

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

НІКУЛЬЧЕНКО ІГОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.785:535.211:669.15-194:669.017(043)

**ВПЛИВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА
ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ З ПІДВИЩЕНИМИ МЕХАНІЧНИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ В СТАЛЯХ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ**

05.16.01 – «Металознавство та термічна обробка металів»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національній металургійній академії України (НМетАУ)
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Губенко Світлана Іванівна**, Національна металургійна академія України, м. Дніпро, кафедра матеріалознавства ім. Ю.М. Тарана-Жовніра.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Сухова Олена Вікторівна**, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, м. Дніпро, кафедра експериментальної фізики та фізики металів

доктор технічних наук **Бабаченко Олександр Іванович**, директор Інституту чорної металургії НАН України ім. З.І. Некрасова, м. Дніпро

Захист відбудеться «_____» _____ 2018 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.084.02 при Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «__» _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д.08.084.02

д.т.н., професор _____ Т.М. Миронова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку техніки пред'являються підвищені вимоги до якості, надійності і довговічності деталей машин, а також конструкцій. Умови експлуатації техніки і конструкцій стали більш жорсткими, коли багато вузлів працюють під впливом підвищених температур або таких, що циклічно змінюються, великих питомих навантажень, великого діапазону швидкостей тертя і ін. Тому в даний час гостро стоїть проблема підвищення якості сталей і сплавів, що відповідають сучасним вимогам до конструкційної міцності, зносостійкості, надійності та інших характеристик. Неметалеві включення приймають участь в усіх процесах і явищах, які відбуваються під час виробництва та експлуатації металевих виробів. Методи впливу на неметалеві включення, а також міжфазні границі включення-матриця, їх будову і когезійну міцність, що визначають рівень конструкційної міцності сталей, представляють одне з найбільш перспективних напрямків обробки сталей. До таких методів слід віднести лазерну обробку.

У роботах Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Веденова А.А., Гладуша Г.Г., Григор'янца А.Г., Криштала М.А., Леонтьєва П.А., Кокори О.М., Бергмана Г.В., Реді Дж., Новіцкі М., Ставрева Д. та ін. обговорюються фізичні процеси, що проходять при лазерному впливі, встановлені закономірності структуроутворення в різних металевих матеріалах, проте не розглядається вплив неметалевих включень на обговорювані явища. У роботах Губенко С.І. вивчалася поведінка включень різних типів і їх вплив на локальне зміцнення сталеві матриці, проте необхідні подальші дослідження цих процесів, а саме особливостей плавлення і швидкісної кристалізації включень, особливостей структури зон насичення сталеві матриці поблизу включень, поведінки включень і границь включення-матриця при подальшій деформації. Відсутність таких даних не дозволяє повною мірою використовувати можливості лазерної обробки для локального зміцнення сталеві матриці поблизу включень, а також зміцнення міжфазних границь включення-матриця, що забезпечить необхідний рівень механічних властивостей і тріщиностійкості сталей, а також надійності і довговічності виробів. Розробка нових та удосконалення існуючих наукомістких технологій є пріоритетними завданнями для створення високоефективних виробництв. Тому робота, спрямована на вивчення закономірностей структуроутворення поблизу включень і отримання зміцненого поверхневого шару з підвищеними механічними і експлуатаційними властивостями в сталях при лазерній обробці, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з тематичними планами наукових досліджень НМетАУ згідно пріоритетного напрямку розвитку «Нові речовини і матеріали» згідно із Законом України №2519-17 від 12.10.2010 р., а також тематики держбюджетних науково-дослідницьких робіт НМетАУ: «Вплив високоенергетичних обробок на закономірності розвитку пластичної деформації уздовж границь неметалеве включення-матриця сталі» (ДР № 0111U002914, Дніпро, 2012 – 2014 рр.) та «Вплив високоенергетичних обробок на утворення тріщин уздовж міжфазних границь неметалеве включення-матриця сталі та

міцність сталей при різних умовах навантаження» (ДР № 0115U003175, Дніпро, 2015 – 2017 рр.), в яких автор був виконавцем.

Мета й завдання дослідження: Метою роботи є визначення закономірностей структуроутворення поблизу неметалевих включень, а також в неметалевих включеннях і границях включення-матриця при різних режимах лазерної обробки, і їх впливу на утворення тріщин поблизу включень при різних температурно-швидкісних режимах деформації для підвищення механічних та експлуатаційних властивостей виробів, зокрема, залізничних коліс.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- дослідити особливості лазерного плавлення і швидкісної кристалізації неметалевих включень і сталеві матриці;
- встановити закономірності фазових і структурних перетворень в сталевій матриці поблизу неметалевих включень різних типів;
- вивчити перетворення в поверхневих шарах включень при лазерному впливі;
- дослідити закономірності трансформації міжфазних границь включення-матриця при лазерному впливі;
- вивчити спільний вплив температури і швидкості деформації на утворення тріщин уздовж міжфазних границь включення-матриця;
- дослідити вплив режиму лазерної обробки на утворення тріщин поблизу включень різних типів при різних температурах і швидкостях деформації;
- вивчити вплив структури сталеві матриці, сформованої в процесі лазерної дії поблизу неметалевих включень в результаті їх контактної взаємодії з матрицею, на розвиток тріщин при різних температурно-швидкісних режимах деформації;
- розробити рекомендації щодо оптимізації структурних параметрів неметалевих включень і міжфазних границь включення-матриця з метою рекомендації режимів лазерної обробки для підвищення експлуатаційних властивостей готових виробів;
- показати принципову можливість лазерного зміцнення викружки на поверхні ковзання залізничних коліс з метою підвищення їх надійності та довговічності.

Об'єкт дослідження. Процес формування локальної структури сталеві матриці поблизу неметалевих включень при лазерному впливі.

Предмет дослідження. Закономірності структуроутворення в сталевій матриці поблизу неметалевих включень при лазерній обробці та його вплив на властивості сталей.

Методи дослідження. Теоретичні й практичні розробки дисертації базуються на фундаментальних положеннях металознавства, матеріалознавства, структурного мікроаналізу та фізики металів. При проведенні досліджень використовувалися сучасні методи: металографічний, електронномікроскопічний, петрографічний, мікрорентгеноспектральний, лазерний спектральний, рентгеноструктурний, високотемпературна металографія, а також вимір

нанотвердості, мікротвердості та твердості, випробування на розтягування та зносостійкість на обладнанні, яке пройшло державну повірку.

Наукова новизна: Наукову новизну мають перераховані нижче результати наукових і експериментальних досліджень:

1. Вперше визначені закономірності швидкісного контактного плавлення і затвердіння неметалевих включень при лазерному впливі, а також особливості процесу утворення «сателітних» частинок, пов'язані з формуванням при плавленні і розчиненні включень локальних ділянок типу металевих емульсійних розплавів, збагачених компонентами включень. Раніше ці процеси не вивчалися. Це дозволяє створити передумови для цілеспрямованого впливу на границі включення-матриця, а також хімічний і фазовий склад неметалевих включень.

2. Вперше визначені закономірності формування локальної структури зон насичення сталеві матриці поблизу включень при лазерному впливі, що визначають рівень зміцнення і пов'язані з формуванням градієнтних і мікрокомполітичних шарів різного типу (шаруватих з ліквідаційним каскадним і «плямистим» розподілом елементів, а також «тунельних» і дисперсних). Раніше був відомий лише факт утворення зон насичення сталеві матриці поблизу включень. Це дозволяє прогнозувати рівень і стабільність лазерного зміцнення сталевих виробів різного призначення.

3. Вперше визначені закономірності формування локальної структури зон насичення включень при лазерному впливі, пов'язані з формуванням градієнтних і мікрокомполітичних шарів різного типу (шаруватих з каскадним ліквідаційним розподілом елементів, «тунельні», а також дисперсні з різними типами другої фази); встановлені особливості локального відновлення оксидів в процесі контактної взаємодії зі сталеві матрицею. Раніше був відомий лише факт утворення зон насичення включень елементами сталеві матриці при лазерній обробці. Це дозволяє прогнозувати структурні і механічні характеристики неметалевих включень в сталях після лазерної обробки.

4. Вперше систематизовані і науково обґрунтовані закономірності зміцнення і трансформації границь включення-матриця при різних режимах лазерного впливу, що супроводжуються гетерогенізацією їх структури, пов'язаної з формуванням градієнтних і мікрокомполітичних зон в сталеві матриці і на поверхні включень; встановлений інтервал енергій лазерного імпульсу (18 ... 25 Дж), що сприяють максимальному зміцненню цих границь. Раніше ці процеси не вивчалися. Це дає можливість отримувати границі включення-матриця з різною структурою і рівнем когезивної міцності.

5. Отримали подальший розвиток уявлення про особливості утворення і зростання тріщин на границях включення-матриця в процесі деформації при різних температурно-швидкісних умовах, в тому числі після лазерної дії по різних режимам. Розробка відрізняється врахуванням впливу енергії лазерного імпульсу, тривалості впливу і температурно-швидкісного режиму пластичної деформації на зародження тріщин, а також впливу градієнтних і композитних структур поблизу включень на розвиток тріщин. Це дає можливість

шляхом регульованого режиму лазерної обробки впливати на тріщиностійкість сталевих виробів при наступних механічних навантаженнях в різних умовах.

Практичне значення отриманих результатів: Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що в ході виконання дисертаційної роботи на основі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено закономірності, які дозволяють стверджувати, що розроблений науковий підхід до підвищення ефективності зміцнюючої лазерної обробки, заснований на реалізації потенційних можливостей локального легування сталеві матриці від внутрішніх джерел - неметалевих включень, а також трансформації і зміцнення границь включення-матриця. Показано, що процеси, що відбуваються поблизу включень в умовах лазерної обробки дозволяють використовувати її в якості мікро-ХТО, що сприяє підвищенню рівня зміцнення сталей. Визначено інтервал енергій лазерного променя (18...25 Дж), при яких ці ефекти виражені максимально. Показано, що поєднання лазерної термообробки з мікролегуванням локальних ділянок матриці дозволяє зменшити середні розміри і забрудненість сталі неметалевими включеннями в зоні обробки на 30...50%, а також відкриває можливості формування міжфазних границь включення-матриця з заданими властивостями при зміні режиму лазерного впливу, що сприяє підвищенню тріщиностійкості сталей.

Показана принципова можливість лазерного зміцнення зони викружки поверхні ковзання залізничних коліс зі структурою бейніту, яка володіє запасом пластичності, що призводить до ефекту здатності прироблятися і пластичної релаксації напружень при експлуатації, а також підвищенню зносостійкості і надійності коліс внаслідок зниження ризику подрізу гребенів. Результати, отримані в роботі, запропоновані до використання при виготовленні залізничних коліс в умовах ТОВ «Інтерпайп менеджмент», а саме при створенні ділянки локальної лазерної обробки поверхні ковзання протокол 18.05.2017р. Результати роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрі матеріалознавства НМетАУ довідка від 27.11.2017р.. Результати досліджень відзначені Грамотою президії Національної академії наук України за результатами конкурсу робіт молодих вчених 2017 р. Має сертифікат учасника закордонної наукової конференції.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно при проведенні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві (у порядку списку публікацій), авторів належать: [7, 8, 3, 2, 4, 6] – аналіз впливу режимів лазерної обробки на структуроутворення поблизу неметалевих включень; вибір наукових підходів до рішень поставлених задач; [4,17] проведення металографічних досліджень; формулювання висновків за отриманими результатами; [11,14] – аналіз особливостей процесів лазерного плавлення та твердіння включень; [9, 10, 5, 16] - дослідження впливу параметрів деформації на утворення тріщин; [1, 12, 13, 15] – дослідження можливості лазерного зміцнення залізничних коліс.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були представлені й обговорені на міжнародних науково-технічних конференціях: Стародубівські читання «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування»

(Дніпро, 2015, 2016, 2017 pp.), міжнародна наукова конференція “Material science. Nonequilibrium Phase Transformations” (Varna, 2015 p.), XVII - XIII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція "Людина ікосмос" (Дніпро, 2015, 2016 pp.), Міжнародна науково-технічна конференція «Неметалеві вкраплення і гази в сталях» (Запоріжжя, 2015р.), XII - XIII Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті» (Болгарія, Варна, 2016, 2017 p.); XVI - XVII International Scientific Conference Chestochowa University of Technology. Chestochowa, 2015, 2016pp.), XIV Всеукраїнська науково-практична конференція «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» НТУУ «КПІ». (Київ, 2016, 2017 pp.), IX Міжнародна конференція молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Київ, 2016 p.), конференція «Молода академія 2016» ІЧМ. (Дніпро, 2016), VIII міжнародна конференція «Молоді вчені - від теорії до практики 2017» (Дніпро, 2017 p.), Міжнародна інтернет-конференція «Прикладні науково-технічні дослідження», (Івано-Франківськ, 2017 p.), IX – X конференції «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» НТУУ «КПІ» (Київ. 2016. 2017 pp.), I Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених «Наука і металургія» (Дніпро, ІЧМ, 2017), на науковому семінарі кафедри матеріалознавства (Дніпро, 2017 p.).

Матеріали дисертації опубліковані у 17 виданнях з яких 6 таких, що опубліковані у фахових виданнях за переліком МОН України, 1 з яких – у закордонному виданні, також 11 видань, які додатково висвітлюють результати дисертації, включаючи 2 закордонні статті, що не включені до переліку фахових.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти основних розділів, загальних висновків, налічує 154 сторінки загального машинописного тексту, містить 32 рисунки і 24 таблиці, бібліографічний список з 145 джерел і 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету, завдання і методи досліджень, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, публікації, апробацію результатів, а також структуру дисертації.

В першому розділі наведено огляд літературних джерел з питань фізичних процесів, які відбуваються в металевих матеріалах при лазерній обробці, особливостей лазерного зміцнення, структуроутворення в сталях поблизу неметалевих включень та їхній вплив на властивості сталей. Показано, що в роботах різних авторів обговорюються фізичні процеси, що проходять при лазерному впливі, встановлені закономірності структуроутворення в різних металевих матеріалах, проте не розглядається вплив неметалевих включень на обговорювані явища. У роботах Губенко С.І. вивчалася поведінка включень різних типів і їх вплив на локальне зміцнення сталеві матриці, проте необхідні подальші дослідження цих процесів, а саме особливостей плавлення і швидкісної кристалізації включень, особливостей структури зон насичення сталеві матриці

поблизу включень, поведінки включень і границь включення-матриця при подальшій деформації. На підставі комплексного аналізу літературних джерел підтверджено актуальність вибраної теми та визначені мета і основні задачі дослідження.

У другому розділі обгрунтовано вибір матеріалів і методів досліджень. Матеріалами дослідження служили сталі 08кп, 08Х, 08Т, ЕЗ, 08Ю, 08ГСЮТФ, 08Х18Н10Т, 60Г, 12ГС, R7, ШХ15, М68, Р6М5, які містять різні типи неметалевих включень. Використовували методи досліджень: металографічний (оптична мікроскопія, растрова та трансмісійна електронна мікроскопія), локальний мікрорентгеноспектральний та лазерний спектральний аналізи, петрографічний метод. Наведені дані про методи і режими лазерної обробки та деформації розтягненням у вакуумі, виміру твердості, мікротвердості та нанотвердості, випробувань на знос.

У третьому розділі досліджено взаємодію неметалевих включень і сталевій матриці в процесі лазерного впливу.

Дослідження особливостей лазерного плавлення і розчинення включень показало, що ці процеси пов'язані з переходом включень і границь включення-матриця в нерівноважний високоенергетичний стан. Імовірність розчинення, оплавлення і розплавлення включень залежить від їх типу (рис. 1, а, б). Глибина зони розчинення включень залежить від режиму лазерної обробки: чим більше енергія імпульсу $W_{\text{імп}}$ і час впливу $\tau_{\text{імп}}$, тим вона більше. Дані процеси можуть розглядатися з точки зору дислокаційної теорії плавлення, згідно з якою в поверхневому шарі включення утворюються зони з підвищеною щільністю дислокацій в умовах електронної та електромагнітної взаємодії включень і матриці, що представляють собою сильно спотворені області з практично розупорядкованими решітками, які можуть бути зародками рідкої фази. Послідовність формування сильно розупорядкованих ділянок: на поверхні включення, насиченої елементами матриці, утворюються означені ділянки - зародки плавлення, які цілком переходять в рідку сталь, розчинюючись у ній і насичуючи прилеглі до включення ділянки матриці елементами включення. Положення границі включення-матриця змінюється в залежності від характеру взаємного масоперенесення. Такий механізм контактного розчинення і плавлення неметалевого включення і границі включення-матриця в розплавленій сталевій матриці в нерівноважних умовах є енергетично виправданим, оскільки поверхневий шар включення, що знаходиться в напруженому стані з підвищеною енергією, замінюється рідкою фазою з меншою енергією.

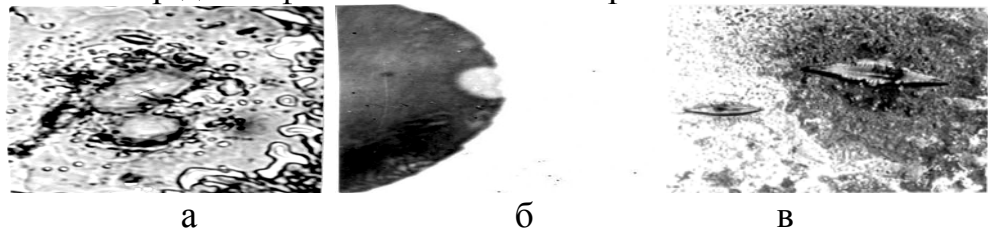


Рис. 1. - Розчинення і плавлення неметалевих включень при лазерному впливі (а, б) і структура включення після швидкісного затвердіння: а - Al_2O_3 , 60Г, б- $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$, 60Г, в - $(\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$, 60Г; $\times 500\times 6$

Розплавлене або оплавлене включення знаходиться в розплавленій сталевій матриці і утворюється локальна мікрометалургійна ванна, у якій під дією лазерного випромінювання виникають гідродинамічні потоки, що сприяє конвективному масопереносу елементів включення і матриці і вносить внесок у загальний процес аномального швидкісного масопереносу. Процес плавлення включення супроводжується швидкісним перерозподілом сил міжатомних зв'язків на користь атомів різного типу, що мають сприятливе співвідношення електронегативностей. У випадках плавлення включень утворюється мікрогетерогенний розплав, який має квазіполікристалічну будову, для якого характерна наявність гетерофазних комплексів, які зберігають сильну хімічну взаємодію атомів елементів, що входили до складу вихідних включень. Ці динамічні кластери є центрами швидкісної кристалізації включень при наступному охолодженні. При гартуванні з рідкого стану у поверхневому шарі включень або в їх повному обсязі формується зона лазерної кристалізації, для якої характерні ультрадрібнозернистість, стовбчаста форма зерен, в також наявність зон зсуву (рис. 1, в).

Досліджено особливості структури градієнтних і мікрокомполітичних зон, що виникли при взаємодії включень і сталевий матриці (рис. 2). Кількість зон насичення поблизу включень не залежало від типу і стану включення в момент лазерного впливу, проте залежало від режиму лазерної обробки: чим вище енергія імпульсу і більше час впливу, тим більше тенденція до появи багатозарових формувань.

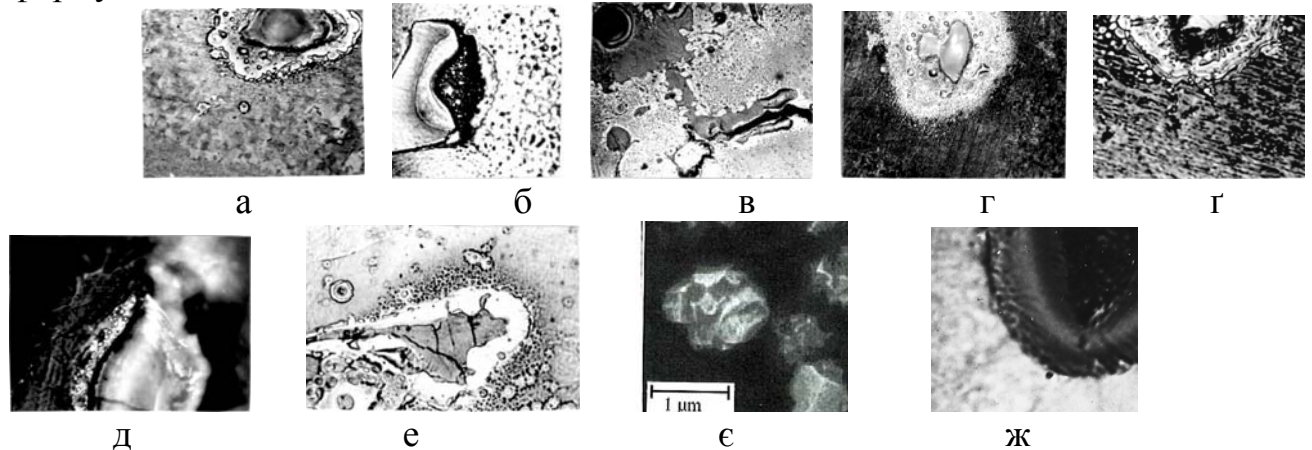


Рис. 2. - Зони взаємодії матриці з неметалевими включеннями при лазерному впливі: а – Al_2O_3 , R7, б, е – $(\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$, 08кп, в – $\text{FeS}-(\text{Fe},\text{Mn})\text{S}$ (НБ-57), г – TiCN , 08Т, г – SiO_2 , ЭЗ, д - Al_2O_3 , 08Ю, є, ж - $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$, R7; $\times 500\times 6$

При мікрорентгеноспектральному аналізі встановлено, що при наявності декількох зон насичення в матриці спостерігали своєрідний каскад концентрацій елементів при видаленні від включення. Співвідношення концентрацій компонентів в цих зонах були різними і коливалися в межах 1,2 ... 1,8 рази, що пов'язано, мабуть, з неоднорідним полем температур і напружень, а також хвильовим характером швидкісного масоперенесення в умовах імпульсного лазерного впливу. Виявлено ще один тип розподілу елементів включення в прилеглих ділянках матриці: при колективному масоперенесенню, пов'язаному з розчиненням зерен включення, спостерігали «плямисте» розподіл елементів

включення в прилеглих ділянках матриці. Результати вивчення розподілу нанотвердості матриці безпосередньо в ділянках, прилеглих до включень, показали, що поблизу включень (одна зона, або перша зона при наявності декількох зон насичення) нанотвердсть значно перевищує середнє її значення для матриці далеко від включень (табл. 1).

Таблиця 1.- Значення нанотвердості зон насичення матриці поблизу включень (H_m^e) і далеко від них (H_m), а також коефіцієнта K_B (у дужках) при енергії імпульсу 25 Дж і часу впливу $3,6 \cdot 10^{-3}$ с

Включення	Стан включення *	Сталь, $H_m, \times 10, \text{ МПа}$	Стан матриці *	$H_m^e, \times 10, \text{ МПа}$ у зонах		
				1	2	3
$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	опл	R7, 620	P	1100(1,77)	-	-
			P	1085(1,75)	942(1,52)	744(1,2)
SiO_2	т	R7, 620	P	1080(1,74)	858(1,38)	-
			T	960(1,55)	-	-
$\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2, \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$	р	НБ-57, 748	P	1130(1,51)	1050(1,40)	-
			P	1260(1,68)	950(1,27)	810(1,08)
TiN, TiCN	т, опл	08Т, 280	P	502(1,79)	380(1,36)	-
$\text{MnS}, (\text{Mn}, \text{Fe})\text{S}$	P	08кп, 260	T	395(1,52)	-	-
			P	430(1,65)	374(1,44)	320(1,23)

*Примітка: т – тверде; р – рідке; опл. – оплавлення.

Величина нанотвердості матриці залежить від типу сталі, оскільки ступінь її зміцнення в процесі лазерного опромінення і гартування залежить від її складу і структури. У першій (або єдиній) зоні насичення значення H_m^e в 1,45...1,8 раз вище (коефіцієнт $K_B = H_m^e / H_m$), ніж в матриці далеко від включення. Потім у другій і третій зонах значення нанотвердості нижче, ніж в першій зоні, але перевищують величини H_m далеко від включень відповідно в 1,25...1,64 і 1,1...1,3 рази. Таким чином, спостерігається каскад значень нанотвердості матриці при видаленні від включення. Значення H_m^e і K_B в усіх зонах максимальні при оплавленні усіх видів включень і матриці. Залежність нанотвердості першої (або єдиної) зони насичення матриці, що прилягає до включення, для всіх використовуваних тривалостей імпульсу має немонотонну залежність (табл. 2), що свідчить про існування певного інтервалу значень енергії (18...25 Дж), в якому спостерігається максимальне зміцнення локальних шарів матриці.

Таблиця 2. - Вплив енергії лазерного випромінювання на нанотвердість матриці поблизу включення $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ в сталі R7

$\Phi_{\text{имп}}, \cdot 10^{-3}, \text{ с}$	$W_{\text{имп}}, \text{ Дж}$			
	10	18	25	30
1,0	820	1170	1060	910
3,6	850	1140	1100	950

Головним фактором зміцнення прилеглих до включень ділянок матриці є її мікролегування від внутрішніх джерел, якими виступають неметалеві включення. Створення каскаду зон насичення матриці поблизу включень шляхом формування локальних ліквідаційних зон - це формування шаруватих мікрокомполітичних ділянок поблизу включень. Слід зазначити, що їх структура може бути однофазною (пересичені тверді розчини), але часто в зонах спостерігаються дисперсні фази - «сателітні» частинки (рис. 2, е - ж). Комплексні дослідження показали, що хімічний склад цих частинок пов'язаний з вихідним включенням, але дещо відрізняється від нього завдяки участі в їх формуванні компонентів матриці. Зустрічаються також частки, що мають метастабільний склад, що пов'язано з їх освітою в умовах швидкісного лазерного впливу.

Процес утворення "сателітних" включень пов'язаний з тим, що при плавленні матриці і включень (або оплавленні останніх) в момент лазерного впливу внаслідок аномального масоперенесення в матриці створюються області, які збагачені компонентами включень або містять комплекси (кластери) колишніх мікрочерен вихідних включень. Формуються локальні ділянки типу металевих емульсійних розплавів, які при різкому охолодженні як би "заморожуються" і кластери колишніх зерен вихідного включення кристалізуються в "сателітні" частинки. Процес утворення "сателітних" включень може бути також пов'язаний зі зменшенням розчинності елементів, які перейшли з включення, в зонах збагачення рідкої і твердої матриці при різкому охолодженні. Поява «сателітних» частинок сприяє створенню дисперсних композитних шарів, або при наявності в матриці декількох зон насичення - комбінованих шарувато-дисперсних ділянок поблизу включень. Причому, варіювання режиму лазерного впливу дозволяє регулювати формування цих композитних систем.

Таким чином, мікронеоднорідне зміцнення сталеві матриці при лазерному впливі поблизу включень пов'язано з формуванням градієнтних і мікрокомполітичних зон різних типів (шаруватих каскадного типу, плямистих, дисперсних), що обумовлено насиченням і пересиченням прилеглих ділянок матриці компонентами включень; дисперсійним зміцненням, пов'язаним зі зменшенням середніх розмірів неметалевих включень в результаті їх часткового розчинення, а також утворення «сателітних» частинок. Описані процеси свідчать про локальну гетерогенізацію мікроструктури матриці сталі поблизу включень при лазерному впливі. Очевидно, використання неметалевих включень в якості внутрішніх джерел мікролегування локальних ділянок сталеві матриці при лазерній обробці можна розглядати як мікро-хіміко-термічну обробку, яка відбувається в гіпернерівноважних умовах лазерного впливу.

Встановлено, що в поверхневих шарах включень відбуваються фазові зміни, зумовлені взаємодією зі сталеві матрицею. Показано, внаслідок масоперенесення компонентів сталеві матриці утворилися одна або дві зони насичення з каскадним ліквідаційним розподілом елементів і значень нанотвердості, які є вищими у порівнянні з такими подалі від включень: в першій зоні (або при наявності однієї зони) - в середньому на 15 ... 20%, у другій зоні - на 10%. Можна також говорити про «тунельний» ефект масоперенесення у

поверхневому шарі включення по границям зерен, якщо включення в момент лазерного впливу залишалося в твердому стані, або уздовж ділянок його часткового плавлення. В результаті утворення шаруватих або «тунельних» композитних шарів в поверхневій зоні включень виникли тверді розчини елементів матриці в решітці включення.

Крім того, виявлені ділянки зі структурою дисперсного мікрокомпозиту, які виникли внаслідок розпаду рідкого або твердого розчину, або появи мікрозон відновлення оксидів. Процес часткового відновлення ділянок поверхні вищих оксидів, можна пов'язати із взаємним масоперенесенням елементів через міжфазні границі. Під дією лазерного випромінювання іони кисню видаляються з решітки вищого оксиду, переміщуються в матрицю завдяки перепаду його концентрації в цих фазах. У звільнених вузлах решітки вищого оксиду виникають спотворення, що призводять до її розбудови в решітку нижчого оксиду металу. Процес відновлення оксидів відбувається на декількох реакційних центрах, проходить з високою швидкістю, тому різні ділянки відновлення на одному включенні розрізняються ступенем відновлення оксиду. Про проникнення іонів кисню в матрицю свідчать виявлені поблизу вихідного включення дисперсні «сателітні» частинки оксидів, що представляють собою, як правило, включення вищих оксидів, близьких за складом до вихідного включення. Чим вище енергія лазерного променя і більше час впливу, тим більше розміри ділянок часткового відновлення оксидів. Описані процеси свідчать про локальну гетерогенізацію мікроструктури поверхневих ділянок включень при лазерному впливі.

Аналіз процесів фазових і структурних змін, що відбуваються при взаємодії включень і сталеві матриці в момент лазерного впливу показав, що в результаті взаємного легування в системі включення-матриця створюються мікрокомпозитні шари, що мають гетерогенну будову. Оскільки взаємодія включень зі сталеві матрицею відбувається через міжфазні границі включення-матриця, відбувається трансформація останніх. Досліджено особливості цього процесу при лазерному впливі, які пов'язані з електронною взаємодією фаз, зсувним сполученням кристалічних їх решіток, а також з фазовим розпадом і формуванням гіпернерівноважних граничних фаз. Використовуючи теорію конфігураційної локалізації валентних електронів, можна уявити контактну взаємодію цих фаз, яка пов'язана з обміном електронів між атомами рідкої матриці і усупільнених електронів на d-підрівні атомів рідкого (твердого) включення. Інтенсивність контактної взаємодії і адгезійна міцність сформованої міжфазної границі визначаються взаємним електронним обміном між атомами включення і матриці. Масоперенесення через границі включення-матриця може призвести до формування на цих границях сегрегацій домішок, що пов'язано з фракціонуванням домішок, а також до виділення надлишкових дисперсних граничних фаз при розпаді пересиченої домішками міжфазної границі в процесі охолодження (рис. 3). Зсувні поліморфні перетворення, які проходять в сталеві матриці і деяких включеннях, очевидно, сприяють зсувовому сполученню кристалічних решіток включення і матриці. Дослідження структури граничних фаз показало, що вони можуть бути як однофазними у вигляді суцільної або

переривчастої оболонки навколо включення, так і двофазними із шаруватою структурою. Ширина граничних фаз залежить від режиму лазерного впливу: чим більше енергія імпульсу і час впливу, тим грубіше гранична фаза.

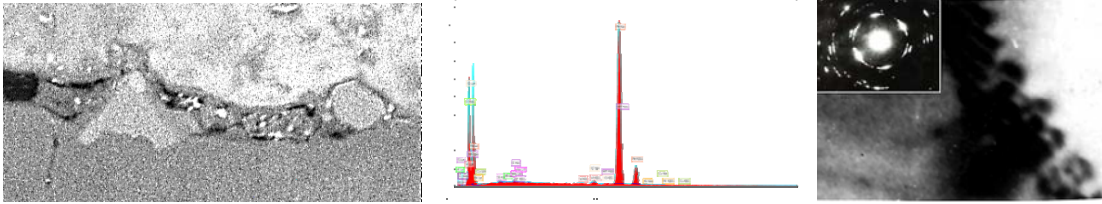


Рис. 3. - Граничні фази після лазерного впливу; x500x6

Дослідження структури граничних фаз показало, що вони можуть бути різними за складом, зустрічалися граничні прошарки з ультрадисперсною кристалічною, нанокристалічною і аморфною структурою, що пояснюється високошвидкісним характером процесу їх формування. Формування граничних фаз супроводжується появою нових міжфазних границь, які забезпечують зчеплення вихідного включення і матриці з новим шаром. Сполучення здійснюється за типом «дифузійного мікрозварювання», що підтверджується також поведінкою включень при подальшій деформації.

До процесів, які зосереджені в міжфазних границях включення-матриця, слід віднести: масоперенесення елементів включення і матриці уздовж і через ці границі; фазові і хімічні перетворення - формування сегрегацій домішок і граничних фаз; структурні перетворення - це перебудови системи міжфазних дефектів і зміна сполучення решіток включення і матриці. Ці перетворення дозволяють реалізувати можливості трансформації границь включення-матриця. Систематизовано основні види трансформації границь включення-матриця в залежності від характеру процесів, які відбулися за лазерному впливі (рис. 4), і які пов'язані з наявністю переважного масоперенесення елементів включення в навколишню матрицю; наявністю взаємного масоперенесення елементів включення і матриці; формуванням і фракціонуванням сегрегацій домішок, а також утворенням граничних фаз. Всі типи отриманих границь включають різні зони взаємодії включень і матриці, що призводять до їх розширення і перетворення в багатошарові формування, тобто сталася гетерогенізація їх структури. Чим більше енергія лазерного імпульсу і час впливу, тим більше ширина цих утворень. Ці результати розкривають можливості реалізації оптимального поєднання структури, ширини і рівня лазерного зміцнення трансформованих границь включення-матриця, що дозволяє підвищити ефективність зміцнюючої лазерної обробки на основі реалізації потенційних можливостей їх трансформації, а також впливу на характер гіпернерівноважних фазових і структурних перетворень в цих границях.

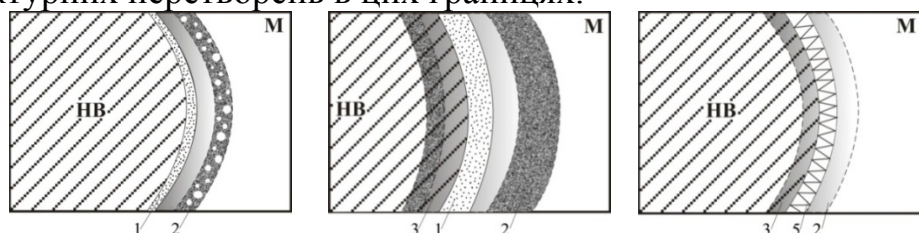


Рис. 4. - Схеми трансформації границь включення-матриця при лазерній дії

Процеси лазерного плавлення і розчинення включень, а також утворення «сателітних» частинок призвели до зменшення середніх розмірів всіх типів включень і забрудненості сталей включеннями на 30 ... 50%. Чим вище енергія імпульсу і більше час впливу, тим сильніше змінюються ці показники. Встановлено нові чинники, що визначають вплив неметалевих включень на зміцнення сталей при лазерному впливі: формування поблизу включень шаруватих мікрокомпозитних ділянок матриці з каскадним розподілом елементів; формування дисперсних «сателітних» частинок поблизу вихідних включень або в каскадних шарах матриці, а також зменшення середніх розмірів і об'ємної частки неметалевих включень; зсувове сполучення решіток включення і матриці; електронна взаємодія включення і матриці; формування у включеннях шаруватих мікрокомпозитних ділянок з каскадним розподілом елементів, а також «тунельних» ділянок насичення; формування дисперсних частинок другої фази в поверхневих ділянках вихідних включень; формування граничних фаз, які мають різну будову.

У четвертому розділі досліджено вплив лазерної обробки на утворення і розвиток тріщин поблизу включень при різних режимах пластичної деформації. Встановлено, що в інтервалах температур деформації, коли не проходить прослизання уздовж границь включення-матриця (25...900 °С) і при реалізації цього процесу (1000...1250 °С) (рис. 5, а), проявляється вплив температурно-швидкісного режиму деформації на утворення тріщин поблизу включень, яке пов'язане з розшаруванням зазначених границь. В інтервалі температур 25...900 °С при різних швидкостях деформації: чим вище температура деформації, тим більше величина критичного ступеня деформації $\epsilon_{кр}$ для всіх видів включень і мікроруйнувань. Виявився вплив швидкості деформування на величину $\epsilon_{кр}$, при досягненні якої виникають мікроруйнування поблизу включень після попередньої ЛТО. При 25 °С зі збільшенням швидкості деформації (швидкості переміщення захватів) від V_1 - 800 мм/хв до V_3 - 2000 мм/хв величина $\epsilon_{кр}$ монотонно зменшується у зв'язку з інтенсифікацією пластичної деформації і розвитком деформаційного зміцнення сталевोї матриці. При 600 °С величина $\epsilon_{кр}$ при всіх швидкостях деформації вище, ніж при 25 °С, однак при V_1 і V_2 (1680 мм/хв), коли встигає проходити динамічне знеміцнення сталевої матриці, критичний ступінь деформації вище, ніж при V_3 , коли динамічне відновлення структури сталевої матриці утруднено. При 900 °С при швидкостях деформації V_2 ... V_3 динамічне знеміцнення сталевої матриці проходить більш інтенсивно, ніж при 600 °С, що призводить до зростання величини критичного ступеня деформації. Аналогічні закономірності проявляються при виникненні тріщин у включеннях.

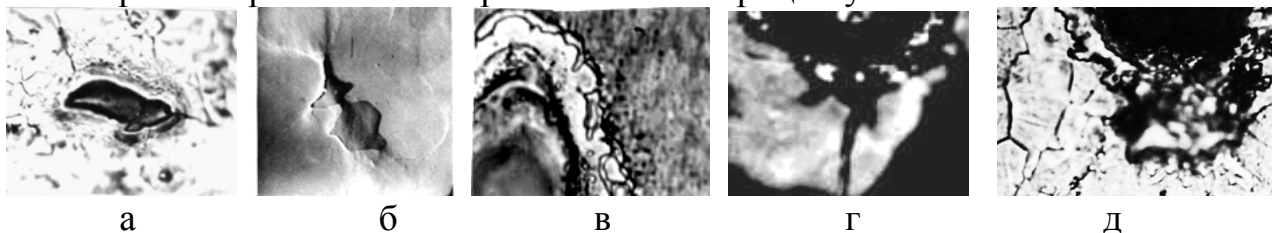


Рис. 5. - Неметалеві включення після деформації без ЛТО (а) і після попереднього лазерного впливу (б - д); x500x4

В інтервалі температур 25...900 °С значення $\epsilon_{кр}$ зростають при всіх режимах лазерного впливу, проте, мінімально підвищуються при граничних значеннях енергії лазерного імпульсу, і в більшій мірі - при $W_{имп}$ 18...25 Дж, що вказує на наявність інтервалу енергій імпульсного лазерного впливу, який дозволяє отримувати максимальне лазерне зміцнення сталевих матриць поблизу включень.

При високотемпературній деформації, коли відбувається просковзування уздовж границь включення-матриця (1000...1250 °С), також виникають тендітні розшарування уздовж указаних границь (рис. 5, б). Значення $\epsilon_{кр}$, при досягненні якого утворюються такі тріщини при всіх вивчених швидкостях деформації в разі попереднього лазерного впливу для всіх типів включень суттєво вище, ніж без ЛТО, що пояснюється впливом попереднього лазерного зміцнення границь включення-матриця. Однак при плавленні сульфідів і силікатів величина $\epsilon_{кр}$ різко знижується внаслідок розвитку червоноламкості незалежно від попереднього лазерного впливу. В інтервалі температур 1000...1250 °С при різних швидкостях деформації: чим вище температура деформації, тим більше величина критичного ступеня деформації $\epsilon_{кр}$ для всіх видів включень і мікроруйнувань. Виявився вплив швидкості деформації на величину $\epsilon_{кр}$, після попередньої ЛТО. При переході від V_1 (800 мм/хв) до V_2 (1680 мм/хв) його величина зростає в зв'язку зі збільшенням інтенсивності просковзування, що сприяє деформаційному зміцненню і пластичній релаксації в міжфазних границях включення-матриця; при переході від V_2 до V_3 (2000 мм/хв) величина $\epsilon_{кр}$ знижується через ускладнення перебігу динамічних релаксаційних процесів в границях включення-матриця. В інтервалі температур 1000...1250 °С при різних швидкостях деформації встановлено вплив режиму попереднього лазерного впливу на величину критичного ступеня деформації $\epsilon_{кр}$, який зростає при всіх його режимах з підвищенням температури деформації, однак, мінімально вона підвищується при граничних значеннях енергії лазерного імпульсу (10 і 30 Дж), і в більшій мірі - при $W_{имп} = 18 \dots 25$ Дж, що вказує на наявність інтервалу енергій імпульсного лазерного впливу, що дозволяє отримувати максимальне лазерне зміцнення границь включення-матриця. Зі збільшенням часу попереднього лазерного впливу величина $\epsilon_{кр}$ зростає завдяки більш ефективному лазерному зміцненню указаних границь.

Критичний розмір включень, поблизу яких виникають тендітні тріщини, залежить від температури і суттєво зростає після ЛТО в порівнянні з критичними розмірами включень при утворенні порожнин без ЛТО. Режим попереднього впливу практично не впливав на критичний розмір включень, що пов'язано очевидно зі зміцнюючим впливом ЛТО на міжфазні границі.

Лазерний вплив призвів до своєї поведінки границь включення-матриця при гарячій деформації, коли поєднуються: просковзування - пластична релаксація напружень, і крихке розшарування - тендітна релаксація напружень, що обумовлено швидкісним лазерним зміцненням цих границь, що виявляється в стримуванні просковзування і зародження мікроруйнування шляхом тендітної декогезії. Вивчено трансформацію границь включення-матриця при високотемпературному крихкому розшаруванні. Встановлено інтервал енергій

лазерного випромінювання (18...25 Дж), при яких зазначені ефекти виражені максимально, що визначає стабільність лазерного зміцнення границь включення-матриця. Показано, що при комбінованій обробці сталі ЛТО + високотемпературна деформація реалізуються два механізми зміцнення міжфазних границь включення-матриця: високошвидкісне термічне і деформаційне.

Структура зон насичення сталевोї матриці поблизу включень, яка отримана при лазерному впливі, впливає на розвиток тріщин. У випадках, коли поблизу включень після ЛТО виникали пересичені тверді розчини, які не мають ознак мікрокомполітичних структур, тенденції розшарування на границях включення-матриця виростають практично миттєво, тоді як порожнини без попередньої ЛТО розвиваються значно повільніше при всіх температурах і швидкостях деформації. Вплив структури градієнтних, плямистих і мікрокомполітичних зон насичення сталевої матриці на поширення тріщин від включень (рис. 5, в-д) пов'язаний з їх гальмуванням, що обумовлено зміною швидкості і напрямку їх розвитку завдяки наявності ділянок з різним хімічним складом, подрібнення зерен структури матриці в результаті швидкісної рекристалізації, а також наявності дисперсних «сателітних» частинок.

У п'ятому розділі вивчена можливість лазерного зміцнення зони викружки на поверхні ковзання залізничних коліс. Дослідження залізничних коліс, що мають різний профіль поверхні ковзання, показало інтенсивний знос зони викружки в процесі експлуатації. При лазерній обробці колісної сталі в режимі імпульсного випромінювання виникає структура лазерно-загартованого шару, яка несприятлива з точки зору експлуатації. При лазерній обробці в режимі безперервного випромінювання можна отримати бейнітну структуру лазерно-зміцненого шару, яка сприятлива для умов експлуатації. Перспективним є режим з потужністю лазерного променя 600 Вт і швидкістю його переміщення 5 ... 15 мм/с, особливо у поєднанні з традиційною термічною обробкою. Підвищення зносостійкості колісної сталі після лазерної обробки показує ефективність застосування лазерної технології, що дозволить не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизить ризик подрізу гребенів в процесі експлуатації. Результати, які отримані в роботі, запропоновані до використання при виготовленні залізничних коліс в умовах ТОВ «Інтерпайп менеджмент», а саме при створенні ділянки локальної лазерної обробки поверхні ковзання протокол 18.05.2017р. Результати роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрі матеріалознавства НМетАУ довідка від 27.11.2017р.

ВИСНОВКИ

У дисертації проведено теоретичне обґрунтування і нове вирішення науково-технічної задачі, яка полягає у встановленні закономірностей зміцнення сталей в результаті формування градієнтних і мікрокомполітичних зон поблизу неметалевих включень і трансформації границь включення-матриця при лазерному впливі, в експериментальних дослідженнях створення і зростання

тріщин при різних температурно-швидкісних умовах деформації, а також у вивченні можливості лазерного зміцнення зони викружки залізничних коліс.

1. На підставі аналізу науково-технічної інформації про сучасні вимоги до формування структури і властивостей сталей при лазерному зміцненні, а також ролі неметалевих включень показано, що робота, яка спрямована на вивчення закономірностей структуроутворення поблизу включень і отримання зміцненого поверхневого шару з підвищеними механічними і експлуатаційними властивостями в сталях при лазерній обробці, є актуальною.

2. Досліджено особливості контактного плавлення неметалевих включень і міжфазних границь включення-матриця, пов'язані з утворенням в гіпернерівноважних умовах зон з підвищеною щільністю дислокацій, а також електронною взаємодією включень і матриці. Вивчено особливості структури включень після швидкісного затвердіння, для якої характерні ультрадрібнозернистість, стовбчаста форма зерен, в також наявність зон зсуву. Вивчено процес утворення «сателітних» частинок, пов'язаний з формуванням при плавленні і розчиненні вихідних включень локальних ділянок типу металевих емульсійних розплавів.

3. Досліджено особливості формування зон контактної взаємодії в сталевій матриці при лазерному впливі, а також встановлені закономірності локального зміцнення цих ділянок в результаті їх легування від внутрішніх джерел (неметалевих включень). Показано, що поблизу включень створюються ліквідаційні зміцнені зони, що представляють собою градієнтні і мікрокомполітні шари різного типу: шаруваті з каскадним і «плямистим» розподілом елементів і нанотвердості, дисперсні з різним типом зміцнюючих фаз і комбіновані.

4. Досліджено особливості формування зон контактної взаємодії у включеннях при лазерному впливі: в поверхневих шарах включень створюються градієнтні і комполітні ділянки шаруватого типу з каскадним ліквідаційним розподілом елементів, «тунельні», а також дисперсні з різними типами другої фази, формування якої пов'язано з розпадом рідкого або твердого розчину, або з частковим відновленням оксидів.

5. Встановлено, що в результаті взаємного легування в системі включення-матриця створюються мікрокомполітні шари, які мають гетерогенну будову, що свідчить про трансформацію границь включення-матриця, пов'язану з гетерогенізацією їх структури. Досліджено особливості трансформації границь включення-матриця при лазерному впливі, пов'язані з електронною взаємодією фаз, зсувним сполученням кристалічних решіток, а також з фазовим розпадом і формуванням гіпернерівноважних граничних фаз. Виявлено три основні типи структури границь включення-матриця в залежності від характеру процесів, що призвели до їх трансформації при лазерному впливі.

6. Встановлено нові чинники, що визначають вплив неметалевих включень і границь включення-матриця на зміцнення сталей при лазерному впливі, пов'язані з утворенням мікрокомполітних ділянок різних типів; зменшенням середніх розмірів і об'ємної частки включень; зсувними сполученням

решіток включення і матриці; електронною взаємодією включення і матриці; утворенням «сателітних» і граничних фаз, а також трансформацією границь включення-матриця. Показано, що поєднання лазерної обробки з мікролегуванням локальних ділянок сталеві матриці від внутрішніх джерел - неметалевих включень дозволяє зменшити їх середні розміри і забрудненість сталі в зоні обробки на 30...50%, а також відкриває можливості формування міжфазних границь включення-матриця з заданими властивостями шляхом штучного регулювання ступеня розчинення вихідних включень і рівня насичення прилеглих ділянок матриці елементами включень, а також характеру структури цих зон при зміні режиму лазерного впливу.

7. Вивчено особливості утворення тріщин поблизу включень в інтервалах температур деформації 25...900 і 1000...1250 °С. Показано, що в різних температурних інтервалах деформації вплив швидкості деформації на критичний ступінь деформації $\epsilon_{кр}$, при якому утворюються тріщини поблизу включень, визначається співвідношенням процесів деформаційного зміцнення і динамічного знеміцнення сталеві матриці, а також можливістю протікання динамічних релаксаційних процесів в границях включення-матриця в результаті просковзування.

8. Встановлено вплив температурно-швидкісного режиму деформування на утворення тріщин при деформації після лазерної дії, а також енергії лазерного імпульсу і тривалості впливу на параметри зародження і розвитку тендітних розшарувань уздовж міжфазних границь включення-матриця. Значення $\epsilon_{кр}$ зростають з підвищенням температури деформації при всіх режимах лазерного впливу у порівнянні з деформацією без ЛТО, однак, максимально підвищуються при енергії лазерного імпульсу $W_{імп}$ 18...25 Дж, що вказує на наявність умов лазерної обробки, що дозволяє отримувати максимальне лазерне зміцнення сталеві матриці поблизу включень. Зі збільшенням часу попереднього лазерного впливу величина $\epsilon_{кр}$ зростає завдяки більш ефективному лазерному зміцненню границь включення-матриця.

9. Лазерний вплив призвів до своєрідної поведінки границь включення-матриця при гарячій деформації: просковзування - пластична релаксація напружень, і крихке розшарування - тендітна релаксація напружень, що обумовлено швидкісним лазерним зміцненням границь включення-матриця, що виявляється у стримуванні просковзування і зародження мікроруйнування шляхом тендітної декогезії. Показано, що при комбінованій обробці сталі ЛТО + високотемпературна деформація реалізуються два механізми зміцнення міжфазних границь включення-матриця: високошвидкісне термічне і деформаційне.

10. Вплив структури градієнтних, плямистих і дисперсних мікрокомполітичних зон насичення сталеві матриці на поширення тріщин від включень, пов'язаний з їх гальмуванням, що обумовлено зміною швидкості і напрямку їх розвитку завдяки наявності ділянок з різним хімічним складом, подрібнення зерен структури матриці в результаті швидкісної рекристалізації, а також наявності дисперсних «сателітних» частинок.

11. Дослідження зношених в процесі експлуатації залізничних коліс, що мають різний профіль поверхні кочення, показало, що протікання інтенсивних пластичних зрушень призводить до інтенсивного зносу в зоні викружки. При лазерній обробці в режимі безперервного випромінювання можна отримати бейнітну структуру лазерно-зміцненого шару, яка сприятлива для умов експлуатації. Перспективним є режим з потужністю лазерного променя 600 Вт і швидкістю його переміщення 5...15 мм/с, особливо у поєднанні з традиційною термічною обробкою. Застосування зміцнюючої лазерної технології дозволить не тільки підвищити зносостійкість поверхні ковзання залізничних коліс, а й знизить ризик підрізу гребенів в процесі експлуатації.

Результати, отримані в роботі, запропоновані до використання при виготовленні залізничних коліс в умовах ТОВ «Інтерпайп менеджмент», а саме при створенні ділянки локальної лазерної обробки поверхні ковзання протокол від 18.05.2017р. Результати роботи впроваджені у навчальний процес на кафедрі матеріалознавства НМетАУ довідка від 27.11,2017р..

Основний зміст дисертації викладено в публікаціях:

1. Gubenko S. Influence of non-metallic inclusions on the strengthening of steel under laser action / Gubenko S., Nikulchenko I. // Material Science. Non-equilibrium Phase Transformations. - Bulgaria, Varna. -2015.- N3.- P. 18 - 24.

2. Губенко С.И, Градиентные и композитные зоны контактного взаимодействия включений и стальной матрицы после лазерного воздействия. / Губенко С.И, Никульченко И.А.// Сб. науч. тр., Строительство, материаловедение, машиностроение., Днепропетровск, ГВУЗ “ПГАСА”. – 2015.- вып. 80.- С.118 - 122

3. Губенко С.И, Исследование превращений в неметаллических включениях методом высокотемпературной металлографии. / Губенко С.И, Никульченко И.А. // Сб. науч. тр., Строительство, материаловедение, машиностроение Дніпро, ГВУЗ “ПГАСА”. - 2016.- вып. 89.- С. 55 – 61

4. Губенко С.И, Влияние лазерной обработки на «горячее» и «холодное» проскальзывание включений и стальной матрицы. / Губенко С.И, Никульченко И.А. // Сб. науч. тр., Строительство, материаловедение, машиностроение Днепр, ГВУЗ “ПГАСА”. – 2017. - вып. 95.- С. 61 - 66.

5. Губенко С.И. Особенности строения зон насыщения стальной матрицы вблизи неметаллических включений после лазерного воздействия. / Губенко С.И., Никульченко И.А. // Металознавство та термічна обробка металів. – 2016. - №4. - С. 22 - 28.

6. Губенко С.И. Влияние лазерной обработки на структуру колесной стали. / Губенко С.И., Никульченко И.А. // Металознавство та термічна обробка металів. – 2017. - №1 (76). - С. 34 – 41.

7. Губенко С.І. Зміцнення металевих матеріалів при лазерній обробці. Навчальний посібник / Губенко С.І., Беспалько В.М., Нікульченко І.О. // Дніпропетровськ: НМетАУ. - 2016. - 42с.

8. Gubenko S., Structure of local zones between non-metallic inclusions and steel matrix after laser treatment. Колективна монографія. New Technologies and Achievements in Metalurgy, Materials Engineering and Production Engineering. Collective monograph./ Gubenko S., Proidak U., Nikulchenko I.// Seria Monography Chestochowa University of Technology, Poland, Chestochow. – 2015. –N48.- P. 303 – 309

9. Gubenko S., Formation of cracks near non-metallic inclusions after laser action and deformation. Колективна монографія. New Technologies and Achievements in Metalurgy, Materials Engineering and Production Engineering. / Gubenko S., Proidak U., Nikulchenko I.// Seria Monography Chestochowa University of Technology, Poland, Chestochowa. -2016.-N56.- P. 396 – 400.

10. Губенко С.И. Образование микротрещин вблизи включений при деформации после лазерного воздействия. / Губенко С.И., Никульченко И.А. // Материалы Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании», Болгария, Варна. – 2016. - X11.- С. 95 – 100.

11. Губенко С.И. О возможности влияния на когезивную прочность границ включение–матрица стали. / Губенко С.И., Никульченко И.А. // “Вісник” УМТ Українське матеріалознавче товариство ім. І.М. Францевича. -2016. - Випуск №9. - С. 40 - 48.

12. Губенко С.И., Влияние лазерной обработки на структуру и свойства колесной стали. / Губенко С.И., Никульченко И.А. // Материалы Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании», Болгария, Варна. – 2017. -X11I. - С. 65 - 70.

13. Губенко С.І. Особливості швидкісного плавлення та твердіння неметалевих включень при лазерній обробці сталі. / Губенко С.І., Беспалько В.М., Нікульченко І.О. // Металознавство та обробка металів. – 2017. - №2(87). - С. 54 - 59.

14. Губенко С.И. Скоростные плавление и кристаллизация неметаллических включений в сталях при лазерном воздействии. / Губенко С.И., Никульченко И.А.// Зб. Праць Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», Київ, НТУУ «КПІ». -2016. – XIV. - С. 297-306

15. Губенко С.И. О проблеме подреза гребней железнодорожных колес при эксплуатации. / Губенко С.И., Никульченко И.А. // Збірка праць Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», Київ, НТУУ «КПІ». - 2017. –XV. - С. 365 – 383.

16. Губенко С.И. Влияние лазерного воздействия на образование трещин вблизи включений. / Губенко С.И., Никульченко И.А. // Збірка праць міжнародної конференції молодих вчених «Молоді вчені - від теорії до практики 2017», Дніпро, НМетАУ.-2017.- VIII. - С. 99 - 102.

17. Губенко С.И. Влияние структуры зоны насыщения стальной матрицы, полученной при лазерной обработке на развитие трещин вблизи неметаллических включений при последующей деформации. / Губенко С.И.,

Беспалько В.Н., Никульченко И.А. // *Металургійна та гірничорудна промисловість.* – 2017.- №3. - С. 63 - 69.

АНОТАЦІЯ

Никульченко І.О. Вплив неметалевих включень на структуроутворення та зміцнення поверхневого шару з підвищеними механічними властивостями в сталях при лазерній обробці. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.16.01 – «Металознавство та термічна обробка металів». – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2018.

Встановлені особливості плавлення неметалевих включень і міжфазних границь включення-матриця та формування «сателітних» частинок при лазерній дії. Показані особливості структури включень після швидкісного затвердіння. Досліджено особливості формування зон контактної взаємодії в сталевій матриці та в поверхневих шарах неметалевих включень при лазерній обробці. Показано, що поблизу включень створюються ліквіційні зміцнені зони, що представляють собою градієнтні і мікрокомпозитні шари різного типу. Встановлені особливості трансформації границь включення-матриця, пов'язані з гетерогенізацією їх структури. Встановлено нові чинники, що визначають вплив неметалевих включень на зміцнення сталей при лазерному впливі. Показано, що лазерна обробка дозволяє зменшити їх середні розміри і забрудненість сталі в зоні обробки. Встановлено вплив режимів деформації та лазерної обробки на ініціювання тріщин поблизу включень. Досліджено вплив структури мікрокомпозитних зон насичення сталевій матриці на поширення тріщин від включень, пов'язаний з їх гальмуванням. Показана можливість локального зміцнення зони викружки залізничних коліс в режимі безперервного випромінювання, коли можна отримати бейнітну структуру лазерно-зміцненого шару.

Ключові слова: лазерна обробка, сталь, неметалеві включення, міжфазні границі включення-матриця, плавлення, розчинення, градієнтні та мікрокомпозитні формування, тріщини, пластична деформація.

АННОТАЦИЯ

Никульченко И.А. Влияние неметаллических включений на структурообразование и упрочнение поверхностного слоя с повышенными механическими свойствами при лазерной обработке. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов». – Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, 2018.

Установлены особенности плавления неметаллических включений и межфазных границ включения-матрица при лазерной действия. Показаны особенности структуры включений после скоростного затвердения. Изучен процесс образования «сателлитных» частиц, связанный с формированием при

плавлении и растворении исходных включений локальных участков типа металлических эмульсионных расплавов.

Исследованы особенности формирования зон контактного взаимодействия в стальной матрице и в поверхностных слоях неметаллических включений при лазерной обработке. Установлены закономерности локального упрочнения участков стальной матрицы в результате их легирования от внутренних источников (неметаллических включений). Показано, что вблизи включений создаются ликвационные зоны, представляющие собой градиентные и микрокомпозитные слои различного типа: слоистые с каскадным и «пятнистым» распределением элементов и нанотвердости, дисперсные с разным типом упрочняющих фаз, а также комбинированные. Показано, что во включениях при лазерном воздействии создаются градиентные и композитные участки слоистого типа с каскадным ликвационным распределением элементов, «туннельные», а также дисперсные с различными типами второй фазы, формирование которой связано с распадом жидкого или твердого раствора, либо с частичным восстановлением оксидов.

Установлено, что в результате взаимного легирования в системе включение-матрица создаются микрокомпозитные слои, которые имеют гетерогенное строение, что свидетельствует о трансформации границ включения-матрица, связанное с гетерогенизацией их структуры. Исследованы особенности трансформации границ включения-матрица, выявлено три основных типа структуры этих границ в зависимости от характера процессов, которые привели к их трансформации при лазерном воздействии.

Установлены новые факторы, определяющие влияние неметаллических включений и границ включения-матрица на упрочнение сталей при лазерном воздействии. Показано, что сочетание лазерной обработки с микролегированием локальных участков стальной матрицы позволяет уменьшить их средние размеры и загрязненность стали в зоне обработки на 30 ... 50%, а также открывает возможности формирования межфазных границ включения-матрица с заданными свойствами.

Изучены особенности образования трещин вблизи включений в интервалах температур деформации 25...900 и 1000...1250 ° С. Показано, что в различных температурных интервалах деформации влияние скорости деформации на критическую степень деформации, при которой образуются трещины вблизи включений, определяется соотношением процессов деформационного упрочнения и динамического разупрочнения стальной матрицы, а также возможностью протекания динамических релаксационных процессов в границах включение-матрица в результате проскальзывания. Установлено влияние температурно-скоростного режима деформирования на образование трещин при деформации после лазерного воздействия, а также энергии лазерного импульса и длительности воздействия на параметры зарождения и развития хрупких расслоений вдоль межфазных границ включение-матрица. Показано, что при энергии лазерного импульса 18...25 Дж наблюдается максимальное лазерное укрепление стальной матрицы вблизи включений, а также межфазных границ включение-матрица.

Исследовано влияние структуры микрокомпозитных зон насыщения стальной матрицы на распространение трещин вблизи включений, связанное с их торможением.

Показана возможность локального упрочнения зоны выкружки поверхности катания железнодорожных колес в режиме непрерывного лазерного излучения, когда можно получить бейнитную структуру лазерно-укрепленного слоя, что позволит повысить износостойкость указанной поверхности, а также снизит риск подреза гребней в процессе эксплуатации. Результаты, полученные в работе, предложены к использованию при изготовлении железнодорожных колес в условиях ООО «Интерпайп менеджмент».

Ключевые слова: лазерная обработка, сталь, неметаллические включения, межфазные границы включение-матрица, плавление, растворение, градиентные и микрокомпозитные формирования, трещины, пластическая деформация.

ABSTRACT

Nikulchenko I.O. Influence of non-metallic inclusions on structure formation and strengthening of surface layer with increased mechanical properties under laser treatment. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (PhD) in specialty 05.16.01 - "Metal Science and Heat Treatment of Metals". - National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepr, 2018.

The peculiarities of melting of nonmetallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries were established, as well as the formation of "satellite" particles under laser action. The peculiarities of the structure of inclusions after high-speed solidification are shown. The peculiarities of the formation of zones of contact interaction in the steel matrix and in the surface layers of nonmetallic inclusions under laser treatment were studied. It was established the peculiarities of transformation of the inclusion-matrix boundaries is associated with heterogenization of their structure. New factors that determine the influence of nonmetallic inclusions on the strengthening of steels under laser action are established. It was shown that laser treatment allows to reduce their average size and contamination of steel. The effect of deformation modes and laser treatment on the initiation of cracks near inclusions during deformation was established. The effect of the structure of the microcomposite zones of saturation of the steel matrix on the spreading of cracks from inclusions, related to their inhibition, was investigated. The possibility of local strengthening of the railway wheels scrap zone was shown, when it is possible to obtain a bainitic structure of a laser-hardened layer.

Key words: laser treatment, steel, nonmetallic inclusions, interface nonmetallic inclusion – steel matrix boundaries, melting, dissolution, gradient and microcomposite formations, cracks, plastic deformation.