

В. Д. ШЕЛЯГІН, В. Ю. ХАСКІН, О. Т. НІКУЛІН, А. В. БЕРНАЦЬКИЙ,
О. В. СІОРА (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ)

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ЛАЗЕРНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ КОЛІСНИХ ПАР ВАГОНІВ

Досліджено можливість застосування процесів лазерної поверхневої обробки для відновлення й збільшення довговічності колісних пар залізничних вагонів. Визначено вплив критичних параметрів процесу на глибину зони лазерного впливу і їхній взаємозв'язок з отриманою структурою й твердістю.

Исследована возможность применения процессов лазерной поверхностной обработки для восстановления и увеличения долговечности колесных пар железнодорожных вагонов. Определено влияние критических параметров процесса на глубину зоны лазерного влияния и их взаимосвязь с полученной структурой и твердостью.

Possibility of application of processes of laser superficial processing for restoration and increase of a resource of operation of shafts and rims of wheels of railway cars is investigated. The influence of critical parameters of process on depth of a zone of laser influence and their interrelation with the structure obtained and hardness is determined.

Протягом останнього часу проблема підвищення довговічності деталей і вузлів залізничного транспорту, які швидко зношуються, вирішувалася шляхом підвищення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів за рахунок оптимального вибору матеріалів пар тертя, використання процесів термічної та хіміко-термічної обробок, гальванічних і іонно-плазмових покриттів, зміцнення робочих поверхонь обкаткою, струмами високої частоти тощо. Однак, зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів традиційними методами не завжди забезпечують оптимальне поєднання характеристик міцності, трибології та інших, які істотно збільшують довговічність деталей виробів.

У процесі експлуатації рухомого складу деталі залізничного транспорту змінюються внаслідок зношування або появи різного роду несправностей. У результаті виникає необхідність застосування технологій діагностики й ремонту. Так, наприклад, актуальним є завдання відновлення й ремонту ходової частини залізничних вагонів [1, 2].

Одним з вузлів ходової частини вагона, що працює в найбільш важких умовах, є колісна пара. Її вісь постійно відчуває вплив значних статичних і динамічних навантажень. Крім того, на неї діють додаткові напруги стискання в місцях пресових з'єднань із колесами та удари від рейок за наявності дефектів на поверхні кочення коліс і на стиках. На працездатність осі впливають різні технологічні порушення при її

виготовленні й обробці. Сполучення низки цих факторів сприяє виникненню в осі місцевих напружень, які разом з явищами втоми призводять до утворення тріщин. Глибина дефектного шару на шийках осей становить порядку 0,1...0,3 мм на діаметр.

При відновленні шийок осей їх необхідно попередньо механічно обробити (проточити) у розмір, менший номінального на 0,4...0,5 мм на діаметр, потім наплавити з урахуванням припуску під фінішну механічну обробку й, остаточно, прошліфувати у номінальний розмір. При цьому такі дефекти наплавленого шару, як тріщини, раковини й пори, неприпустимі. Твердість наплавленого шару повинна становити HRC 30...35.

Традиційно деталі вагонів відновлювали дуговими або газополум'яними способами зварювання (ручним дуговим, автоматичним і напів-автоматичним під шаром флюсу й у середовищі захисних газів) й наплавлення (плазмово-дуговим, газовим тощо) [3]. До недоліків цих способів варто віднести великий (понад 1 мм) припуск на чистову механічну обробку й значний розігрів відновлювальної деталі, що може негативно позначитися на її геометрії після остигання. Крім того, матеріал осі колісної пари (Сталь 60) є важкозварним і не рекомендується для дугових способів зварювання й наплавлення [4]. Тому, на наш погляд, доцільно для відновлення шийок осей вагонів застосувати лазерне наплавлення неперервним випромінюван-

ням CO₂-лазеру, що дозволяє усунути зазначені недоліки.

До переваг лазерного наплавлення належать: забезпечення високої металургійної якості наплавленого шару, дрібної дисперсності структури і мінімальної зони термічного впливу (ЗТВ); мінімізація ефекту перерозподілу компонентів з матеріалу основи в наплавлений шар; можливість управління фізичними і геометричними параметрами шару, який наплавляють; практична відсутність деформацій і жолоблень деталей після наплавлення тощо.

В промислово розвинених країнах активний розвиток технологій лазерної поверхневої обробки розпочався ще у середині 90-х років й триває до сих пір. В першу чергу, зміни пов'язані з появою лазерного обладнання нового покоління. До нього можна віднести компактні, достатньо потужні CO₂-лазери і технологічні комплекси з комп'ютерним управлінням на їх основі. Окремий інтерес викликають щільні CO₂-лазери, які мають значний потенціал технологічних застосувань завдяки достатньо великій потужності випромінювання, яке вони генерують (до 8 кВт), відсутності прокачного засобу, дуже малим витратам робочих газів (повна заміна робочої суміші – раз на півроку – рік), малим габаритам. Окрім нових моделей CO₂-лазерів з'явилися Nd:YAG-лазери з підвищеним експлуатаційним ресурсом і потужністю, що мають діодну накачку, а також вкрай компактні і достатньо потужні діодні та дискові лазери. Відмітимо також появу принципово нових оптоволоконних лазерів, що дозволяють сполучати високі (до 100 кВт) потужності неперервної генерації випромінювання з особливо тривалим (від 100 тис. до 1 млн мотогодин) ресурсом роботи. Основною рисою лазерів нового покоління є підвищення їх загального ККД. Для CO₂-лазерів він збільшився з 5...10 % до 8...15 %, для Nd:YAG-лазерів – з 1...2 % до 5...8 % і більше, у діодних лазерів він становить до 42...50 %. Підвищення ККД у сполученні зі зниженням собівартості лазерного обладнання, збільшенням його компактності та економічності витрат газів знижують собівартість процесів лазерної обробки, роблять їх більш доступними.

В ІЕЗ ім. Є. О. Патона проводилося відпрацювання технології лазерного наплавлення достатньо широкої номенклатури деталей двигунів та ходової частини залізничного транспорту. В процесі таких досліджень було встановлено, що у зв'язку з особливостями основного металу осей вагонів, у якості присаджувального

матеріалу для лазерного наплавлення шийок рекомендується використовувати порошки сплавів на основі нікелю, що самофлюсуються. Технологія наплавлення таких матеріалів досить докладно описана в [5].

Авторами проводилося відпрацювання технології лазерного наплавлення шийок вагонних осей на зразках-імітаторах, виконаних зі сталі 60, із присадкою порошків ПГ-СР2 і ПГ-12Н-01, що дають твердість порядку HRC 40 [6]. В якості джерела лазерного випромінювання використовували CO₂-лазер ЛТ-104 (довжина хвилі випромінювання $\lambda = 10,6$ мкм). У результаті були обрані наступні параметри режиму: потужність випромінювання 3,2...3,5 кВт; швидкість наплавлення 64...72 м/год; діаметр плями фокусування випромінювання 2,5...3,0 мм; масові витрати порошку для наплавлення 0,2...0,25 г/с. В експериментах застосовували лінзи з монокристалів хлориду калію з фокусною відстанню $F = 300$ мм. Досліди проводилися й з іншими присаджувальними матеріалами (порошки ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-04, ПГ-АН6, ПГ-АН9, ПГ-12Н-02, ПГ-Н1 з грануляцією 40...160 мкм).

Для виявлення структур отриманих наплавлених шарів із зразків вирізали темплети розміром 20×20×20 мм, затискали їх в оправки та виготовляли макро- і мікрошліфи. Останні протравлювали електролітичним способом у 20 %-ому водному розчині сірководневого амонію. Мікроструктури досліджували на мікроскопі «Neophot 32», твердість вимірювали на твердомірі m-400 «Лесо» при навантаженнях 50 г та 10 г.

При вивченні поверхні отриманих зразків було встановлено, що в наплавленому шарі утворюються мікротріщини. Їхня кількість, розмір і періодичність повторення залежать від багатьох факторів (наприклад, твердості шару, що наплавляється, хімічного складу й грануляції присаджувального порошку, характеру й швидкості відведення тепла). Визначення їхньої кількості, ширини і довжини здійснювалося за допомогою мікроскопа МБС-10. Вдалося установити наступне. Чим вище густина потужності лазерного випромінювання і чим більше прогрів зразка, що наплавляють, тим менша кількість мікротріщин спостерігається. При цьому тріщини простягаються у напрямі, поперечному наплавленим валикам, і мають значну довжину (часто проходять через весь наплавлений шар). Із збільшенням погонної енергії відстань між такими поперечними тріщинами зростає (може досягати 5...10 мм і більш). Ширина трі-

щин може коливатися в межах від 10 до 100 мкм. Зі зниженням густини потужності випромінювання, підвищенням швидкості наплавлення, зниженням погонної енергії, зменшенням сумарного теплового внеску в деталь, яку наплавляють, з'являється сітка тріщин з порівняно дрібним кроком (1...5 мм). Ширина тріщин у випадку такої сітки зазвичай коливається в межах 3...40 мкм. У перехідних варіантах можлива сітка тріщин із більш широкими поперечними тріщинами і вузькими повздовжніми.

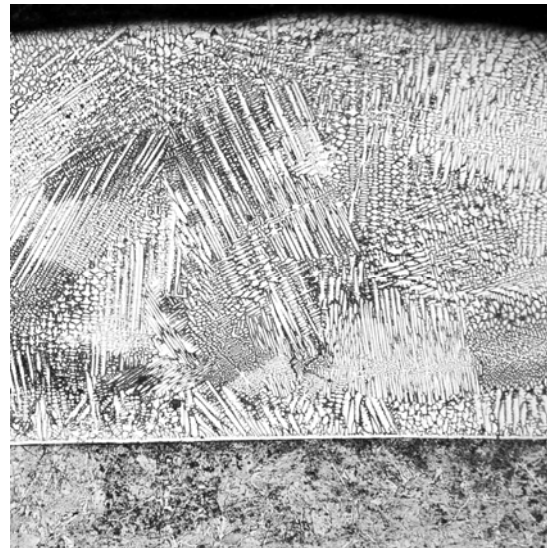
Фрактографічні дослідження поверхонь тріщин на оптичні й растровому електронному мікроскопах дозволили встановити, що поверхня зламу валика аналогічна поверхні руйнування гладкого циліндричного зразка при одноосовому розтягуванні. У поверхні валика є зона зрізу, під нею перебуває радіальна зона, що займає основну частину поверхні тріщини. У радіальній зоні дрібні рубці спрямовані до місця зародження тріщин. Місцями зародження тріщин є рідкі прошарки, застигаючі при більш низькій температурі, ніж основний сплав, а також нерозплавлені пори й частки порошку, яким наплавливали. При великому збільшенні можна розрізнити слабко обкреслені фасетки відколу на місці більше крихкої фази.

Найбільш радикальним і, разом з тим, простим методом усунення тріщиноутворення є попередній підігрів деталі, що наплавляється. Однак, з огляду на більшу масу вагонних осей і порівняно повільне відведення тепла, необхідно сполучення попереднього й супутнього підігріву ділянки деталі, що наплавляється, до температури, що перевищує нижню границю температурного інтервалу крихкості для використовуваного присаджувального матеріалу.

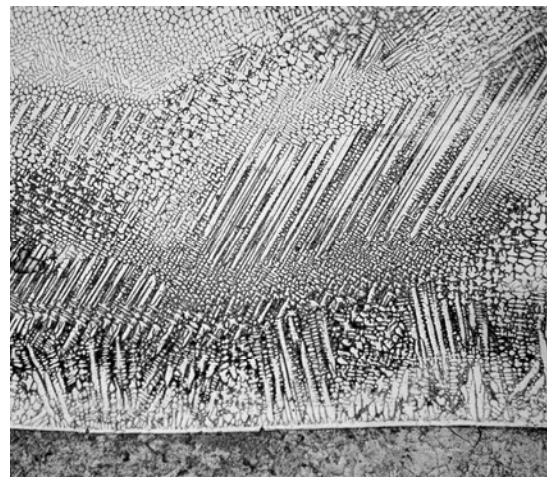
За результатами аналізу мікроструктур наплавлених зразків, вимірів їхньої твердості й мікротвердості, рентгенофазового аналізу можна сказати наступне. При лазерному наплавленні на границі валика з основним металом утворюється тонкий світлий пластичний шар, як видно з рис. 1. Як показують результати рентгеноспектрального аналізу, він являє собою перехідну зону зі структурою неперервного ряду твердих розчинів від залізної до нікелевої основи. Товщина перехідної зони збільшується при зниженні швидкості наплавлення. Під перехідною зоною в основному металі спостерігається зона термічного впливу (ЗТВ).

При лазерному наплавленні сплаву ПГ-12Н-01 за даними рентгенофазового аналізу у наплавлених шарах утворюються дві основні структурні складові: ізольовані коміркові, а

іноді й розгалужені зерна γ -твердого розчину нікелю й евтектика γ -Ni+Ni_n(B,C). Також наплавлений шар має в своєму складі карбід Cr₂₃C₆ з гексагональною ґраткою, борид нікелю Ni₃B з ромбічною ґраткою, борид Ni₄B₃ з орторомбічною ґраткою, евтектику γ -Ni+Ni₅Si₂, утримуючу силіцид Ni₅Si₂ з гексагональною ґраткою. Результати рентгеноструктурного аналізу добре погоджуються з результатами скануючої електронної мікроскопії.



а)



б)

Рис. 1. Фотографії мікроструктур наплавленого лазером шару порошку ПГ-12Н-01 на Сталь 60 при збільшеннях: а)×100; б)×400

Всі структурні складові є дрібнодисперсними. Твердий розчин пересичений легуючими компонентами. Аналіз показує, що процес утворення карбідів і боридів іде через утворення сегрегацій хрому або утворення метастабільних проміжних фаз. Розподіл мілкодисперсних тве-

рдих фаз, що утворилися, є рівномірним. У результаті мікротвердість наплавленого сплаву значно вирівнюється порівняно із традиційними методами наплавлення.

Крім відновлення шийок осей вагонів також актуальним є завдання підвищення експлуатаційного ресурсу поверхонь катання колісних пар, тобто ободів коліс. Однак, такий ефект не повинен супроводжуватися зниженням терміну служби рейок. Наші дослідження показали, що найбільше наближення до необхідного результату дає «острівкове» зміцнення, що створює тверді зносостійкі ділянки металу порівняно м'якій матриці, що демпфірує. Реалізувати таке зміцнення можна лазерною термообробкою (ЛТО) без оплавлення, застосовуваної як фінішна операція.

Ідея запропонованої розробки полягає в застосуванні лазерного випромінювання для створення високошвидкісного термічного циклу локального нагріву-охолодження поверхневих шарів зміцнюваних сталевих виробів із отриманням твердих і зносостійких дрібнокристалічних структур, а також для локального розплавлення цих шарів з метою їхньої модифікації та отримання нових структур із наперед заданими властивостями.

В ІЕЗ ім. Є. О. Патона на зразках-імітаторах була відпрацьована технологія ЛТО сталей без оплавлення. Вона містить у собі: очищення й знежирення зміцнюваної поверхні, нанесення поглинаючого покриття, властиво ЛТО й видалення залишків поглинаючого покриття. Для підвищення ефективності лазерної обробки деталей використовуються різного роду покриття для штучного зниження коефіцієнта відбивання лазерного випромінювання. Як поглинаючі покриття зручніше за все наносити спеціально розроблені водорозчинні полімерні (наприклад, МЦС-510, СГ-504, ФС-1М) [7]. Вони мають високу (порядку 80...90 %) поглинаючу здатність, дешеві, не токсичні, не горять, не виділяють кіптяви при лазерному нагріванні, легко наносяться пневморозпилюванням, фарбуванням пензлем або валиком. У випадку застосування покриття МЦС-510 є прийнятним режим ЛТО з наступними параметрами: потужність випромінювання 3,0...3,2 кВт; ширина доріжки загартування 9 мм; швидкість 60 м/год. Глибина доріжки ЛТО при цьому становила 0,7...0,8 мм, оплавлення на поверхні було відсутнє. Для досягнення ефекту «острівкового» зміцнення на ободі колеса, жолобника й частини реборди варто застосовувати сканування, що надає доріжці зміцнення пилкоподібну форму.

Зміцнені зразки випробовували на зносостійкість методом сухого тертя за схемою «циліндр – штир» на спеціально розробленій машині. Контртіла виготовляли зі Сталі 45 з наступним загартуванням до твердості порядку HRC 55. Питомий тиск установлювали в межах 10...16 МПа, число обертів випробовуваного зразка – у межах 50...1600 хв^{-1} , лінійні швидкості тертя – 1600...54000 м/год. Зношування зразків вимірювали по зміні діаметра мікрометром із ціною розподілу шкали 0,01 мм, а також по зміні маси зважуванням на коромислових вагах МТЗ № 206 з точністю ± 10 мг. Для підвищення точності вимірів збільшували час тертя. Результати випробувань показали, що зміцнені зразки перевищують по зносостійкості зразки, виконані з матеріалу стандартного вагонного колеса, в 2...3 рази.

Висновки

1. Для ведення процесу відновлення шийок вагонних осей можливе використання лазерного наплавлення із застосуванням присаджувальних твердих сплавів на основі нікелю.

2. Експериментально встановлено залежності між технологічними параметрами лазерного випромінювання й розмірами наплавлених шарів. Проведення експериментів на циліндричних зразках показало, що в діапазоні потужності лазерного випромінювання від 1 до 3 кВт оптимальний діаметр плями випромінювання на поверхні, що наплавляють, прямо пропорційний потужності й становить 1 мм на 1 кВт для швидкостей процесу 10...30 мм/с і масових витрат наплавочного порошку 0,1...0,3 г/с. Відповідний діапазон густин потужності випромінювання $W_p = (0,5...5,0) \cdot 10^5$ Вт/см². Час існування ванни розплаву при цьому може варіюватися від 0,03 до 0,3 с.

3. При лазерному наплавленні забезпечується рівномірний розподіл твердих фаз в більш м'якій і пластичній матриці та утворення вузької перехідної зони, яка є визначальною для міцності зчеплення нанесеного шару з основним металом, а також для мінімізації проникнення основного металу у наплавлений та величини ЗТВ у основному металі.

4. Для усунення характерного дефекту лазерного наплавлення – появи мікротріщин, необхідно ведення попереднього й супутнього підігріву ділянки деталі, що наплавляється, до температури, що перевищує нижню границю температурного інтервалу крихкості для використовуваного присаджувального матеріалу.

5. Дослідження показали, що зносостійкість металу, зміцненого лазерним випромінюванням без оплавлення, підвищується щонайменше у 2...3 рази. При цьому для усунення мікротріщин і зниження залишкового напруженого стану зміцнених шарів доцільно перемешати зміцнені ділянки основного металу із необробленими.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Інструкція з формування й змісту колісних пар тягового рухливого состава залізниць колії 1520 мм [Текст] : ЦТ/4351 від 31.12.1985. – М.: Транспорт, 1988. – 87 с.
2. Інструкція по формированию и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм [Текст] : ЦТ/4351 от 31.12.1985. – М.: Транспорт, 1988. – 87 с.
3. Богданов, А. Ф. Эксплуатация и ремонт колесных пар вагонов [Текст] / А. Ф. Богданов, В. Г. Чурсин. – М.: Транспорт, 1985. – 269 с.

4. Марочник сталей и сплавов [Текст] / В. Г. Сорокин и др.; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
5. Величко, О. А. Лазерное упрочнение и наплавка промышленных изделий [Текст] / О. А. Величко // Новые процессы и оборудование для газотермического и вакуумного покрытия: сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; редкол.: К. А. Ющенко (отв. ред.) и др. – К., 1990. – С.17-21.
6. ГОСТ 21448-75. Порошки из сплавов для наплавки [Текст]. – Введ. с 01.01.77 до 01.01.87.
7. Технологические лазеры [Текст] : справочник в 2 т. – Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Г. А. Абильситов и др.; под общ. ред. Г. А. Абильситова. – М.: Машиностроение, 1991. – 432 с.

Надійшла до редколегії 03.06.2009.

Прийнята до друку 18.06.2009.