

УДК 669.178:620.192.41:539.213

Лисенко О.Б., докт. фіз.-мат. наук, професор  
Калініна Т.В., канд. фіз.-мат. наук, доцент  
Проноза В.В., магістр  
Комок І.М., магістр

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, [ablisenko@ukr.com](mailto:ablisenko@ukr.com)

Удод А.М., директор-головний конструктор  
ТОВ «УНДКТИ «ДІНТЕМ», м. Дніпро

## ВПЛИВ ЛАЗЕРНОГО ПОВЕРХНЕВОГО БОРУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ

Методами рентгенофазового, металографічного та дюрOMETричного аналізів виконані дослідження фазового складу, мікроструктури та мікротвердості, що фіксуються в умовах лазерного насичення сталей бором. Операцію лазерної хіміко-термічної обробки здійснювали шляхом оплавлення обмазки з порошку аморфного бору товщиною  $\sim 100$  мкм безперервним  $\text{CO}_2$  – лазером при щільності потужності випромінювання  $7,5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. Дослідження виконували з використанням вуглецевих (45, У10) та легованих (12Х18Н10Т, 40Х13М3Ф) сталей, які після попередньої термічної обробки відрізнялися вихідною структурою: сталь 12Х18Н10Т мала однофазну структуру  $\gamma$ -твердого розчину, в структурі вуглецевих сталей, окрім твердого розчину на основі  $\alpha$ -модифікації заліза, містилися включення цементиту  $\text{Fe}_3\text{C}$ , а елементами мікроструктури сталі 40Х13М3Ф були  $\alpha$ -твердий розчин та частки карбиду  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ .

Показано, що в результаті лазерного насичення сталей бром фазовий склад легованих поверхневих шарів ускладнюється, демонструючи спадкоємний зв'язок з елементами вихідного фазового складу. Так, у зразках однофазної аустенітної сталі 12Х18Н10Т в зоні лазерного борування, поряд з легованим бором  $\gamma$ -розчином, рентгенографічно виявляється лише борид основного компонента  $\text{Fe}_2\text{B}$ . У борованій поверхні вуглецевих сталей 45 та У10 з частками цементиту фіксуються твердий розчин на основі  $\alpha$ -заліза, борид  $\text{Fe}_2\text{B}$  та ізоструктурний цементиту борокарбід  $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ , в решітці якого атоми вуглецю частково заміщуються атомами бору. Отже, наявність у вихідній структурі сталі карбідів типу  $\text{Fe}_3\text{C}$  створює передумови для кристалізації з насиченого бором розплаву ізоструктурної фази, яка окрім вуглецю містить бор. Нарешті, в сталі 40Х13М3Ф, в структурі якої після попередньої термічної обробки присутні частки карбідної фази на основі хрому  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ , елементами фазового складу лазерно-борованої поверхні є  $\alpha$ -розчин, борокарбід  $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$  з кубічною решіткою типу  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  та сполука  $\text{Fe}_2\text{B}$ , котра виявляється в лазерно-борованих шарах усіх сталей, що досліджувалися.

Наведені вище результати рентгенофазового аналізу призводять до висновку, що фазові складові матеріалу лазерної мішені завдають істотного впливу на процеси кристалізації легованого поверхневого шару, стимулюючи формування фаз-аналогів. В структурі сталей такими активними фазами, поряд з твердим розчином, є карбіди  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ , схильні до взаємодії з легуючими елементами з утворенням ізоструктурних сполук. Якщо ж матричні карбіди відсутні у вихідній структурі, то карбідна фаза не приймає участі у процесах структуроутворення і в зоні лазерного легування фіксуються лише тверді розчини на основі заліза та рівноважна сполука легуючого елемента з основним компонентом  $\text{Fe}_2\text{B}$ .

Металографічні дослідження, виконані у поперечних перерізах лазерних доріжок, показали, що мікроструктура насичених бором шарів має дрібнодендритну будову з переважним орієнтуванням дендритів твердого розчину уздовж напрямку тепловідводу. Оцінки швидкості охолодження, отримані за величиною дендритного параметра, дали значення  $\sim 10^4$ – $10^5$  К/с, які дозволяють віднести операцію лазерного поверхневого легування до технологічних різновидів гартування з рідкого стану.

Мікроструктура борованих шарів у площині обробки характеризується дисперсністю структурних складових та зональною неоднорідністю, яка пояснюється особливостями механізму масоперенесення в зоні лазерного оплавлення [1]. Металографічним проявом цього ефекту є те, що в центральних ділянках одиничних лазерних доріжок зазвичай фіксуються структури доевтектичного типу, що складаються з дендритів твердого розчину та евтектики, у той час як на периферійних ділянках, окрім евтектики, виявляються скупчення бориду  $Fe_2B$ , а також борокарбідів  $Fe_3(C,B)$  та  $M_{23}(C,B)_6$ .

Згідно з даними дюрOMETричного аналізу, найвищі значення мікротвердості  $H_{50} \approx (13-20)$  ГПа фіксуються на краях борованих смуг, а мінімальні  $H_{50} \approx (5-14)$  ГПа – в зонах з доевтектичною будовою. Усереднена дюрOMETрична характеристика  $\overline{H}_{50}$  зони лазерного борування, яку отримували обробкою результатів 100 вимірювань у двох взаємно перпендикулярних напрямках, що складають із віссю лазерної доріжки кут  $\sim 45^\circ$ , змінюється у діапазоні значень (6,9-14,4) ГПа, котрі приблизно у 2-4 рази перевищують твердість сталей у вихідному структурному стані.

Поверхнєве зміцнення за рахунок лазерного легування бором супроводжується значним (від 3 до 11 разів) покращенням стійкості сталей до абразивного зношування. Найвідчутніше цей ефект проявляється для сталей У10 та 40Х13М3Ф, що корелює з їх максимальними значеннями  $\overline{H}_{50}$ , котрі, у свою чергу, обумовлені утворенням в насичених бором шарах значної кількості високотвердих сполук  $Fe_2B$ ,  $Fe_3(C,B)$ ,  $M_{23}(C,B)_6$ .

#### Список посилань

1. Лысенко А.Б. Механизмы распределения насыщающего элемента в процессе лазерного борирования стали / А.Б. Лысенко, Г.П. Брехаря, В.В. Немошкालенко, Н.А. Сторчак // Металлофиз. новейшие технол. – 2002. – Т. 24, №10. – С. 1363-1374.