

Відгук офіційного опонента

на дисертаційну роботу Нікульченка Ігоря Олександровича «Вплив неметалевих включень на структуроутворення та зміцнення поверхневого шару з підвищеними механічними властивостями в сталях при лазерній обробці»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Одним із передових напрямків розвитку сучасного матеріалознавства є створення нових технологій лазерної обробки металів, що забезпечують підвищення їх експлуатаційних характеристик. Особливу увагу спеціалістів привертає можливість локального нагріву поверхні виробу до температур плавлення або випаровування. А відтак, з'являється ефективний спосіб управління структурою та властивостями поверхневих шарів, що відрізняється точністю, простотою, продуктивністю та екологічністю. Завдяки такій обробці тонкий поверхневий шар матеріалу нагрівається до температур фазових перетворень, після чого охолоджується з надвисокою швидкістю. За рахунок цього підвищуються зносостійкість та твердість виробу без виникнення в ньому значних механічних напружень, притаманних звичайним способам обробки. Крім того, застосування лазерної обробки дозволяє вирішити проблему негативного впливу неметалевих включень у структурі на властивості сталей. Означена задача потребує комплексного дослідження закономірностей процесів контактної взаємодії неметалевих включень з металевою матрицею під час лазерної обробки. Враховуючи важливість зменшення розмірів неметалевих включень та забрудненості ними сталей для виготовлення залізничних коліс, дослідження, виконані в дисертаційній роботі І.О.Нікульченка, спрямовані на підвищення ефективності лазерної обробки, є безумовно актуальні. Цей висновок також підтверджує зв'язок дисертації з планами науково-дослідних робіт НМетАУ за пріоритетним напрямом розвитку «Нові речовини та матеріали» згідно з законом України №2519-17 від 12.10.2010 р. і її ви-

конання в рамках двох держбюджетних науково-дослідних робіт (державні реєстраційні №№ 0111U002914 та 0115U003175).

Ступінь обґрунтованості, достовірності та новизна наукових положень, висновків, рекомендацій

Достовірність експериментальних результатів, обґрунтованість наукових висновків і рекомендацій, які випливають із дисертаційної роботи І.О.Нікульченка, не викликають ніяких сумнівів. Дослідження виконані із залученням сучасного експериментального обладнання та комп'ютерної техніки. Заслуговує на увагу комплексний підхід автора до вирішення поставлених питань. Отримані результати корелюють із результатами інших дослідників. Вони апробовані на авторитетних міжнародних і національних науково-технічних конференціях, опубліковані в провідних вітчизняних та закордонних фахових спеціалізованих виданнях.

Дисертаційна робота І.О.Нікульченка складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і п'яти додатків. У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, описано об'єкт, предмет та методи досліджень, показано наукову новизну і практичне значення дисертаційної роботи. Перший розділ містить літературний аналіз сучасного стану наукової діяльності в галузі створення нових способів лазерної обробки матеріалів. Зокрема висвітлено переваги застосування та унікальні властивості лазерного випромінювання. Детально описано існуючі методи лазерної обробки, такі як термічне зміцнення, відпал, поверхнелегування, наплавлення тощо. Особливу увагу приділено фізичним процесам, що відбуваються в поверхневих шарах матеріалів, під дією лазерного випромінювання. Описано вплив енергетичних параметрів, просторового розподілу густини потоку, теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу та інших параметрів. Узагальнено закономірності лазерного зміцнення металів, а саме наведено відомості про технологічні характеристики процесу, що забезпечують продуктивність та ефективність зміцнення. Проаналізовано іс-

нуючі технологічні схеми лазерної обробки та їх застосування для зміцнення деталей із урахуванням умов їх експлуатації. Зазначено, що лазерне зміцнення пов'язане з утворенням дислокаційної субструктури, аналогічної до субструктури сильно деформованих металів. Показано, що термопластичні деформації, які виникають в зоні термічного впливу, визначають характер залишкових напружень у матеріалі. Наведено інформацію про механічні та експлуатаційні характеристики сталей після лазерного зміцнення. Описано вплив лазерного випромінювання на неметалеві включення у структурі сталей. Детально охарактеризовано склад, структуру та властивості неметалевих включень, що утворюються в процесі виплавки та кристалізації сталевих злитків. Зокрема особливу увагу приділено способам зниження негативного впливу неметалевих включень на експлуатаційні та технологічні характеристики виробів. Систематизовано дефекти лазерно-зміцненого шару, обумовлені наявністю неметалевих включень. Наголошено на важливості врахування структури та властивостей границь поділу між неметалевим включенням і сталеву матрицею. Описано структурні зміни міжфазних границь, викликані дією лазерного випромінювання. Конкретизовано фактори впливу неметалевих включень на сумарний ефект лазерного зміцнення. З посиланням на аналіз літературних джерел, обґрунтовано задачі досліджень, які потребують вирішення в дисертаційній роботі.

У другому розділі наведено хімічний склад сталей, які піддавали лазерній обробці. Описано режими імпульсного та безперервного лазерного опромінювання. Охарактеризовано задіяні методики дослідження структури, зокрема мікроструктурного, кількісного металографічного, петрографічного, мікрорентгеноспектрального, лазерного спектрального, рентгеноструктурного та електронно-мікроскопічного аналізів. Наведено відомості про методики виміру нанотвердості, випробувань на розтяг, оцінки мікроруйнувань та критичного ступеня деформації. Описано технологію лазерної обробки та випробувань зразків колісної сталі виробництва ВАТ ІНТЕРПАЙП НТЗ.

Третій розділ присвячено дослідженню структури та властивостей зон контактної взаємодії, що утворюються на границях поділу між неметалевими включеннями та сталевими матрицями різного складу, після лазерної обробки. Зазначено, що контактна взаємодія супроводжується процесами плавлення (оплавлення) неметалевих включень або їх розчинення в розплавленій сталевій матриці. Запропоновано механізм контактного плавлення в умовах аномального масопереносу, що полягає в утворенні зон з підвищеною густиною дислокацій у поверхневих шарах неметалевих включень, які потім стають зародками рідкої фази. Встановлено появу на границях поділу з боку сталевій матриці та неметалевих включень шаруватих ділянок з каскадним розподілом елементів та дисперсних «сателітних» частинок. З боку включень також спостерігаються «тунельні» ділянки насичення. Крім того, в структурі зон контактної взаємодії присутні граничні фази різного типу. Запропоновано механізми контактної взаємодії, що пояснюють описані структурні зміни. Зроблено висновок про існування трьох типів зон контактної взаємодії залежно від напрямку переважного масопереносу через границі поділу та проходження хімічних реакцій під час їх формування. Показано, що поєднання лазерної обробки з мікролегуванням від неметалевих включень сприяє зменшенню середніх розмірів включень та забрудненості сталей.

У четвертому розділі подано результати вивчення процесів утворення та розвитку тріщин поблизу включень залежно від режимів деформаційної та попередньої лазерної обробки. Зокрема порівняно мікроруйнування зон контактної взаємодії між включеннями та матрицями в зразках, що не піддавали дії лазерного випромінювання, та в зразках після лазерної обробки за декількома режимами. Для різних швидкостей деформації встановлено зв'язок температури деформації та режимів лазерної обробки з величиною критичного ступеня деформації, за якого виникають мікроруйнування. Визначено інтервал енергії імпульсного лазерного випромінювання, що забезпечує максимальне зміцнення сталевій матриці поблизу неметалевих включень та збільшення критичного ступеня деформації. Зазначено, що лазерне зміцнення гра-

ниць поділу між включеннями і матрицею пов'язане зі зміною механізму утворення мікроруйнувань. Показано, що наявність зон насичення сталеві матриці з різною структурою забезпечує гальмування поширення тріщин від неметалевих включень. Завдяки поєднанню двох механізмів зміцнення між-фазних границь поділу, а саме лазерного та деформаційного, підвищується опір зразків до тріщиноутворення.

У п'ятому розділі наведено результати дослідження зношених залізничних коліс із різним профілем поверхні ковзання. Зауважено, що інтенсивний знос у зоні викружки коліс призводить до підрізу гребнів. Локальне зміцнення зони викружки в режимі імпульсного випромінювання викликає утворення лазерно-загартованого поверхневого шару з несприятливою структурою. Рекомендовано застосування режиму безперервного лазерного випромінювання, що забезпечує бейнітну структуру поверхневого шару з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Додатки містять протокол-угоду про наміри, що підтверджує перспективність впровадження результатів роботи в умовах ТОВ «Інтерпайп Менеджмент», довідку про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес кафедри матеріалознавства ім. Ю.М.Тарана-Жовніра Національної металургійної академії України, грамоту Президії Національної академії наук України за наукову роботу, подану на конкурс серед молодих вчених, перелік опублікованих праць за темою дисертації, диплом науково-технічного союзу інженерів-механіків Болгарії за участь у роботі міжнародної наукової конференції.

Ступінь новизни виконаних у дисертаційній роботі І.О.Нікульченка досліджень визначається тим, що більшість результатів отримана автором уперше. Серед них наступні:

– фазовий та структурний склад зон контактної взаємодії, що утворюються на границях поділу між неметалевими включеннями та сталевими матрицями різного складу, після дії лазерного випромінювання;

- закономірності локального зміцнення сталеві матриці поблизу міжфазних границь поділу за рахунок легування елементами, що надходять з неметалевих включень;
- зв'язок процесів контактної взаємодії між неметалевими включеннями та сталевими матрицями з електронною взаємодією, зі зсувним сполученням контактуючих фаз, хімічними реакціями;
- класифікація границь поділу між неметалевими включеннями та сталевими матрицями за характером процесів контактної взаємодії;
- визначення чинників, що узагальнюють вплив неметалевих включень і границь поділу на зміцнення сталей під дією лазерного випромінювання;
- особливості процесів утворення тріщин поблизу неметалевих включень за різних режимів лазерної обробки, температур та швидкостей деформації;
- механізми зміцнення у разі застосування комбінованої обробки, що поєднує лазерну термічну обробку та високотемпературну деформацію;
- рекомендації щодо технологічного процесу виготовлення залізничних коліс із застосуванням локальної лазерної обробки в умовах ТОВ «Інтерпайп Менеджемент».

Практичне значення отриманих результатів

Окрім відзначених вище наукових результатів, наведених у дисертаційній роботі І.О.Нікульченка, необхідно вказати ще ряд її достоїнств, що мають практичне значення. Рекомендації щодо підвищення надійності та довговічності поверхні ковзання залізничних коліс передані ТОВ «Інтерпайп Менеджемент». Їх планують врахувати при створенні на підприємстві ділянки локальної лазерної обробки (протокол-угода від 18.05.17). Результати роботи також впроваджені в навчальний процес кафедри матеріалознавства ім. Ю.М.Тарана-Жовніра Національної металургійної академії України (довідка від 28.10.17). Результати дисертації відзначені грамотою Президії Національної академії наук України за роботу, подану на конкурс серед молодих

вчених. Здобувач отримав диплом учасника закордонної наукової конференції, що проходила в м. Варна (Болгарія).

Таким чином, комплекс виконаних автором досліджень не обмежується лабораторними випробуваннями, а є корисний матеріал для застосування на практиці. Завдяки цьому дисертаційна робота І.О.Нікульченка є завершеною науковою працею.

Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати роботи повністю викладено в 17 наукових працях, з них 1 стаття – у закордонному виданні, 6 статей – у фахових виданнях за переліком МОН України, 11 публікацій, які додатково висвітлюють результати дисертації, включаючи 2 закордонні статті. Вони обговорювалися на 20 науково-технічних міжнародних та всеукраїнських конференціях. Об'єм представленої дисертації, одержані нові результати, документи, що підтверджують практичне значення, рівень наукових публікацій свідчать про завершеність роботи в цілому і її важливість для науки й вітчизняної промисловості. Автореферат достатньо повно відображає зміст дисертації.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації і автореферату

1. Здобувач описує процес плавлення включень, що супроводжується утворенням розплаву з полікристалічною будовою, який складається з кластерів та розупорядкованих зон (стор. 65). При цьому стабільні кластери утворюють оболонку навколо включень. Таке явище автор правильно пов'язує з надлишковою енергією γ_c на границі поділу включення-розплав. Однак, як відомо, на цю характеристику в першу чергу впливають не «провідні властивості включення», а площа міжфазної поверхні. Її зменшення у разі утворення полікристалічної оболонки забезпечує не збільшення, як вважає автор (стор. 66), а зменшення γ_c , що є термодинамічно вигідним. І навпаки, під час контактного плавлення неметалевих включень у разі утворення зародків рід-

кої фази в їх поверхневих шарах, енергія γ_c не зменшується (стор. 63), а збільшується зі збільшенням площі поверхні, що очевидно впливає з рис. 3.2.

2. «Каскадний» розподіл елементів у зоні контактної взаємодії між неметалевим включенням і матрицею здобувач пояснює тим, що «хвилі релаксації напружень супроводжують масоперенесення» (стор. 72). Хоча, на наш погляд, масоперенос відбувається в умовах градієнтного розподілу напружень, що виникають під дією лазерного випромінювання. А вже за рахунок дифузійних процесів проходить релаксація напружень.

3. Описуючи утворення «сателітних» частинок у зонах контактної взаємодії між включеннями і матрицями, здобувач зазначає, що вони «можуть бути присутніми на деякій відстані від включення» (стор. 78). Цей результат автор пов'язує з «локальною неоднорідністю зон насичення матриці», включаючи можливість міграції нерозчинених залишків включень у розплаві. Саме міграцією можна пояснити появу «сателітних» частинок у місцях, де концентрація компонентів, що надходять у матрицю під час розчинення включень, є відносно низькою.

4. У цілому висвітлення результатів роботи в дисертації справляє гарне враження як своєю послідовністю, так і чіткістю викладення. Проте слід зауважити щодо використання автором деяких термінів. Наприклад, не зрозуміло, для чого автор використовує термін «тунельний» ефект, що має чисто квантову природу, для опису зернограничної дифузії (стор. 81). У ряді випадків замість терміну «міжфазна границя» більш прийнятним було б застосувати термін «зона контактної взаємодії», наприклад, коли автор повідомляє про «розширення міжфазних границь» (стор. 95). Здобувач часто використовує термін «когезійна міцність», хоча більш правильним було б казати про адгезійну міцність, враховуючи різний хімічний склад контактуючих речовин. Крім того, граничні фази не можуть бути двофазними (стор. 88). Іноді трапляються некоректні терміни. Наприклад, «електрони, які зіткнені» (стор. 27), «скорочення об'ємів» (стор. 35), «коливальний тиск» (стор. 66), «щільність міцності» (стор. 95). Зустрічаються і помилки перекладу, такі як «пов'язані

електрони» (стор. 27) (замість зв'язані), «щільність» дислокацій (замість густина) (стор. 33), «тендітні» включення (стор. 39) (замість крихкі), «з'єднання впровадження» (стор. 40) (замість сполуки проникнення), «зміст» включень (стор. 45) (замість вміст), «движуча» сила (стор. 91) (замість рушійна), «захоплення» (стор. 112) (замість захвати).

5. Серед зауважень щодо оформлення роботи слід указати на такі. У розділі 2 не описана методика рентгеноструктурного аналізу. Одиниці виміру товщини записані як $1/a$ (стор. 26). Не вказані одиниці виміру розмірів (табл. 3.7, 3.8) або вони подані не в одиницях СІ (стор. 57). У підписах до рис. 3.6, 3.8 і 3.12 не наведений склад матриці, з якою контактують включення, а до рис. 2.1 – масштаб збільшення. Іноді в таблицях не уточнені границі вимірювання величин (табл. 3.10, 4.6), а в табл. 3.9 не вказаний склад включень.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам

Зроблені зауваження не мають принципового характеру, який би стосувався суті дисертаційної роботи. В цілому можна заключити, що дисертантом отримані нові наукові результати, що дозволило вирішити важливу науково-технічну задачу, яка полягає у розробці технологічного процесу лазерного зміцнення зони викружки залізничних коліс на основі дослідження закономірностей формування структури та властивостей зон контактної взаємодії між неметалевими включеннями та сталевими матрицями під дією лазерного випромінювання, а також процесів утворення та розвитку тріщин за різних температурно-швидкісних режимів деформації.

На підставі вищесказаного можна зробити висновок про те, що дисертаційна робота Нікульченка Ігоря Олександровича відповідає всім вимогам п.11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р. та №1159 від 30.12.2015 р. до актуальності, методичного рівня, змісту, наукової

новизни, практичного значення, оформлення тощо, є закінченою кваліфікаційною науковою роботою, а її автор Нікульченко Ігор Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 – «Металознавство та термічна обробка металів».

Офіційний опонент –

професор кафедри експериментальної фізики

та фізики металів Дніпровського

національного університету ім. О.Гончара,

доктор технічних наук



О.В.Сухова

Підпис О.В.Сухової підтверджую –

Вчений секретар Дніпровського

національного університету ім. О.Гончара,

кандидат фізико-математичних наук



Т.В.Ходанен

