

## Особливості швидкісного плавлення і твердіння неметалевих включень при лазерній обробці сталі

С. І. Губенко, В. М. Беспалько, І. О. Нікульченко

Національна металургійна академія України, Дніпро

*Досліджено особливості плавлення та кристалізації неметалевих включень у контакті з сталеву матрицю при лазерній дії. Показано, що лазерна дія представляє собою спосіб локальної зміни структури включень в поверхневих оплавлених шарах, а також властивостей поверхні неметалевих включень.*

Процеси швидкісного розчинення, оплавлення та плавлення неметалевих включень під час лазерної дії багато в чому визначають їх фазовий і структурний стан у зміцненому поверхневому шарі сталевих виробів. Оскільки лазерне випромінювання неоднорідне по перетину, неоднорідне і температурне поле в зоні опромінення [1, 2], тому на одній плямі опромінення включення одного типу можуть бути в різному стані. Відомо, що в момент лазерного впливу включення плавляться або залишаються в твердому стані [1]. Метою даної роботи був аналіз особливостей швидкісного плавлення і кристалізації неметалевих включень при лазерному впливі.

Зразки сталей R7, ШХ15, 08Ю, 60Г з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному опроміненню на установках ГОС-30М і КВАНТ-16 при напрузі накачування 2,5 кВ та енергії імпульсу 10 – 30 Дж. Швидкість нагріву в середньому становила 105 °С/с, час дії імпульсу – 1,0 – 6,0 · 10<sup>-3</sup> с, швидкість охолодження – в середньому 10<sup>6</sup> °С/с, щільність потужності випромінювання – 4 · 10<sup>4</sup> кВт/см<sup>2</sup>.

Процес трансформації неметалевих включень в момент лазерного впливу багато в чому визначається характером їх взаємодії зі сталеву матрицю через міжфазові межі [1]. Під дією лазерного випромінювання вихідна структура меж включення-матриця переходить в нерівноважний високоенергетичний стан, що викликає розвиток дисипативних процесів, пов'язаних з прагненням системи включення-матриця до стану з мінімумом вільної енергії [1]. Імовірність розчинення, оплавлення і розплавлення включень залежить від їх типу (рис. 1), при цьому розчинення включень в момент лазерного впливу може не супроводжуватися або, навпаки, супроводжуватися їх плавленням. Глибина зони розчинення включень залежить від режиму лазерної обробки: чим більше енергія імпульсу  $W$  і час впливу  $\tau_{\text{імп}}$ , тим вона більша [1].

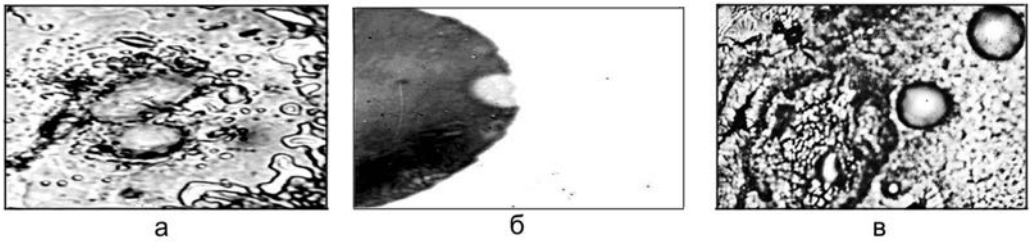


Рис. 1. Розчинення неметалевих включень при лазерному впливі. а –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 60Г, б –  $\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$ , 60Г, в –  $\text{SiO}_2$ , 08Ю.  $\times 500$ .  $\times 6$

В момент лазерного впливу процес розчинення (і плавлення) включення відбувається шляхом неупорядкованих переходів атомів включення через межу з розплавленою або твердою сталеву матрицею. Механізм надшвидкісного розчинення і плавлення включень пов'язаний з взаємним (включення  $\leftrightarrow$  матриця) швидкісним масопереносом атомів через межі розділу, які теж плавляться. При цьому аномальний швидкісний масоперенос через межі включення-матриця супроводжується обміном електронами між включеннями (донори) і матрицею (акцептор) [3]. Слід зазначити також вплив електромагнітного поля, індукованого лазерним випромінюванням, під дією якого на компоненти сплавів виникають певні сили, напрямком яких залежить від магнітних властивостей цих компонентів. Дія сил, які обумовлені електромагнітним полем, сприяє аномальному перерозподілу атомів елементів включень і сталевій матриці, що володіють різними магнітними властивостями (магнітним моментом).

Масоперенос компонентів з матриці в поверхневий шар включення може прискорити процес розчинення або плавлення, якщо розчинність цих елементів у включенні досить велика. Зміна на поверхні включення хімічного складу і досягнення межі розчинності елементів матриці створюють умови для переходу поверхневого шару включення в рідкий стан з мінімальними витратами енергії на розрив міжатомних зв'язків. Мабуть, це може бути пов'язано з спотворенням решітки включення прониклими з матриці атомами і виникненням підвищеної щільності дефектів кристалічної будови і значних напружень в поверхневому шарі. В гіпернерівноважних умовах лазерного впливу в поверхневому шарі включення, яке має контакт з розплавленою або твердою матрицею, утворюється зона з підвищеною щільністю дислокацій і вакансій. Згідно дислокаційної теорії плавлення [4], ділянки цієї зони, що представляють собою сильно спотворені області з практично розупорядкованою решіткою, можуть бути зародками рідкої фази. В межах сильно розупорядкованої ділянки на поверхні включення (зародка рідкої фази) знаходяться атоми з найбільш порушеними електронними конфігураціями. Провівши розрахунки, можна визначити критичний розмір зародку рідкої фази в поверхневому шарі включення. Енергія  $E_{\text{роз}}$  сильно розупорядкованої ділянки сферичної форми на поверхні включення визначається:

$$E_{\text{роз}} = (4\pi/3) \cdot (1 - V/V_0) \cdot r^3 \cdot Q, \quad (1)$$

де  $r$  – радіус зародка,  $V/V_0$  – приріст об'єму включення при переході його ділянок в сильно розупорядкований стан,  $Q$  – енергія, яка поглинається при переході ділянок включення в розупорядкований стан.

Послідовність утворення сильно розупорядкованих ділянок на поверхні включення, а також переміщення міжфазової межі включення-рідка матриця в процесі плавлення включення і самої межі включення-матриця можна представити таким чином (рис. 2 а, б): на поверхні включення, насиченої елементами матриці, утворюються сильно розупорядковані ділянки – зародки плавлення, які цілком переходять в рідку сталь, розчиняючись в ній і насичуючи прилеглі до включення ділянки матриці елементами включення. Положення межі включення-матриця змінюється, вона викривляється залежно від характеру взаємного масопереносу. При переході сильно розупорядкованої ділянки включення в рідкий стан змінюється площа поверхні і енергія міжфазової межі включення-матриця.

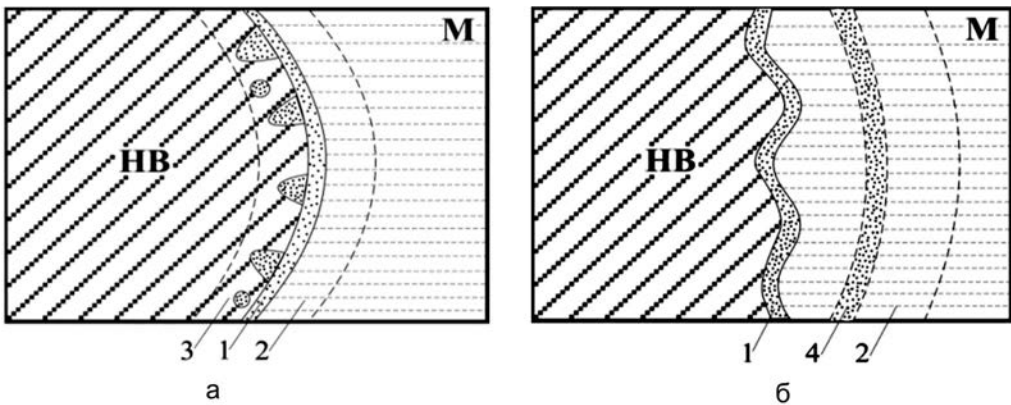


Рис. 2. Схеми лазерного плавлення включень. 1 – межа включення-матриця, 2 – зона насичення рідкої матриці елементами включення, 3 – зона насичення твердого включення елементами матриці, 4 – вихідне положення межі включення-матриця.

Такий механізм контактного розчинення і плавлення неметалевого включення і межі 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. Звісно ж, що зменшення поверхневої енергії при контактній взаємодії включення та матриці в момент його плавлення є досить значним, щоб система включення-міжфазова межа включення-матриця залишалася термодинамічно нестійкою після лазерного впливу. Реалізація такого механізму розчинення і плавлення включень визначається величиною напружень, які створюються в поверхневому шарі включення. Мабуть, в умовах високошвидкісного лазерного впливу при виникненні великих напружень можливо практично безактиваційне перетворення сильно розупорядкованого поверхневого шару включення в рідкий стан завдяки утворенню зародків рідкої фази.

В умовах імпульсного лазерного впливу релаксаційні процеси в поверхневому шарі включення практично не мають часу для розвитку, тому

значно збільшується час, який необхідний для досягнення квазірівноважних умов на міжфазовій межі включення-матриця. Внутрішні напруження в поверхневому шарі включення контролюють розвиток процесу плавлення, яке відбувається в обмеженому обсязі при збереженні контакту між включенням і матрицею. Елементарний акт релаксації напружень викликає одночасну активацію значного числа атомів включення в процес розупорядкування, яке подібно плавленню. Слід зазначити, що у включень межі зерен повинні розчинятися швидше, ніж тіло зерен.

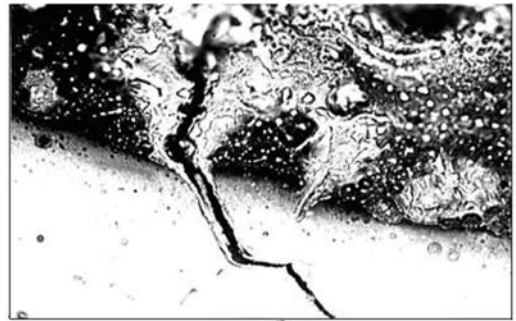
Розплавлене або оплавлене з поверхні неметалевого включення знаходиться в розплавленій сталевій матриці і утворюється локальна мікрометалургійна ванна, в якій під дією лазерного випромінювання виникають гідродинамічні потоки в умовах вихрового термокапілярного перемішування. Це вносить елементи конвективного масопереносу елементів включення і матриці в 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 [3]. У випадках плавлення включень утворюється мікрогетерогенний розплав, для якого характерна наявність самостійних кластерів або гетерофазових комплексів, які зберігали сильну хімічну взаємодію атомів, що входили до складу включень. Ці динамічні кластери є центрами швидкісної кристалізації включень при наступному охолодженні. Стійкість неметалевого включення при контактній взаємодії з рідкою матрицею залежить від ступеня відхилення системи від квазірівноважного стану в момент лазерного впливу, тобто, від різниці хімічних потенціалів компонентів у включенні і матриці.

При гартуванні з рідкого стану в поверхневому шарі включень або в їх повному об'ємі формується зона лазерної кристалізації, для якої характерні ультрадрібнозерниста, стовбчаста форма зерен, в також наявність зон зсуву (рис. 3 а). При лазерному плавленні включень виникають високий ступінь нерівноважності рідкої фази, біфуркаційна нестійкість розплаву і перехід від ламінарної течії рідини до турбулентної, що забезпечує градієнт коливального тиску на межі включення-матриця (рідкої, якщо розплавилася і включення, і матриця, або напіврідкої, якщо матриця залишилася твердою), який контролює конвективні і аномальні потоки масопереносу. Значні напруження, що виникають в тонких поверхневих шарах включення і матриці, в результаті локальних теплових спалахів лазерного випромінювання [4] у сукупності з дією реактивних сил віддачі при викиді із зони обробки рідини призводять до високотемпературної деформації рідких прошарків, що продовжується при кристалізації в процесі охолодження. У ряді включень, бувших до лазерного впливу однофазними, в процесі нерівноважної кристалізації стався фазовий розпад, обумовлений перемішуванням рідини під дією гідродинамічних сил і температурних градієнтів.

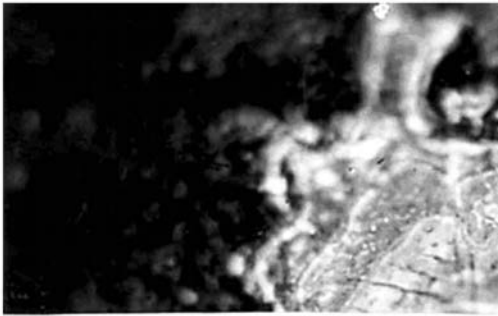
У включеннях з'явилися дисперсні частинки другої фази (рис. 3 б) або прошарки різного хімічного складу (рис. 3 в). При лазерній кристалізації у включеннях зберігається концентраційна неоднорідність, що виникла в рідкому стані і це призводить до локальних пересичень і формування нових метастабільних фаз.



а



б



в

Рис. 3. Зони швидкої кристалізації в неметалевих включеннях (а – (Fe, Mn)S, 60Г) і фазовий розпад неметалевих включень при лазерної кристалізації (б, в). x500.

Розглянуті особливості трансформації неметалевих включень при контактному лазерному плавленні зі сталеву матрицею в умовах аномального масопереносу, пов'язані з утворенням в гіпернерівноважних умовах зон з підвищеною щільністю дислокацій, а також з електронною і електромагнітною взаємодією включень і матриці. Це дозволяє створити передумови для цілеспрямованого впливу на межі включення-матриця, а також хімічний і фазовий склад поверхневого шару неметалевих включень.

### Література

1. Губенко С.И., Ошкадеров С.П. Неметаллические включения в стали. – Киев. - Наукова думка, 2016. – 528 с.
2. Денисенко О.І. Цоцко В.І., Спиридонова І.М. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки. – Фізика і хімія твердого тіла. – Т.9. – № 1 (2008). – С. 181 – 184.
3. Самсонов Г.В., Прядко И.Ф., Прядко Л.Ф. Электронная локализация в твердом теле. – Москва: Наука, 1976. – 339 с.
4. Найдич Ю.В., Перевертайло В.М., Григоренко Н.Ф. Капиллярные явления в процессах роста и плавления кристаллов. – Киев: Наукова думка, 1983. – 100 с.

Одержано 04.04.17

**С. И. Губенко, В. Н. Беспалько, И. А. Никульченко**

### **Особенности скоростного плавления и затвердевания неметаллических включений при лазерной обработке стали**

#### **Резюме**

Исследованы особенности плавления и кристаллизации неметаллических включений в контакте с матрицей сталей при лазерном воздействии. Показано, что лазерное

воздействие представляет собой способ локального изменения структуры включений в поверхностных оплавленных слоях, а также свойств поверхности неметаллических включений.

S. I. Gubenko, V. N. Bespalko, I. A. Nikulchenko

**The peculiarities of speed melting and solidification of non-metallic inclusions under laser treatment of steel**

**Summary**

The peculiarities of melting and crystallization of non-metallic inclusions in contact with steel matrix during laser treatment was investigated. It was shown that laser action is the method of local change of inclusion structure in the surface fused layers and also of the properties of non-metallic surface.

УДК 669.017.3:669.15

*Використання термоциклічної обробки під час кристалізації для подрібнення структурних складових інструментальних сталей*

Н. М. Федоркова, кандидат технічних наук  
О. А. Балакін

Національна металургійна академія України, Дніпро

*Досліджено можливість використання високотемпературної термоциклічної обробки під час кристалізації сталі з надшвидким гартуванням від температур нижче перитектичного перетворення для подрібнення зерен аустеніту та карбідних пластин в інструментальних швидкорізальних сталях для зниження енерговитрат при подальшій термічній обробці. Встановлений вплив кількості циклів ВТЦО на розміри та кількість карбідів в сталі Р6М5.*

Дана робота присвячена дослідженню впливу термоциклування на процеси структуроутворення в швидкорізальних сталях на прикладі сталі Р6М5 при кристалізації, а також особливостей структури сталі Р6М5 після термоциклування з різною тривалістю ізотермічних витримок та кількістю циклів [1]. Формування у швидкорізальній сталі однорідної подрібненої структури ще на етапі її твердіння створює необхідні передумови не тільки для значного підвищення механічних і функціональних властивостей інструментального матеріалу, а й для суттєвої економії енергоносіїв під час термічної обробки інструменту та зниження його собівартості.