвердість, глибина й знак залишкових напружень. Класифікацію основних методів зміцнення автомобільної та тракторної техніки представлено на рис. 1.

Серед основних технологій зміцнення металевих поверхонь найбільш перспективним вважаються технології за рахунок зміцнення шляхом структурних змін приповерхневого шару. До цих технологій входять такі основні методи: фізико-термічна обробка, електрофізична обробка, механічна обробка та наплавлення легованого металу.

До фізико-термічної обробки належать, зокрема, лазерна і плазмова обробка. Методи електрофізичної обробки включають електроконтактну, електроерозійну та ультразвукову обробку. У групу механічного зміцнення входять такі процеси, як вібраційне зміцнення,

фрикційна обробка, дробеструменеве зміцнення, вибухова обробка, карбування, вібраційно-відцентрове зміцнення. Наплавлення легованого металу здійснюється за допомогою газового полум'я або електричної дуги. Технологія лазерного зміцнення поверхонь базується на локальному нагріванні поверхні лазерним променем із подальшим надшвидким охолодженням за рахунок теплопровідності внутрішніх шарів металу. Цей процес є також поверхневим.

Мета та постановка задачі дослідження. Характеризувати метод ЕАШ як перспективний для обробки деталей авто-тракторної техніки. Проаналізувати технологічні особливості ЕАШ як комбінованого обробно-зміцнювального методу. Оцінити можливість формування зміцненого шару, що отримується при виконанні технологічного процесу з урахуванням енергетичного впливу на деталь. Для ЕАШ і абразивного шліфування (АШ) показати залежності, які визначають характер енергетичного впливу, що сприяє утворенню зміцненого БШ, і враховують деформаційний фактор у зоні різання. Показати особливості структури та складу поверхневого шару після ЕАШ. Дати практичні рекомендації для формування заданих характеристик поверхневого шару і оптимізації структури оброблюваних прецизійних деталей в процесі ЕАШ.

Основний матеріал та результати дослідження.

Умови експлуатації деталі визначають застосування того чи іншого методу впливу для формування властивостей поверхневого шару (ПШ).

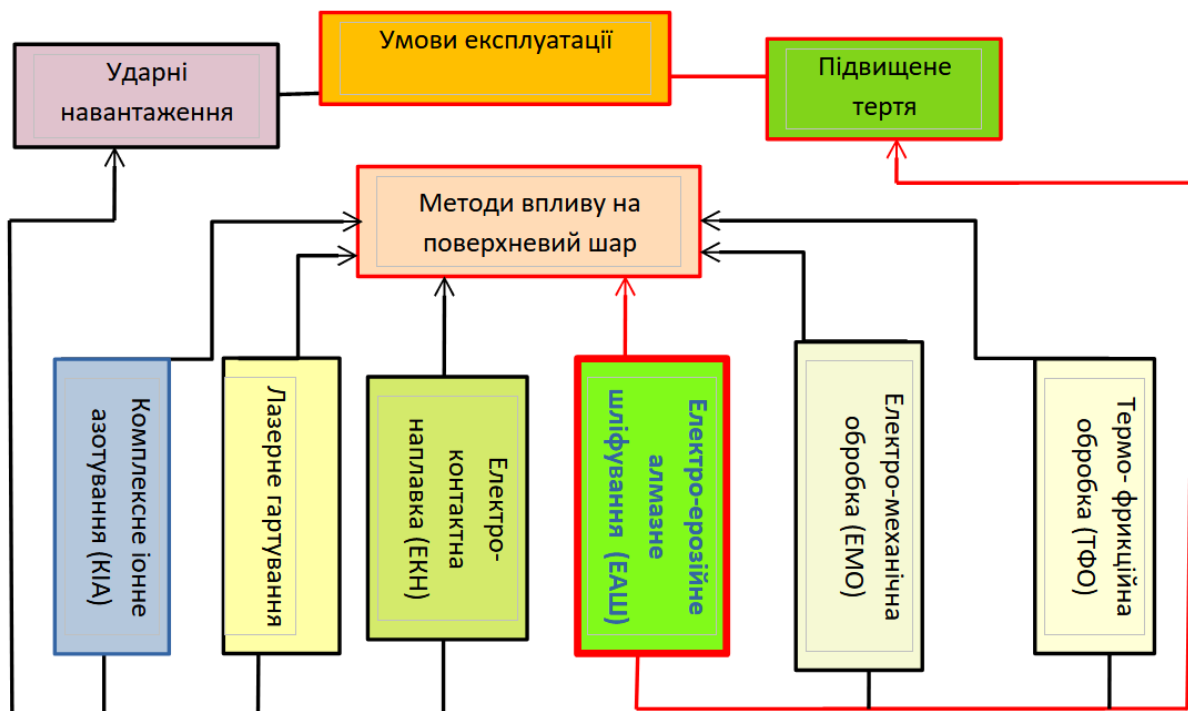


Рис. 1 – Класифікація основних методів поверхневого зміцнення автомобільної та тракторної техніки

Стан поверхневого шару (ПШ) після кожної технологічної операції багато в чому визначається енергетичним впливом на заготовку. Залежно від операції технологічного процесу змінюється енергетичний вплив, природно змінюється і стан ПШ. Керуючи енергетичним впливом можна формувати відповідні властивості ПШ. З урахуванням цього необхідно підходити до проектування техпроцесу:

- з одного боку, забезпечуються експлуатаційні властивості ПШ.
- з іншого боку, слід мінімізувати витрати енергії (в умовах енергетичної кризи).

Енергетичні витрати під час механічного оброблення під час технологічної операції можуть бути виражені через критерії подібності, що характеризують конвективне і молекулярне перенесення теплоти, співвідношенням сил в'язкого тертя, інерції та подібні тимчасові моменти, що забезпечуються власним масштабом часу [4].

Зміна стану ПШ відбувається в результаті внесення в нього енергії, необхідної для видалення матеріалу в процесі обробки (наприклад, зубошліфування) [5].

Відомі дослідження [6-8], що розглядають пріоритетну мету під час механічної обробки – електрозбереження, яке може бути досягнуто шляхом застосування тієї чи іншої схеми обробки.

Слід сказати про протиріччя, що виникає:

- з одного боку слід дотримуватися енергоекономії;

- з іншого боку, якісний зміцнений шар поверхневий шар можливий за умови забезпечення високого рівня енергії.

Завдання забезпечення якості ПШ (ліквідація дефектів шліфування) повинне вирішуватися не тільки на фінішній операції, а й на всіх етапах технологічного процесу виготовлення деталей, від яких залежить формування структури прилеглих до шліфованої поверхні шарів [9-12].

Формування ПШ залежить від температурного і силового чинника та характеру їх зміни на етапах технологічного процесу. Розглянемо технологічний маршрут обробки валу з побудовою діаграм температурного (рис. 2, а) і силового впливу (рис. 2, б) з урахуванням тимчасового чинника.

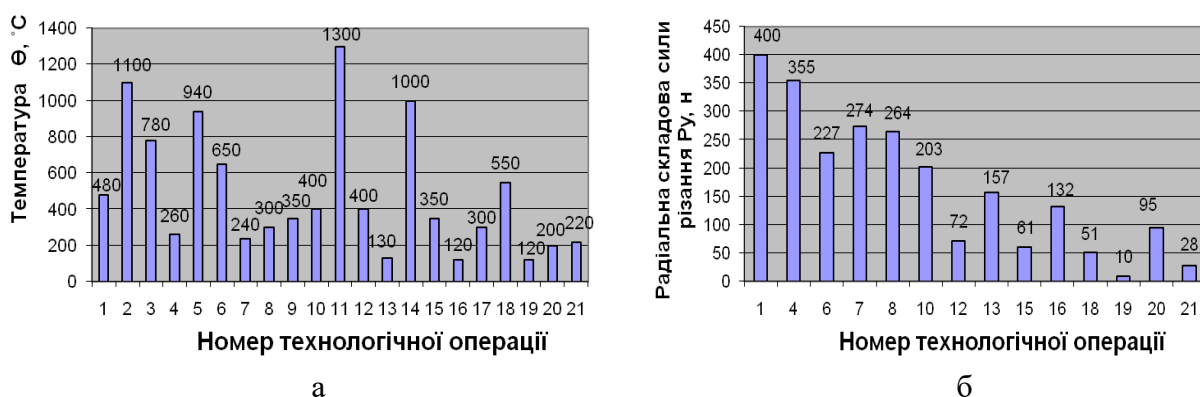


Рис. 2 – Діаграма зміни температури впливу та радіальної складової сили різання, що діє на заготовку протягом технологічного процесу
а – температурний вплив; б – силовий вплив

У результаті енергетичного впливу певного рівня в ПШ зможуть виникати «білі шари», що визначають експлуатаційні характеристики (зносоустійкості) робочої поверхні деталі. Запропоновано оцінювати умови виникнення «білих шарів» комплексним енергетичним коефіцієнтом: на основі досліджень енергетичного коефіцієнту для імпульсних зміцнювальних технологій Ю.І. Бабія [13] для шліфування, отримано формули енергетичного коефіцієнту, який обумовлює виникнення БШ при електро-ерозійному алмазному (1) і абразивному (2) шліфуванні:

$$K_e = K_{EАШ} \cdot \left(\frac{a}{\pi} \right)^{0,5} \cdot \frac{t^{0,5} \cdot V_{np}^{1,6} \cdot V_z^{1,09} \cdot (D_k + d_z)}{D_k \cdot d_z \cdot H_k \cdot \lambda \cdot M}; \quad (1)$$

$$K_e = K_a \cdot \left(\frac{a}{\pi} \right)^{0,5} \cdot \frac{\sigma_m^{0,645} \cdot H^{0,301} \cdot V_{non}^{1,503} \cdot (D_k + d_z)}{z_z^{0,085} \cdot V_z^{0,595} \cdot S_{np}^{0,073} \cdot t_{np}^{0,096} \cdot H_k^{1,5} \cdot \lambda \cdot M}; \quad (2)$$

де $K_{EАШ}$ та K_a – емпіричні коефіцієнти електро-ерозійного алмазного шліфування (ЕАШ) та алмазного шліфування (АШ); a , λ – коефіцієнти температуро- і теплопровідності матеріалу, що оброблюється; H_k – твердість круга (звуковий індекс кола за приладом «Звук 202»; z_z – номер зернистості шліфувального круга за ГОСТом; σ_m – межа міцності сталі при високих температурах, (кг/мм²); S_{np} і t_{np} – швидкість поздовжнього переміщення алмазу і глибина при

правці, (мм/хв) і (мм); V_3 – швидкість заготовки (м/хв); параметр M залежить від схеми обробки, від співвідношення V_3 – швидкості переміщення теплового джерела (заготовки) і V_{np} – швидкості поздовжнього переміщення круга.

Таким чином, визначена функціональна залежність енергетичного впливу (енергетичного коефіцієнту), який обумовлює виникнення БШ при електро-ерозійному алмазному і абразивному шліфуванні з урахуванням технологічних параметрів обробки та властивостей матеріалу.

Загальні витрати енергії під час виконання технологічного процесу:

$$E_{\text{тн}} = N_1 \cdot t_1 + N_2 \cdot t_2 + \dots + N_i \cdot t_i = \sum_{i=1}^n N_i \cdot t_i. \quad (3)$$

де N_i і t_i – потужність і час, що витрачається на i -ту технологічну операцію.

Оцінка можливості формування зміцненого шару, що отримується при виконанні технологічного процесу з урахуванням енергетичного впливу на заготовку визначається залежністю:

$$E_i = \sum_{i=1}^n N_i \cdot t_i. \quad (4)$$

де N_i і t_i – потужність і час, що витрачається на i -ту операцію технологічного процесу.

Проведено дослідження розподілу вмісту вуглецю за глибиною ПШ заготовок зі сталі У12 (рис. 3). Сталь У12 – найбільш структурно-чутлива в порівнянні з іншими сталями, що досліджувались, сталями 45 та У7. У стані після гартування і низького відпуску і шліфування за режимом ЕАШ №2 (рис. 4), даний режим був обраний на підставі дослідження мікроструктури (рис. 3 а,б), мікротвердості і макронапруг як найбільш сприйнятливий режим для даної сталі.

Структура і властивості ПШ вуглецевих сталей поділяється на три основні зони (рис. 3, а): 1) зона БШ високої твердості, що складається з безструктурного мартенситу; 2) зона темної, відпущеної структури троститу зі зниженою твердістю; 3) зона структури тросто-мартенситу, перехідна зона до структури основного металу. Концентрація вуглецю сталі У12 на глибині 110 мкм і далі, в глибину зразка, відповідає 1,2% вуглецю. Слід зазначити крайню нерівномірність концентрації вуглецю за глибиною ПШ. Глибина БШ шару в цьому зразку 65-70 мкм. ПШ значно перенасичений вуглецем на глибині до 20 мкм (рис. 3 в). Причиною такої високої концентрації є дифузія вуглецю з вуглецевовмісного середовища обробки; у нашому випадку, середовище – це алмазний круг. У результаті, відбувається дифузійне насичення ПШ. Твердість даного зразка на глибині 20 мкм становить 13700 МПа. За глибиною ПШ концентрація вуглецю знижується, а твердість залишається високою: 13700 МПа на глибині 40-65 мкм. Отже, тут діє інший механізм зміцнення. Високі значення твердості пояснюються, подрібненням зерна до «аморфного» стану і повного або часткового розчинення карбідів. На цій ділянці формується структура БШ, звана гарденітом. Другий стрибок підвищення концентрації вуглецю знаходиться під або нижче структури, яку визначено як структуру відпуску: тросто-мартенсит з твердістю 7000-7500 МПа. У цій ділянці спостерігається зменшення розмірів карбідів цементиту і їх кількості.

Ця зона відповідає мінімальному вмісту вуглецю, який є донором для довколишніх ділянок. Дане явище ілюструє другий стрибок значення концентрації до 1,8%, про що свідчать великі карбіди цементиту на мікроструктурі. Розміри карбідів значно більше, ніж у вихідній структурі (серцевині). Отже, коагуляція карбідів відбувається за рахунок дифузії вуглецю з ділянки, що знаходиться вище (ділянка 2). Твердість зони з великими карбідами: 7500-7700 МПа. Далі значення твердості змінюється, поступово наближаючись до початкового значення – 9000 МПа. На графіку вмісту вуглецю концентрація відповідає своєму початковому значенню – 1,2%.

Таким чином, велике підвищення твердості на глибині до 10-15 мкм обумовлено дифузією вуглецю з алмазного круга. Високі значення твердості ПШ на глибині понад 15 мкм

пояснюються іншими механізмами зміцнення, а саме: збільшенням мікрореформації і дисперсності структури, тобто збільшенням недосконалостей кристалічної будови, а також за рахунок дифузії з більш глибоких шарів зразка. Такі висновки можна поширити на всі досліджені сталі, що оброблено методом ЕАШ.

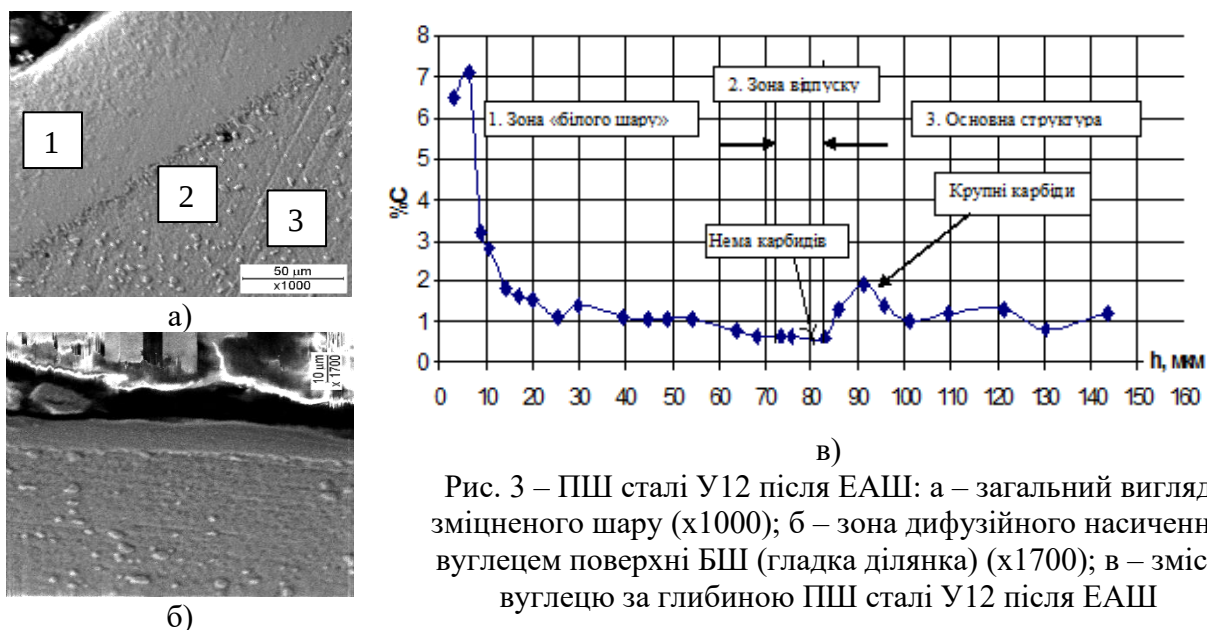
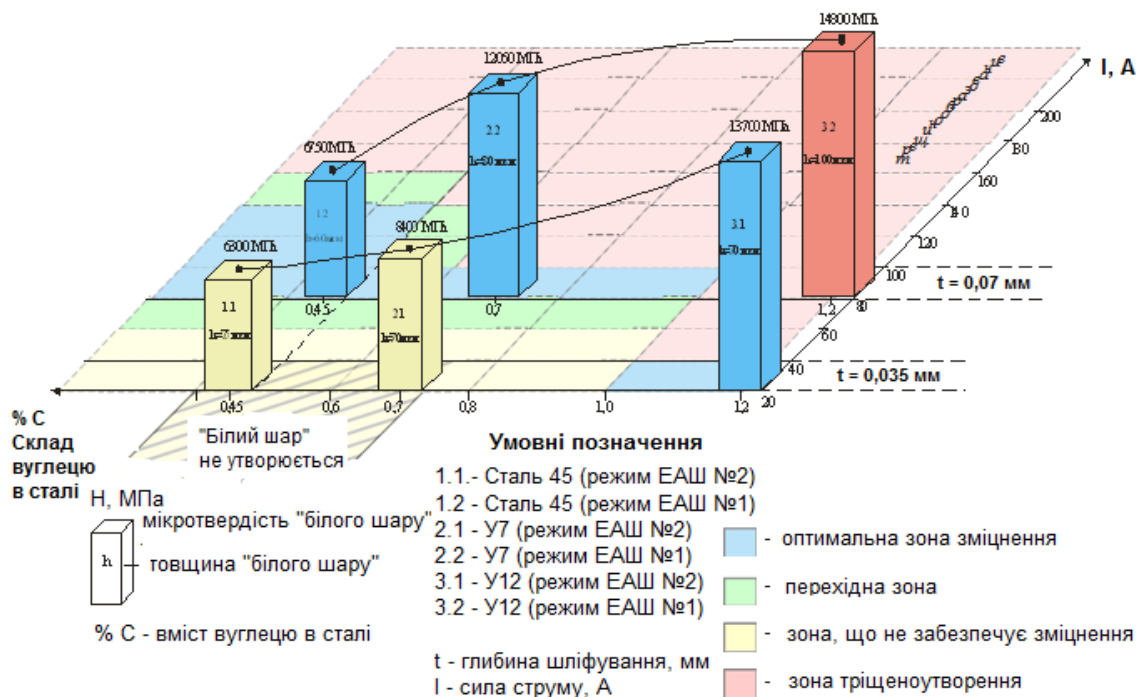


Рис. 3 – ПШ сталі У12 після ЕАШ: а – загальний вигляд зміцненого шару (x1000); б – зона дифузійного насичення вуглецем поверхні БШ (гладка ділянка) (x1700); в – зміст вуглецю за глибиною ПШ сталі У12 після ЕАШ

Проаналізовано технологічні особливості ЕАШ як комбінованого обробно-зміцнювального методу. Важливою технологічною характеристикою імпульсного зміцнення в процесі ЕАШ наступне: глибина шліфування (t , мм), вміст вуглецю близький до евтектоїду за складом є оптимальним для зміцнення. Визначено область практичного застосування деталей, оброблених методом ЕАШ, – це прецизійні деталі, що працюють на тертя, в різних мастильних середовищах без динамічних та ударних навантажень, наприклад, деталі паливної та гідروпневмоапаратури.



Діаметральний зазор в залежності від розміру деталей і призначення прецизійної пари може бути від 2 мкм до 15-30 мкм. На відміну від раптового, некерованого формування вторинних структур при терті (експлуатації) запропонований метод ЕАШ дозволяє в повній мірі забезпечувати характеристики зносостійкості: поверхневу міцність і шорсткість за рахунок цілеспрямованої оптимізації структури і формування шорсткості ПШ.

Для вибору технологічних параметрів обробно-зміцнюючої технології на стадії проектування з урахуванням вмісту вуглецю в сталі, глибини шліфування і сили струму з метою формування заданих характеристик ПШ і оптимізації структури оброблюваних прецизійних деталей в процесі ЕАШ призначено схему (рис. 4).

Для забезпечення заданих характеристик ПШ для сталей, що містять до 1% вуглецю, доцільно застосовувати глибину шліфування: t не менше 0,07 мм, що забезпечує силу струму: $I = 80-100$ А. Для заевтектоїдних сталей понад 1% вуглецю, рекомендовані параметри шліфування: $t = 0,035$ мм, $I = 20-40$ А. Зазначений діапазон параметрів забезпечує не тільки зміцнення за рахунок оптимізації структури, а й оптимальні характеристики твердості, напруженого стану ПШ оброблених прецизійних деталей. Дану технологічну схему і результати дослідження можна використовувати і для зміцнення низьколегованих сталей типу 40Х, 9Х, 65Г та ін.

Висновки. Досліджено процес ЕАШ, який можна використовувати для зміцнення ПШ деталей транспортної та тракторної техніки. Досліджено умови, коли на поверхні заготовки утворюється структура БШ, що уявляє собою безструктурний мартенсит (гарденіт). ЕАШ забезпечує стабільність формування зміцненого зносостійкого шару. Твердість і глибина БШ залежить від вмісту вуглецю в сталях: чим більше вміст вуглецю, тим твердіше шари утворюються. Вміст вуглецю, близький до евтектоїдного складу, (0,65-0,8 %) є оптимальним для ЕАШ - обробки та зміцнення.

Список літератури:

1. Тенденції в розвитку шліфування. В.К. Єрмолаєв, к. т. н., технічний експерт ТОВ «Шліфувальні верстати». <https://ritm-magazine.com/ru/public/tendencii-v-razvitii-shlifovaniya>
2. Кальченко В.В. Підвищення точності та продуктивності обробки плоских поверхонь деталей, що входять до вузлів і агрегатів автомобілів / В. В. Кальченко, В. І. Венжега, Г. В. Пасов // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. - 2023. - Вип. 7(1). - С. 187-195. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znptntu_2023_7%281%29_23
3. <https://www.fortunebusinessinsights.com/>
4. Тимофєєв Ю.В., Степанов М.С., Фадєєв В.А. Застосування -теореми для оцінювання енергетичних параметрів процесу обробки. Різання та інструмент у технологічних системах. Вип. 71, 2006 р., с. 129-132.
5. Степанов М.С., Ключко О.О., Анциферова О.О. Дослідження структурних перетворень та їхній вплив на поверхневий шар під час зубошліфування. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні №40. 2015. С.113-116.
6. Тимофєєв Ю.В., Степанов М.С., Фадєєв В.А. Порівняльний аналіз енергоспоживання під час механічної обробки. Вісник НТУ «ХПІ» №18, 2006 р., с. 121-125.
7. Степанов М.С., Тимофєєв Ю.В., Фадєєв В.А. Порівняльний аналіз енергії різання при використанні різних схем шліфування. Високі технології в машинобудуванні. 36. Наукових праць. №2, 2006, с.108-112.
8. Якимов О.О., Якимов О.О., Дмитрієва С.Ю., Якимов П.О. Причини виникнення шліфувальних тріщин. Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Одеса. 2015. с. 33-37.
9. Gupta K. (Ed.). Materials forming, machining and post processing. Springer, 2020. 268 p.
10. Ружило З. В., Мельник В. І., Новицький А. В. та ін. Надійність машин та обладнання. Частина 2. Ремонтвання машин та відновлення деталей : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2023. 309 с.
11. Долгов О. М., Колосов Д. Л. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навч. посіб. ; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 70 с.
12. Холявко В. В., Владимирський І. А. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка, 2023. 272 с.
13. Бабій Ю.І. Фізичні основи імпульсного зміцнення сталі та чавуну / Ю.І. Бабій. К: Наукова думка. 1988. 237 с.

References (transliterated):

1. Tendentsii v rozvytku shlifuvannia. V.K. Yermolaiev, k. t. n., tekhnichniy ekspert TOV «Shlifovalni verstaty». <https://ritm-magazine.com/ru/public/tendencii-v-razvitii-shlifovaniya>
2. Kalchenko V.V. Pidvyshchennia tochnosti ta produktyvnosti obrobky ploskykh poverkhon detalei, shcho vkhodiat do vuzliv i ahrehativ avtomobiliv / V. V. Kalchenko, V. I. Venzheha, H. V. Pasov //Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. - 2023. - Vyp. 7(1). - S. 187-195. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2023_7%281%29__23
3. <https://www.fortunebusinessinsights.com/>
4. Tymofieiev Yu.V., Stepanov M.S., Fadieiev V.A. Zastosuvannia -teoremy dlia otsiniuvannia enerhetychnykh parametriv protsesu obrobky. Rizannia ta instrument u tekhnolohichnykh systemakh. Vyp. 71, 2006 r., s. 129-132.
5. Stepanov M.S., Klochko O.O., Antsyferova O.O. Doslidzhennia strukturnykh peretvoren ta yikhniy vplyv na poverkhnevyy shar pid chas zuboshlifuvannia. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seria: Tekhnolohii v mashynobuduvanni №40. 2015. S.113-116.
6. Tymofieiev Yu.V., Stepanov M.S., Fadieiev V.A. Porivnialnyi analiz enerhospozhyvannia pid chas mekhanichnoi obrobky. Visnyk NTU «KhPI» №18, 2006 r., s. 121-125.
7. Stepanov M.S., Tymofieiev Yu.V., Fadieiev V.A. Porivnialnyi analiz enerhii rizannia pry vykorystanni riznykh skhem shlifuvannia. Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni. Zb. Naukovykh prats. №2, 2006, s.108-112.
8. Iakymov O.O., Yakymov O.O., Dmytriieva S.Iu., Yakymov P.O. Prychyny vynyknennia shlifovalnykh trishchyn. Suchasni systemy tekhnolohii u mashynobuduvanni. Odesa. 2015. s. 33-37.
9. Gupta K. (Ed.). Materials forming, machining and post processing. Springer, 2020. 268 p.
10. Ruzhylo Z. V., Melnyk V. I., Novytskyi A. V. ta in. Nadiinist mashyn ta obladnannia. Chastyna 2. Remontuvannia mashyn ta vidnovlennia detalei : navchalnyi posibnyk. Kyiv : NUBiP Ukrainy, 2023. 309 s.
11. Dolhov O. M., Kolosov D. L. Mekhanichni vlastyvosti ta konstruktsiina mitsnist materialiv : navch. posib. ; Min-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. tekhn. un-t «Dniprovska politekhnika». Dnipro : NTU «Dniprovska politekhnika», 2022. 70 s.
12. Kholiavko V. V., Vladymyrskyi I. A. Mekhanichni vlastyvosti ta konstruktsiina mitsnist materialiv : pidruchnyk. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politekhnika, 2023. 272 s.
13. Babii Yu.I. Fizychni osnovy impulsnoho zmitsnennia stali ta chavunu / Yu.I. Babii. K: Naukova dumka. 1988. 237 s.

Надійшла (received): 15.05.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Степанов Михайло Сергійович (Mykhaylo Stepanov) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальні верстати, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1297-5537>; e-mail: Mykhaylo.Stepanov@khp.edu.ua

Ребров Олексій Юрійович (Oleksii Rebrov) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: Oleksii.Rebrov@khp.edu.ua

Шевченко Світлана Михайлівна (Svitlana Shevchenko) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри матеріалознавства, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2315-7003>; e-mail: Svitlana.Shevchenko@khp.edu.ua

Реброва Олена Михайлівна (Olena Rebrova) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри матеріалознавства, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9379-3393>; e-mail: Olena.Rebrova@khp.edu.ua

Погрібний Микола Андрійович (Mykola Pogribnyi) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри матеріалознавства, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1689-3830>; e-mail: Mykola.Pogribnyi@khp.edu.ua