

УДК 621.785:535.211:669.15-194:669.017

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЗОН НАСЫЩЕНИЯ СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ВБЛИЗИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

ГУБЕНКО С. И.^{1*}, д. т. н., проф.,
НИКУЛЬЧЕНКО И. А.², аспир.

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 466151, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

² Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 466151, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

Аннотация. Постановка проблемы. Лазерная обработка является одним из перспективных способов поверхностного упрочнения различных деталей машин и механизмов [7]. Остаются недостаточно исследованными процессы трансформации неметаллических включений и их влияние на локальное упрочнение стальной матрицы, во многом определяющие неоднородный характер лазерного упрочнения [1; 2]. Методы воздействия на неметаллические включения представляют одно из наиболее перспективных направлений обработки сталей. Одним из эффективных путей получения сталей с благоприятными параметрами неметаллических включений является создание способов влияния на межфазные границы включения – матрица, их строение и когезионную прочность [3; 4; 12; 13]. В процессе лазерного воздействия между включением и стальной матрицей происходит скоростной обмен атомами через границу раздела в условиях аномально высокой подвижности атомов, не отвечающей условиям классической диффузии (аномальный массоперенос) [1; 2]. Для любого импульсного воздействия характерно аномальное ускорение массопереноса [2], а также неравномерное распределение температуры [5; 6; 8–11]. **Цель работы** – выявление основных закономерностей трансформации межфазных границ включение – матрица и формирования зон контактного взаимодействия при ЛТО. **Методика.** Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному нагреву на установках ГОС-30М и КВАНТ-16. Применяли методы исследования – оптическая микроскопия, электронная микроскопия, измерение нанотвердости. **Результаты.** Установлено, что при лазерном воздействии происходят плавление и скоростная кристаллизация включений, локальное микролегирование стальной матрицы, которое сопровождается формированием вблизи включений градиентных и композитных зон с различной микроструктурой и распределением нанотвердости. **Научная новизна.** Установлены особенности строения градиентных и композитных зон в стальной матрице вблизи неметаллических включений. Показано влияние неметаллических включений на упрочнение сталей при лазерном воздействии. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит разработать методы и режимы лазерной обработки, позволяющие влиять на размеры, состав, структуру и распределение неметаллических включений в сталях с целью повышения механических свойств.

Ключевые слова: сталь; неметаллические включения; упрочнение; лазерное воздействие

ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ ЗОН НАСИЧЕННЯ СТАЛЕВОЇ МАТРИЦІ ПОБЛИЗУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ПІСЛЯ ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ

ГУБЕНКО С. І.^{1*}, д. т. н., проф.,
НИКУЛЬЧЕНКО І. О.², аспір.

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 466151, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

² Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 466151, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

Анотація. Постановка проблеми. Лазерна обробка – один із перспективних способів поверхневого зміцнення різних деталей машин і механізмів [7]. Залишаються недостатньо дослідженими процеси трансформації неметалевих включень і їх вплив на локальне зміцнення сталеві матриці, які багато в чому визначають неоднорідний характер лазерного зміцнення [1; 2]. Методи впливу на неметалеві включення становлять один із найперспективніших напрямків обробки сталей. Один з ефективних шляхів отримання сталей із сприятливими параметрами неметалевих включень – це створення способів впливу на міжфазні границі включення – матриця, їх будову і когезійну міцність [3; 4; 12; 13]. У процесі лазерного впливу між включеннями і сталеві матрицею відбувається швидкісний обмін атомами через границю розділу в умовах аномально високої рухливості атомів, що не відповідає умовам класичної дифузії (аномальний массоперенос) [1; 2]. Для будь-якого імпульсного впливу властиве аномальне прискорення масопереносу [2], а також нерівномірний розподіл температури [5; 6; 8–11]. **Мета роботи** – виявлення основних закономірностей трансформації міжфазних границь включення – матриця

і формування зон контактної взаємодії під час ЛТО. **Методика.** Матеріалами для досліджень служили промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному нагріванню на установках ДОС-30М і КВАНТ-16. Застосовували методи дослідження – оптична мікроскопія, електронна мікроскопія, вимір нанотвердості. **Результати.** Встановлено, що за лазерного впливу відбуваються плавлення і швидкісна кристалізація включень, локальне легування сталеві матриці, яке супроводжується формуванням поблизу включень градієнтних і композитних зон із різною мікроструктурою і розподілом нанотвердості. **Наукова новизна.** Встановлено особливості будови градієнтних і композитних зон у сталевій матриці поблизу неметалевих включень. Показано вплив неметалевих включень на зміцнення сталей за лазерної дії. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити методи і режими лазерної обробки, що дозволяють впливати на розміри, склад, структуру і розподіл неметалевих включень у сталях із метою поліпшення механічних властивостей.

Ключові слова: сталь; неметалеві включення; зміцнення; лазерна дія

PECULIARITIES OF STRUCTURE OF STEEL MATRIX SATURATION NEAR NON-METALLIC INCLUSIONS AFTER LASER ACTION

GUBENKO S.I.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NIKULCHENKO I.O.², *postgrad.*

^{1*} Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin av., 4, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5427-1154

² Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin av., 4, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2184-8230

Abstract. Problem definition. Laser treatment is one of the promising methods of surface strengthening of various machine and mechanisms parts [7]. Processes of transformation of non-metallic inclusions and their impact on the local strengthening of the steel matrix, largely determine the heterogeneous nature of laser hardening are remained insufficiently [1; 2]. Methods impact on the non-metallic inclusions are one of the most promising areas of steels processing. One of effective way of producing steels with favorable parameters of non-metallic inclusions is to provide the methods of influence on the interphase boundaries inclusion-matrix and their cohesive strength [3; 4; 12; 13]. In the process of laser action between inclusion and steel matrix the fast exchange of atoms through the interface boundary in terms of abnormally high mobility of atoms has place, which does not meet the conditions of the classical diffusion (an abnormal mass transport) [1; 2]. For any impulse action the abnormal acceleration of mass transfer is characterized [2], as well as the uneven distribution of temperature [5; 6; 8–11]. **The aim of work** is to identify the basic laws of the transformation of interfaces inclusion-matrix boundaries and also the formation of zones of contact interaction with the laser treatment. **Methods.** Materials for the study were manufactured steel containing various non-metallic inclusions. Samples of various steels with a pre-polished surface was subjected to laser heating installations SES-30M and QUANTUM-16. We used research methods – optical microscopy, electron microscopy, measurement of nanohardness. **Results.** It was found that the laser action occur melting and crystallization speed switching, local micro-alloying steel matrix, which is accompanied by the formation of near inclusions the gradient and composite zones with different microstructures and distribution of nanohardness. **Scientific novelty.** The peculiarities of the structure of composite and gradient zones in the steel matrix near the non-metallic inclusions was founded. The influence of nonmetallic inclusions on the strengthening of steel by laser irradiation was shown. **Practical significance.** Using the results obtained enable to develop methods and laser processing modes allowing to influence the size, composition, structure and distribution of non-metallic inclusions in steels in order to improve the mechanical properties.

Keywords: steel; non-metallic inclusions; hardening; laser treatment

Введение

В процессе лазерного воздействия между включением и стальной матрицей происходит скоростной обмен атомами через границу раздела в условиях аномально высокой подвижности атомов, не отвечающей условиям классической диффузии (аномальный массоперенос) [1; 2]. Движущей силой обмена атомами через границу является перепад химических потенциалов элементов, содержащихся во включении и окружающей матрице. Коэффициенты диффузии атомов решетки (железа) и атомов замещения вблизи температур

плавления сталей в случае лазерного облучения превышают равновесную величину на порядок [7], коэффициенты диффузии атомов внедрения возрастают еще больше. Для любого импульсного воздействия характерно аномальное ускорение массопереноса [2], а также неравномерное распределение температуры [5; 6; 8–11].

Целью работы является выявление основных закономерностей трансформации межфазных границ включение – матрица и формирования зон контактного взаимодействия при ЛТО.

В неравновесных условиях лазерного воздействия направленный массоперенос элементов через границы включение – матрица

является комплексной величиной, зависящей от уровня и неоднородности достигаемых температур, напряжений, химических потенциалов элементов и других факторов.

Материалы и методики

Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному облучению на установках ГОС-30М и КВАНТ-16 при энергии импульса 10, 18, 25 и 30 Дж.

Скорость нагрева составляла 10^5 °C/с, время воздействия импульса – (1,0; 2,5; 3,6; 4,2 и 6,0) 10^{-3} с, скорость охлаждения – 10^6 °C/с, плотность мощности излучения – $4 \cdot 10^4$ кВт/см². Проводили измерение нанотвердости на приборе “Nano Indenter II”.

Результаты исследований и их обсуждение

В соответствии с принципами неравновесной термодинамики при лазерном воздействии система взаимодействующих объектов включение – межфазная граница – матрица претерпевает стадию движения через границу квазичастиц – фононов, а затем – атомов компонентов включения и (или) матрицы.

Ранее было установлено [1; 2], что массоперенос через границы включение – матрица приводит к насыщению зон матрицы, прилегающих к включениям, компонентами включений, причем и в случаях оплавления включений и матрицы, и в твердом состоянии. Поверхность включений, особенно в случаях их оплавления, насыщается

компонентами матрицы благодаря движению атомов матрицы в противоположном направлении, что было подтверждено результатами микрорентгеноспектрального анализа и ОЖЕ-спектроскопии [1; 2].

В условиях резкого охлаждения атомы элементов, перешедшие из включений в матрицу, фиксируются в твердом растворе. Зоны матрицы вблизи включений представляют собой пересыщенный компонентами включений твердый раствор [1–4; 12; 13]. Однако эти процессы нуждаются в дальнейших исследованиях.

Анализ участков стальной матрицы, прилегающих к включению, показал, что их структура неоднородна. Возможны несколько вариантов их строения, выявленного тепловым травлением в процессе лазерного воздействия. Это может быть одна зона насыщения (рис. 1 а–д), либо две (рис. 1 е–з) или три (рис 1 и), при этом в неметаллическом включении может вовсе не быть приповерхностной зоны насыщения, либо может быть одна или две зоны, что согласуется с результатами, приведенными в работах [1–4; 12; 13].

Количество зон насыщения в матрице вблизи включений не зависело от типа и состояния включения в момент лазерного воздействия, однако зависело от режима лазерной обработки: чем выше энергия импульса и больше время воздействия, тем больше тенденция к появлению многослойных формирований.

Это обусловлено активацией процесса массопереноса элементов из включений в матрицу при увеличении энергии лазерного импульса и увеличении возможности его реализации при росте продолжительности воздействия.

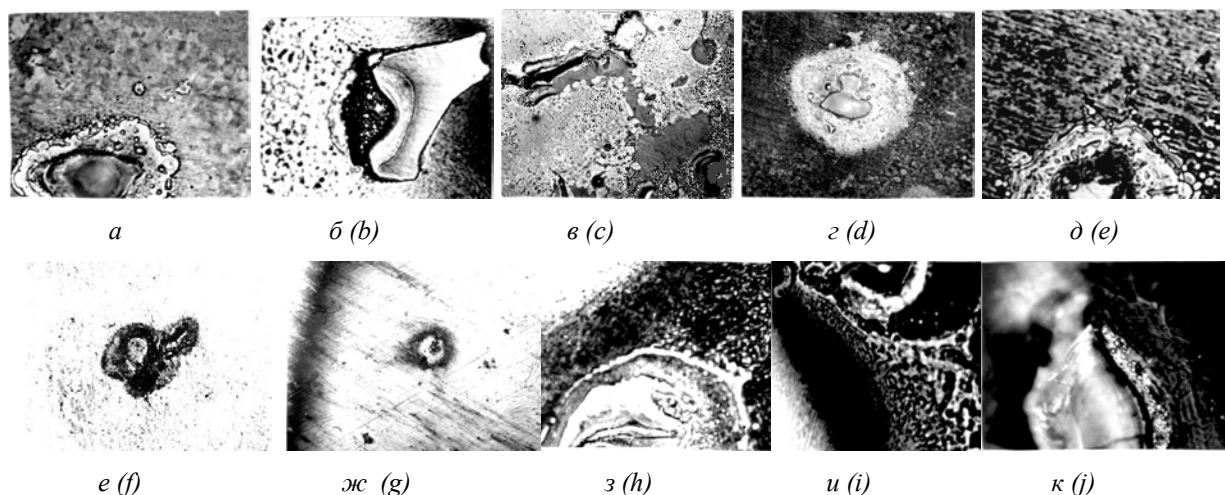


Рис. 1. Зоны взаимодействия матрицы с неметаллическим включением при лазерном воздействии: а – Al_2O_3 , R7; б – $(Fe, Mn)S$, 08кп; в – $FeS-(Fe, Mn)S$, НБ-57; г – $TiCN$, 08Т; д – SiO_2 , Э3; е – $(Fe, Mn)O$, R7; ж – Al_2O_3 , R7; з, и – $FeS-(Fe, Mn)S$, НБ-57; к – Al_2O_3 , 08Ю; а, б – $\times 500$; в–и – $\times 500 \times 6$ / Fig. 1. The zone of interaction of a matrix with non-metallic inclusion during laser exposure: а – Al_2O_3 , R7; б – $(Fe, Mn)S$, 08кп; в – $FeS-(Fe, Mn)S$, NB-57; г – $TiCN$, 08Т; д – SiO_2 , E3; е – $(Fe, Mn)O$, R7; г – Al_2O_3 , R7; h, i – $FeS-(Fe, Mn)S$, NB-57; j – Al_2O_3 , 08Yu; а, b – $\times 500$; c-i $\times 500 \times 6$

Участки матрицы, прилегающие к включению, отличаются распределением химических элементов. При наличии двух или трех зон насыщения наблюдали перепады концентраций с сохранением постепенного уменьшения содержания элементов в пределах каждой зоны (рис. 2 а). Таким образом, при наличии нескольких зон насыщения в матрице наблюдали своеобразный каскад концентраций элементов в зонах взаимодействия матрицы и включения при удалении от включения. Соотношения концентрации компонентов в этих зонах были разными и колебались в пределах 1,2...1,8 раза, что связано, по-видимому, с неоднородным полем температур и напряжений, а также волновым характером скоростного массопереноса в условиях импульсного лазерного воздействия, представляющего собой локальный тепловой удар [7].

Действие лазерного импульса подобно взрыву, при этом происходит волновая релаксация напряжений. Здесь можно предположить, что волны релаксации напряжений сопровождают массоперенос: первая волна – самая дальняя; вторая – короче по расстоянию действия от включения и накладывается на зону действия первой волны; третья – соответственно еще короче и накладывается на зоны действия первых двух волн. Следует отметить еще один тип распределения элементов включения в прилегающих участках матрицы. При коллективном массопереносе, связанном с растворением в матрице зерен включения, наблюдали не каскадное, а «пятнистое» распределение элементов включения в прилегающих участках матрицы (рис. 2 б), что косвенно подтверждает возможность существования механизма растворения (плавления) включений с ультрадисперсной структурой.

Результаты изучения распределения нанотвердости матрицы непосредственно в участках, прилегающих к включениям, показали, что вблизи включений (одна зона, либо первая зона при наличии нескольких зон насыщения) нанотвердость значительно превышает среднее ее значение для матрицы вдали от включений (табл. 1). Величина нанотвердости матрицы зависит

от типа стали, поскольку степень упрочнения стали в процессе лазерного облучения и закалки зависит от ее состава и структуры, определяющих механизм упрочнения. В первой (или единственной) зоне насыщения значения (H_M^8) в 1,45...1,8 раз выше (коэффициент K_B), чем в матрице вдали от включения, что близко к результатам, полученным в работах [1; 2] при определении микротвердости матрицы вблизи включений без разделения отдельных зон насыщения. Затем во второй и третьей зонах значения нанотвердости ниже, чем в первой зоне, но превышают величины H_M вдали от включений соответственно в 1,25...1,64 и 1,1...1,3 раза. Таким образом, наблюдается своеобразный каскад значений нанотвердости матрицы при удалении от включений.

Величина нанотвердости матрицы во всех зонах насыщения вблизи включения и значение коэффициента K_B зависят от состояния включения и матрицы в момент облучения. Значения H_M^8 и K_B во всех зонах максимальны при оплавлении всех видов включений и матрицы, уменьшаются в случаях оплавления матрицы у твердых включений и минимальны в случаях твердого состояния включений и матрицы. Это связано с тем, что максимально элементами включений насыщается жидкая матрица при оплавлении или полном расплавлении включений. В случаях оплавления включений оксидов, силикатов, сульфидов в момент лазерного воздействия нанотвердость матрицы вблизи включений выше, чем вблизи твердых включений, а значения коэффициентов K_B во всех зонах возрастают. Увеличению значений H_M^8 и K_B во всех зонах способствует насыщение матрицы элементами включений и их фиксирование в твердом растворе. Степень насыщения матрицы вблизи включений во второй и третьей зонах в среднем меньше, чем непосредственно вблизи поверхности включения (в первой зоне), о чем свидетельствует и различие значений нанотвердости стальной матрицы и коэффициентов K_B ($K_B = H_M^8 / H_M$ [2; 3]).

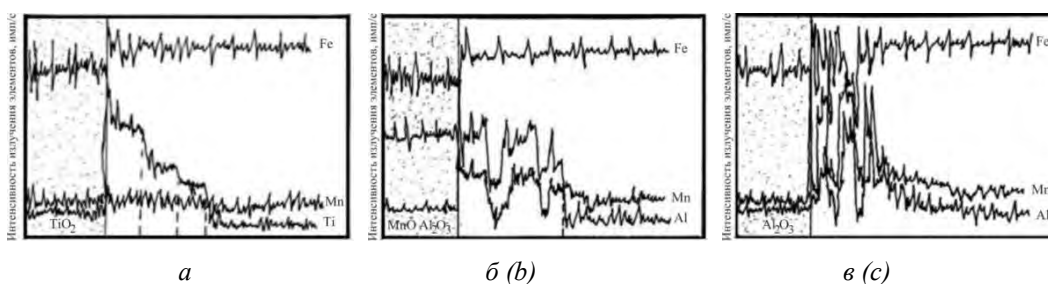


Рис. 2. Распределение элементов в зонах насыщения матрицы вблизи включения после лазерного воздействия / Fig. 2. The distribution of elements in the zones of saturation in the matrix near inclusions after laser exposure

Таблиця 1

Значения нанотвердости зон насыщения матрицы вблизи включений (H_m^{δ}) и вдали от них (H_m), а также коэффициента K_b (в скобках) при энергии импульса 25 Дж и времени воздействия $3,6 \cdot 10^{-3}$ с / The values of nanohardness of saturation zones in the matrix near inclusions (H_m^{δ}) and away from them (H_m) and a coefficient K_b (in parentheses) when the pulse energy 25 J, and the exposure time is $3,6 \cdot 10^{-3}$ sec

Включение	Состояние включения*	Сталь, $H_m, \times 10, \text{ МПа}$	Состояние матрицы *	$H_m^{\delta}, \times 10, \text{ МПа}$ в зонах		
				1	2	3
Al ₂ O ₃ , MgO·Al ₂ O ₃	опл.	R7, 620	ж	1 100(1,77)	–	–
				1 085(1,75)	942(1,52)	744(1,2)
SiO ₂	т	R7, 620	ж т	1 080(1,74)	858(1,38)	–
				960(1,55)	–	–
MnO·SiO ₂ FeO·SiO ₂	ж	НБ-57, 748	ж	1 130(1,51)	1 050(1,40)	–
				1 260(1,68)	950(1,27)	810(1,08)
TiN, TiCN	т, опл.	08Т, 280	ж	502(1,79)	380(1,36)	–
FeO – TiO ₂	опл.	08Т, 280	т	460(1,64)	385(1,38)	–
(Mn,Fe)S	ж	08кп, 260	т ж	395(1,52)	–	–
				4 30(1,65)	374(1,44)	320(1,23)

*Примечание: т – твердое; ж – жидкое; опл. – оплавление

Зависимость нанотвердости первой (или единственной) зоны насыщения матрицы, прилегающей к включению, для всех используемых длительностей импульса имеет немонотонную зависимость (табл. 2), что свидетельствует о существовании определенного интервала значений энергии, в котором наблюдается максимальное упрочнение локальных слоев матрицы.

Главным фактором упрочнения прилегающих к включениям участков матрицы является ее микролегирование от внутренних источников, которыми выступают неметаллические включения. Создание каскада зон насыщения матрицы вблизи включений путем формирования локальных ликвационных зон – это формирование

своеобразных слоистых композитов вблизи неметаллических включений. Следует отметить, что структура этих зон может быть однофазной (пересыщенные твердые растворы), но часто в зонах наблюдаются дисперсные микрофазы и нанофазы – «сателлитные» частицы (рис. 1 а, в–д, з, к). Как правило, химический состав этих частиц связан с исходным включением, но несколько отличается от него благодаря участию в их формировании компонентов матрицы (рис. 2 в). Встречаются также частицы, имеющие метастабильный состав, что связано с их образованием в условиях скоростного лазерного воздействия.

Таблиця 2

Влияние энергии лазерного излучения на нанотвердость матрицы вблизи включения MnO·Al₂O₃ в стали R7 / The influence of laser energy on the nanohardness of the matrix near the inclusion of MnO·Al₂O₃ in steel R7

$\tau_{\text{имп}} \cdot 10^{-3}, \text{ с}$	$W_{\text{имп}}, \text{ Дж}$			
	10	18	25	30
1,0	820	1 170	1 060	910
3,6	850	1 140	1 100	950

Главным фактором упрочнения прилегающих к включениям участков матрицы является ее микролегирование от внутренних источников, которыми выступают неметаллические включения. Создание каскада зон насыщения матрицы вблизи включений путем формирования локальных ликвационных зон – это формирование своеобразных слоистых композитов вблизи неметаллических включений. Следует отметить, что структура этих зон может быть однофазной (пересыщенные твердые растворы), но часто в зонах наблюдаются дисперсные микрофазы и нанофазы – «сателлитные» частицы

(рис. 1 а, в–д, з, к). Как правило, химический состав этих частиц связан с исходным включением, но несколько отличается от него благодаря участию в их формировании компонентов матрицы (рис. 2 в).

Встречаются также частицы, имеющие метастабильный состав, что связано с их образованием в условиях скоростного лазерного воздействия.. Процесс образования «сателлитных» включений может быть также связан с уменьшением растворимости элементов, перешедших из включения, в зонах обогащения жидкой и твердой матрицы при резком охлаждении. В результате вблизи исходного

включения в матрице возникает композитная прослойка с дисперсными частицами.

Появление «сателлитных» частиц способствует созданию дисперсных композитных слоев, либо при наличии в матрице нескольких зон насыщения – комбинированных слоисто-дисперсных участков вблизи включений. При этом варьирование режима лазерного воздействия позволит регулировать формирование этих композитных систем.

Таким образом, микронеоднородное упрочнение стальной матрицы при лазерном воздействии вблизи включений связано не только с действием тех же факторов, что и вдали от включений [1–4; 12; 13], но также с возникновением вблизи включений термических напряжений и повышенного количества дефектов кристаллического строения; локализацией высокоскоростных релаксационных процессов; но также с формированием градиентных и композитных зон различных типов (слоистых каскадного типа, пятнистых, дисперсных), что связано с насыщением и пересыщением

прилегающих участков матрицы компонентами включений, и образованием новых микрочастиц. По-видимому, наличие каскадных зон свидетельствует о волновой природе насыщения матрицы элементами включения.

Описанные процессы свидетельствуют о локальной гетерогенизации микроструктуры матрицы стали вблизи включений при лазерном воздействии.

Выводы

При лазерном упрочнении сталей, содержащих неметаллические включения, происходит совмещение лазерной термообработки с микролегированием локальных участков матрицы от внутренних источников – неметаллических включений. В стальной матрице вблизи включений в момент лазерного воздействия формируются локальные градиентные и композитные зоны, определяющие уровень лазерного упрочнения сталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали : монография / С. И. Губенко. – Москва : Металлургия, 1991. – 225 с. – Режим доступа : <http://www.metallurgy-publishers.net>
2. Неметаллические включения в стали : монография / [С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко]. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с. – Режим доступа : <http://www.art-press.com.ua/home>
3. Губенко С. И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение – матрица при высокоэнергетических обработках / С. И. Губенко // Металлофизика, новейшие технологии. – 2014. – Т. 36. – № 3. – С. 287–315. – Режим доступа : <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/index.html>
4. Губенко С. И. Градиентные и композитные зоны контактного взаимодействия включений и стальной матрицы после лазерного воздействия / С. И. Губенко, И. А. Никульченко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2015. – Вып. 80. – С. 118–122. – Режим доступа : http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=1&S21COLORTERMS=0&S21STR=%D0%9670492:%D0%95%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3,_%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BB,_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF.%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD
5. Денисенко О. І. Формування поля температур тонкої стрічки під впливом на її поверхню дисперсної фази двофазного струменя / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 9. – № 4 (2008). – С. 901–904. – Режим доступа : http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural/phkhtt/2008_1_4/0904-42.pdf
6. Денисенко О. І. Розподіл температури одновимірного зразка в умовах місцевої термообробки / О. І. Денисенко, В. І. Цоцко, І. М. Спиридонова, Б. Г. Пелешенко // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 9. – № 1 (2008). – С. 181–184. – Режим доступа : http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/Natural/phkhtt/2008_1_4/0901-29.pdf
7. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов : монография / [П. А. Леонтьев, Н. Т. Чеканов, М. Г. Хан]. – Москва : Металлургия, 1986. – 142 с. – Режим доступа : <http://www.metallurgy-publishers.net>
8. Цоцко В. И. Температурные характеристики поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей в условиях линейного нагрева поверхности / В. И. Цоцко, А. И. Денисенко // Вісник Дніпропетровського національного університету. – 2004. – № 2. – С. 72–77. – Режим доступа : http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN1&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=njuu_dstu&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=1&S21COLORTERMS=0&S21STR=%D0%9672605%2F2004%2F3
9. Цоцко В. И. Аналитическое моделирование поля температур одномерного образца в условиях местной термоциклирующей обработки / В. И. Цоцко, И. М. Спиридонова, Б. И. Пелешенко, А. И. Денисенко // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. – Т. 10. – Дніпропетровськ : «Системні технології», 2007. – С. 170–178. – Режим доступа : http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural/Spm/2007_10/15.pdf
10. Цоцко В. И. Аналитическое моделирование температурного поля одномерного образца в условиях местной термообработки / В. И. Цоцко, И. М. Спиридонова, Б. И. Пелешенко, А. И. Денисенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 3 (56). – Т. 2. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 22–29. – Режим доступа : http://st.nmetau.edu.ua/journals/56/29_a_ru.pdf
11. Цоцко В. И. Нестационарное поле температур в металле в условиях импульсного энергетического воздействия / В. И. Цоцко, Б. И. Пелешенко, А. И. Денисенко // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2009. – С. 202–208. – Режим доступа : http://info.donntu.org/el_izdan/geolog/news/35_2010-01-11_9-06-22/fistech09.pdf
12. Structure of local zones between non-metallic inclusions and steel matrix after laser treatment : collective monograph /

[S. Gubenko, U. Proidak, I. Nikulchenko] // New Technologies and Achievements in Metallurgy, Materials Engineering and Production Engineering. – Chestochowa : Chestochowa University of Technology, 2015. – Pp. 303–309. – Режим доступа : <http://nukat.edu.pl/lib/item?id=chamo:3489692&theme=nukat>

13. Gubenko S. Influence of non-metallic inclusions on the strengthening of steels under laser action / S. Gubenko, I. Nikulchenko // Material Science. Non-Equilibrium Phase Transformations. – Bulgary, Varna, 2015. – № 3. – Pp. 18–24. – Режим доступа : <http://www.material-science.eu/journal.html>

REFERENCES

1. Gubenko S.I. *Transformatsija nemetallicheskih vkluchenij v stali* [Transformation of non-metallic inclusions in steel]. Moscow : Metallurgy Publ., 1991, 225 p. (in Russian).
2. Gubenko S.I., Parusov V.V. and Derevianchenko I.V. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk : ART-PRESS Publ., 2005, 536 p. (in Russian).
3. Gubenko S.I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij I mizhphasnih granits vcluchenie-matritsa pri visokoenergeticheskikh obrabotkah* [Possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries under high-energy treatments]. *Metalliphizika, noveishie tehnologii* [Metal Physics, New Technologies]. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 287–315. (in Russian).
4. Gubenko S. and Nikulchenko I. *Gradientnie I kompozitnie zoni kontaktного vzaimodeistvija vkluchenij I stalnoi matritsi posle lazernogo vozdeistvija* [Gradient and composite zones of contact interaction of inclusions and steel matrix after laser action]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering]. 2015, no. 80, pp. 118–122. (in Russian).
5. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Formuvannia polja temperature tonkoi strichki pid vplyvom na ii poverhnu dispersnoi fazi dvofaznogo strumenia* [Formation of temperature field of the thin strip under the influence of the surface of the dispersed phase two-phase stream]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no.4, pp. 901–904. (in Ukrainian).
6. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimrnogo zrazka v umovah mistsevoi termoobrobki* [Temperature distribution of the one-dimensional sample in terms of local heat treatment]. *Fizika i himija tverdogo tila* [Physics and Chemistry of Solid State]. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181–184. (in Ukrainian).
7. Leontjev P.A., Chekanov N.T. and Han M.G. *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1986, 142 p. (in Russian).
8. Tsotsko V.I. and Denisenko A.I. *Temperaturnie harakteristiki poverhnostnogo sloja nizkouglerodistih stalej v uslovijah lineinogo nagreva poverhnosti* [Temperature characteristics of the surface layer of low-carbon steels in terms of a linear surface heating]. *Visnik Dnepropetrovskogo nationalnogo universiteta* [Bulletin of Dnepropetrovsk National University]. 2004, no. 2, pp. 72–77. (in Russian).
9. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruuschej obrabotki* [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Suchasni problem metallurgii. Naukovi pratsi* [Modern problems of metallurgy. Proceedings]. Dnepropetrovsk : Sistemnie Tehnologii, 2007, vol. 10, pp. 170–178. (in Russian).
10. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obraztsa v uslovijah mestnoj termotsikliruuschej obrabotki* [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Siustemnie tehnologii* [System technologies]. Dnepropetrovsk, 2008, issue 3 (56), vol. 2, pp. 22–29. (in Russian).
11. Tsotsko V.I., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Nestatsionarnoe pole temperature v metalle v uslovijah impulsnogo energetichskogo vozdeistvija* [Steady temperature field in the metal under the conditions of pulsed energy impact]. *Visokoenergeticheskaja obrabotka materialov* [High-energy treatment of materials]. Dnepropetrovsk : ART-PRESS, 2009, pp. 202–208. (in Russian).
12. Gubenko S., Proidak U. and Nikulchenko I. Structure of local zones between non-metallic inclusions and steel matrix after laser treatment. *New Technologies and Achievements in Metallurgy. Materials Engineering and Production Engineering* : Collective monograph. Chestochowa University of Technology, Chestochowa, 2015, pp. 303–309.
13. Gubenko S. and Nikulchenko I. Influence of non-metallic inclusions on the strengthening of steels under laser action. *Material Science. Non-Equilibrium Phase Transformations*. Bulgary, Varna, 2015, no. 3, pp. 18–24.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина).

Поступила в редколлегию 04.11.2016

Принята в печать 07.11.2016