

## ПІДВИЩЕННЯ ПІСЛЯРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ БОЛТІВ КРІПЛЕННЯ КОЛІС ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

Дощечкіна І. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Розв'язано питання оптимізації параметрів вібродугового наплавлення для компенсації зношування, а також забезпечення якісного зносостійкого поверхневого шару. Використано модифікування наплавленої поверхні низькоенергетичним іонним бомбардуванням, що збільшило показники статичної міцності, циклічної довговічності та підвищило післяремонтний експлуатаційний ресурс болтів кріплення коліс транспортних засобів.*

***Ключові слова:** зношування, вібродугове наплавлення, іонне бомбардування, шорсткість поверхні, циклічна довговічність механічні властивості.*

### Вступ

Воєнний стан у нашій країні та значне скорочення виробництва нових транспортних засобів загострило проблему збільшення їх експлуатаційного ресурсу за допомогою ремонту. Поліпшення якості та підвищення працездатності деталей транспортних машин передбачає насамперед боротьбу зі зношуванням, бо відповідно до статистичної інформації здебільшого (від 75 до 90 %) причиною передчасної відмови машини є суттєве зношування деталей. Значна кількість деталей основних конструктивних вузлів транспортних засобів піддається дії циклічних навантажень і працює в умовах втоми, то цілком доцільно приділяти увагу також питанню підвищення втомної міцності виробів – ще одному з основних критеріїв довговічності. З огляду на значний дефіцит та високу вартість запасних частин доцільним та економічно вигідним розв'язанням цих проблем є відновлення та зміцнення поверхневих шарів виробів під час ремонту. Розроблення ефективних технологічних процесів відновлення деталей з одночасним збільшенням експлуатаційної надійності за найменших витрат є, безумовно, нагальним питанням.

### Аналіз публікацій

До деталей, що здебільшого передчасно виходять з ладу і потребують ремонту з використанням раціональних способів відновлення, належать болти кріплення коліс автобусів (досить поширеного транспортного засобу), що експлуатуються в дуже тяжких умовах інтенсивного руху по пересіченій місцевості з частим різким гальмуванням під дією агресивного середовища (вологості повітря та снігового покриву) в різні періоди року.

У процесі експлуатації болтів зазвичай відбувається значне зношування їх шліцьової частини в умовах комплексних впливів експлуатаційних факторів. Більш доцільним (як з технічного, так і економічного погляду) способом компенсації зношених поверхонь є вібродугове (електроімпульсне) наплавлення у рідкому середовищі [1–3], коли до місця горіння дуги одночасно подається охолоджувальна рідина. Низька напруга, переривчастий характер дуги, наявність охолодження забезпечують незначну глибину прогрівання і не змінюють структури та властивості металу, що є надзвичайно важливим у відновленні термічно оброблених болтів.

Вібродугове наплавлення є високоефективним процесом, адже вартість ремонту не перевищує 25 % вартості нової деталі та вдвічі-втричі нижча за вартість інших способів автоматичного електродугового наплавлення. Однак цей вид наплавлення має недоліки, зокрема: зниження до 40 % втомної міцності відновлених деталей, неоднорідність мікроструктури й нерівномірна твердість наплавленого шару; утворення пор унаслідок високої швидкості затвердіння розплавленого металу [1–3].

Для покращення якості наплавлення та підвищення втомної міцності болтів варто застосувати сучасний метод модифікування поверхні – низькоенергетичне іонне бомбардування (ІБ). Прикладом позитивного практичного впровадження ІБ є підвищення конструкційної міцності [4], що проілюстровано на прикладі шатунних болтів двигуна, виготовлених зі сталі 40ХН. У роботі [5] також переконливо доведено збільшення циклічної довговічності під впливом ІБ.

Ремонтні роботи потребують значних фінансових і трудових витрат, і в цьому разі не

завжди задовольняються технічні вимоги до післяремонтного ресурсу, тому підвищення довговічності деталей після ремонту за умови якнайменших витрат є актуальним питанням, що дасть змогу запобігти черговій можливій передчасній відмові в експлуатації

### Мета й постановка завдання

Мета роботи – відновлення та підвищення післяремонтного ресурсу болтів кріплення дисків задніх коліс автобуса.

Для реалізації окресленої мети поставлено такі завдання: визначити оптимальні параметри режиму електроімпульсного вібродугового наплавлення; проаналізувати якість поверхневого шару після відновлення; дослідити вплив ІБ на структуру поверхні та властивості болтів загалом.

### Матеріал і методи дослідження

Вивченню підлягали серійні болти кріплення дисків задніх коліс автобуса зі сталі 40Х, які після термічного оброблення за заводською технологією (гартування та відпуск за 500–550 °С) мали неоднорідну троститно-бейнітну структуру з твердістю 35–37 HRC. Для наплавлення обрано електродний дріт Нп-30ХГСА діаметром 1,2 мм. Як захисний газ використовувалася харчова вуглекислота, а як прискорювальний охолоджувач – 5 % розчин кальценованої соди у воді. Поверхню ІБ обробляли низькоенергетичними (до 3кВ) іонами титану в середовищі аргону на установці «Булат-3т». Час бомбардування становив 30 с.

Для рівномірного оброблення болти обертали навколо осі. Шорсткість і профіль поверхні оцінювали за допомогою профілометра-профілографа TR200. Мікроструктуру вивчали на оптичному металографічному мікроскопі *UIT MicroMet -I-102 BD*, а за умови значних збільшень – на електронному мікроскопі РЕМ-106. Границю міцності шліцьової частини болта визначали з використанням спеціальних зразків на універсальній машині ЦД10 (виробництва Німеччини). Циклічні випробування наплавлених зразків здійснювалися за схемою «розтяг у процесі обертання консольно-навантаженого зразка» на машині УМП-02.

### Результати дослідження

Для оцінювання теплового режиму процесу наплавлення з використанням різних охолоджувачів виміряно температури в центральній частині болтів, що наплавляються (рис. 1).

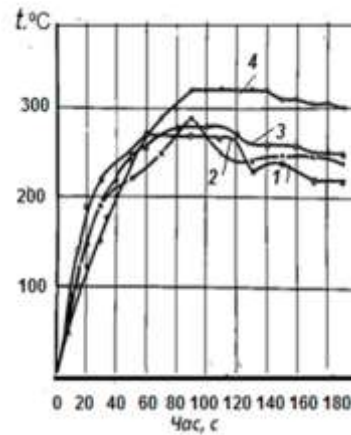


Рис. 1. Залежність температури нагріву серцевини болта від часу наплавлення: 1 – наплавлення на повітрі; 2 – з охолоджувальною рідиною; 3 – у середовищі CO<sub>2</sub>; 4 – у середовищі CO<sub>2</sub> + охолодження рідиною

З графіка видно, що внутрішні шари деталі в 1–3 варіантах наплавлення прогріваються до температури нижчій ніж 270 °С, що не вплине на структуру й властивості серцевини болта, які сформувалися в процесі заводського термічного оброблення. Твердість серцевини після наплавлення зберігається в межах 33–35 HRC; твердість наплавленого шару також близька до цих показників – від 35 до 37 HRC, що сприяє зменшенню ймовірності утворення тріщин у наплавленій деталі та забезпечує задовільну оброблюваність різанням.

Дослідження мікроструктури свідчать, що наплавлення як у повітрі (рис. 2, а), так і в середовищі вуглекислого газу (рис. 2, б) забезпечує гарне сплавлення наплавленого матеріалу з основою. Тріщини та непровари відсутні. Використання примусового охолодження в процесі наплавлення не впливає на якість сплавлення (рис. 2, в). Метал у зоні термічного впливу, тобто переходу від наплавленого металу до основного, у всіх варіантах наплавлення щільний, без утворення прошарків, що свідчить про відсутність перерозподілу елементів на межі розділу.

Мікроструктура наплавленого шару за умови наплавлення на повітрі є бейнітною основою з надлишковим феритом, що розташований уздовж границь зерна. У разі наплавлення в середовищі CO<sub>2</sub> наплавлений шар має аналогічну структуру. Використання примусового охолодження приводить до утворення мартенситної структури та збереження надлишкового фериту (рис. 2, б), що може бути пов'язано або з ліквідаційними

явищами в наплавленому шарі, або з недостатньою швидкістю охолодження в міжкритичному інтервалі.

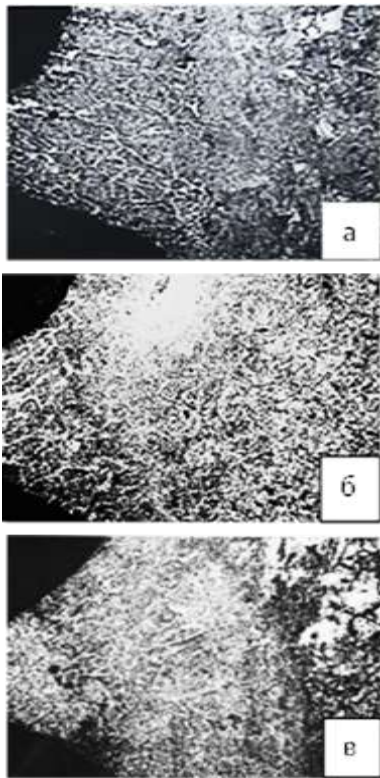


Рис. 2 Структура відновленого болта: а – наплавлення на повітрі; б – у середовищі  $\text{CO}_2$ ; в – у  $\text{CO}_2$  з охолодженням рідиною;  $\times 150$

Зернова структура наплавленого металу досить дисперсна й має певну направленість, що властиво кристалізації за умов спрямованого тепловідведення.

Аналіз розподілу мікротвердості по глибині наплавлення показав, що твердість металу в межах кожної зони (наплавлений метал, зона термічного впливу, основний метал) є досить однорідною, відсутні різкі зміни її значень на межах цих зон.

Описаний характер зміни мікроструктури та твердості перерізу болта свідчить про хорошу якість наплавлення і є першою ознакою достатньої експлуатаційної надійності відновлених деталей.

Для оцінювання якості наплавлення та збільшення післяремонтної довговічності проводилися механічні випробування з метою визначення границі міцності на зріз різьбової частини та границі витривалості болта.

Результати наведені в табл. 1.

З аналізу результатів структурних досліджень і проведених механічних випробувань можна констатувати, що найбільш ефективним режимом відновлення болтів є вібродугове наплавлення в повітряній атмосфері. Такий спосіб забезпечує однорідну структуру наплавленого шару й не впливає на властивості серцевини болта.

Після наплавлення поверхнева твердість 34–35 HRC і є на рівні вихідних значень, що дає змогу без будь-якого додаткового термічного впливу проводити механічне оброблення для повернення необхідних геометричних параметрів шліцьовій частині болта, а це підвищує економічність процесу відновлення.

Однак, як видно з табл. 1, границя витривалості відновлених болтів на 20 % нижча, ніж у серійних деталей, що зменшує їх циклічну довговічність – одну з основних експлуатаційних властивостей, яка зумовлює ресурс унаслідок циклічних навантажень.

Для підвищення циклічної довговічності після механічного оброблення поверхню болтів піддавали низькоенергетичному ІБ. Після зменшення шорсткості, модифікування тонкого поверхневого шару ІБ фіксується дендритна структура, зерна рівновісні, однорідні й подрібнені до нанорозмірної величини – від 500 до 600 нм.

Такі мікроструктурні зміни сприяли суттєвому підвищенню рівня міцності в процесі розтягання: тимчасовий  $\sigma_B$  збільшився з 960 до 1180 МПа, границя текучості  $\sigma_{0,2}$  зросла з 750 до 890 МПа, пластичність залишилася майже незмінною ( $\delta = 10\%$ ).

Твердість поверхневого шару також збільшилася до 48–50 HRC.

Таблиця 1 – Твердість і механічні властивості відновлених болтів

№ з/п	Спосіб наплавлення	Твердість, HRC		Границя міцності на зріз, МПа	Границя витривалості, МПа
		серцевини	поверхні		
1	серійний болт	33–36	33–35	347	155
2	на повітрі	34–35	34–36	348	125
3	на повітрі з охолодженням	33–36	43–47	392	142
4	у $\text{CO}_2$	33–37	37–39	360	-
5	у $\text{CO}_2$ з охолодженням	33–36	45–48	378	-

Крім того, у місцях поверхневих дефектів (западини, пори, мікротріщини) зафіксовані окремі краплі титану, що «заліковують» їх і зменшують кількість концентраторів напружень. Незважаючи на наявність краплинної фази титану та розвинену субструктуру, шорсткість поверхні після ІБ суттєво зменшується – від 1,530 до 0,548 мкм, що свідчить про незначну глибину рельєфу поверхні.

«Заліковування» поверхневих дефектів, суттєве подрібнення (до нанорозмірного) зерна в поверхневому шарі не могли не позначитися на довговічності виробів.

Результати випробувань на циклічну довговічність подані в табл. 2. Як видно з таблиці, за однакового напруження 320 МПа зразок без ІБ зруйнувався після 3315 циклів випробувань, а після ІБ витримав 650 тис. циклів без руйнування. Збільшення напруження до 380 МПа призвело до руйнування, але водночас довговічність зросла удвічі порівняно із зразком без ІБ. Результати дають змогу зробити висновок про ефективність поверхневого модифікування ІБ (без імплантації іонів титану й формування покриття, тобто без зміни хімічного складу) з метою підвищення циклічної довговічності болтів.

Таблиця 2 – Вплив ІБ на циклічну довговічність

Стан поверхні	Напруження, МПа	Кількість циклів до руйнування	Результат випробування
до ІБ	320	331500	зруйнувався
після ІБ	320	660000	не зруйнувався

### Висновки

1. Відпрацьований режим вібродугового наплавлення забезпечує твердість поверхні для можливості подальшого механічного оброблення без додаткового термічного знеміцнення, що підвищує економічність процесу компенсації зношеного поверхневого шару.

3. Границя міцності на зріз відновлених болтів відповідає значенням у вихідному стані. Однак границя витривалості знижується майже на 20 %.

4. Модифікування ІБ наплавленого поверхневого шару дало змогу вдвічі збільшити циклічну довговічність, суттєво підвищити статичну міцність без втрати пластичності та збільшити твердість.

5. Серцевина болтів не зазнала структурних перетворень унаслідок вібродугового

наплавлення та подальшого поверхневого ІБ, її властивості залишилися на початковому рівні. Збільшення ресурсу досягнуто внаслідок зміни стану поверхні та поведінки виробу під навантаженням.

### Література

1. Захарчук О. В. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів: навч. посіб. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. 140 с.
2. Основи технології виробництва ремонту автомобілів: навч. посіб. / І. Б. Гевко та ін. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 544 с.
3. Перемітько В. В. Конспект лекцій з дисципліни «Інноваційні процеси у зварюванні та споріднених технологіях». Кам'янське: ДДТУ, 2018. 133 с.
4. Пономаренко І. В. Підвищення конструктивної міцності шатунних болтів іонним бомбардуванням. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. Запоріжжя, 2013. № 2. С. 108–110.
5. Дошечкіна І. В., Семенчук В. Р., Лалазарова Н. О. Якість машин закладена в способі обробки поверхні деталі. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Фізика сучасності»*. Харків: ХНАДУ, 2019. С. 35–36.
6. Doshchekina I. V., Lalazarova N. O., Tatarkina I. S. The effect of substructured surface layer on deformation behavior of products and change of their on-load properties. *Матеріали III міжнародної конференції «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід»*. Нідерланди, 2019. С. 211–215.

### References

1. Zakharchuk O. V. Osnovy tekhnolohiyi vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv: navch. posib. Luts'k: RVV Luts'koho NTU, 2017. 140 s.
2. Osnovy tekhnolohiyi vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv: navch. posib. / Hevko I. B ta in. Ternopil': TNTU imeni Ivana Pulyuya, 2021. 544 s.
3. Peremit'ko V. V. Konspekt lektsiy z dystsypliny «Innovatsiyini protsesy u zvaryuvanni ta sporidnenykh tekhnolohiyakh». Kam'yans'ke: DDTU, 2018. 133 s.
4. Ponomarenko I. V. Pidvyshchennya konstruktivnoyi mitsnosti shatunnykh boltiv ionnym bombarduvanniam. *Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni*. Zaporizhzhya, 2013. № 2. S. 108–110.
5. Doshchekina I. V., Semenchuk V. R., Lalazarova N. O. Yakist' mashyn zakladena v sposobi obrobky poverkhni detali. *Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Fizyka suchasnosti»*. Kharkiv: KHNADU, 2019. S. 35–36.
6. Doshchekina I. V., Lalazarova N. O., Tatarkina I. S. The effect of substructured surface layer

on deformation behavior of products and change of their on-load properties. *Materialy III mizhnarodnoyi konferentsiyi «Innovatsiyini tekhnolohiyi v nautsi ta osviti. Yevropeys'kyu dosvid»*. Niderlandy, 2019. S. 211–215.

**Дошечкіна Ірина Василівна**, к. т. н., проф. кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 095-16-28-250, e-mail: divkhadi@ukr.net. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### **Increasing the post-repair resource of the wheels attachment bolts of transport machinery**

**Abstract. Problem.** *The state of war in our country and a significant reduction in the production of new vehicles exacerbated the problem of increasing their operational resource due to repairs. Improving the quality and increasing the efficiency of transport vehicles involves, first of all, the fight against wear and tear, because the reason for their premature failure (from 75 to 90%) is significant wear and tear of parts. A significant number of parts of the main structural units of vehicles are exposed to cyclic loads, so it is quite reasonable to pay attention to the issue of increasing the fatigue strength of products. Considering the significant shortage and high cost of spare parts, an expedient and economically beneficial solution to these problems is the restoration and strengthening of the surface layers of products during repair. The parts that mostly fail prematurely and require repair using rational methods of recovery include the bolts of fastening the wheels of buses - a very common vehicle that is intensively operated in very difficult conditions. The development of effective technological processes for the restoration of bolts with a simultaneous increase in the post-repair resource at the lowest costs is definitely an urgent issue, because it will prevent another possible premature failure in operation.* **Goal.** *The purpose of the work is to restore and increase the post-repair resource of the bolts for fastening the disks of the rear wheels of the bus.* **Methodology.** *The subject of the study were the serial bolts for fastening the discs of the rear wheels of the bus made of 40X steel after quenching and tempering at 500-550° C with a trostite-bainite structure and a hardness of 35-37 HPC.*

*For vibro-arc surfacing, electrode wire Hn-30XTCA with a diameter of 1.2 mm was used. Food carbon dioxide was used as a protective gas, and a 5% solution of soda ash in water was used as an accelerating coolant. After surfacing, the surface was subjected to bombardment with low-energy (up to 3 keV) titanium ions in an argon environment at the Bulat - 3t installation. After the specified methods of bolt processing, the roughness and surface profile were evaluated, the microstructure was studied, and the mechanical properties were determined. The strength limit of the slotted part of the bolt was determined using special samples on the CD10 universal machine (made in Germany). Cyclic tests of welded samples were carried out according to the scheme "tension during rotation of the cantilever-loaded sample" on the UMP-02 machine. Tensile tests were performed according to standard methods. **Originality.** To increase the cyclic durability and wear resistance of bolts, a modern method of surface modification was used - ion bombardment with low-energy ions (without coating), which made it possible to strengthen the surface layer without losing plasticity. An increase in the resource was achieved due to a change in the state of the surface (obtaining ultra-fine crystalline nano-sized grain, healing of surface stress concentrators), and a change in the mechanism of plastic deformation - from dislocation to rotational with grain-boundary sliding of ultra-fine grains. **Practical value.** The recommended mode of vibro-arc surfacing provides surface hardness for the possibility of further mechanical processing without additional thermal weakening, which increases the cost-effectiveness of the process of compensation of the worn surface layer. Modification of the surface by ion brombarbing after surfacing made it possible to increase the cyclic durability by 2 times, significantly increase the static strength without loss of plasticity, and increase the hardness to ensure wear resistance.*

**Keywords:** *energy-saving technologies, road panels, smart roads, road marking, alternative sources of electricity.*

**Doshchekina Irina**, Ph.D., professor of the Department of Metal Technology and Materials Science, ORCID: 0000-0002-6278-7780 divkhadi@ukr.net.