

УДК 669.18

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЯХ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

ГУБЕНКО С.И. <sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
НИКУЛЬЧЕНКО И.А. <sup>2</sup>, *аспирант*

<sup>1\*</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 3748 357 orcid.org/0000-0003-2184-8230

**Аннотация.** *Цель.* Представляет интерес исследовать превращения в неметаллических включениях при высокотемпературном вакуумном нагреве и лазерной обработке сталей. Необходимо проанализировать особенности влияния медленного и скоростного нагрева на различные превращения во включениях разных типов, что может вызвать изменение свойств самих включений и сталей после термической либо лазерной обработки. Необходимо также выявить возможности управляемой гетерогенизации структуры неметаллических включений и стальной матрицы при формировании локальных градиентных и композитных зон контактного взаимодействия в системах включение-матрица. Целью работы является выявление основных видов трансформации неметаллических включений с помощью высокотемпературной металлографии и лазерного нагрева. *Методика.* Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали нагреву в вакууме на установках ИМАШ-5С и Рейнхарт, а также лазерному нагреву на установках ГОС-30М и КВАНТ-16. Применяли методы исследования – вакуумная металлография, петрография и оптическая микроскопия (Неофот-21). *Результаты.* Установлено, что при нагреве в вакууме во включениях происходят различные превращения, которые обусловлены полиморфизмом, переходом в более стабильное состояние, выделением и растворением второй фазы, изменением состава. Эти превращения вызывают напряжения, способствующие локальной спонтанной рекристаллизации. При высокотемпературном нагреве происходит диссоциация и растворение включений, что сопровождается локальным насыщением стальной матрицы каскадного типа и выделением «сателлитных» включений. Перераспределение включений при высокотемпературном нагреве способствует декорированию высокотемпературных границ и проявлению структурной наследственности. При лазерном воздействии происходят плавление и скоростная кристаллизация включений, сдвиговые полиморфные превращения во включениях переход в более либо менее стабильное состояние, выделение и растворение второй фазы, изменение состава, восстановление металлов из оксидов, образование градиентных и композитных микроразнов. Исследованы особенности превращений во включениях при скоростном нагреве в условиях лазерного воздействия, позволяющем выявлять высокотемпературную структуру включений, находящихся на полированной поверхности. Обсуждаются особенности превращений во включениях при обычном и скоростном нагреве. *Научная новизна.* Установлены особенности превращений в неметаллических включениях при разных условиях нагрева и охлаждения, которые проходят при взаимодействии неметаллических включений и стальной матрицы. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволит разработать методы и режимы различных видов обработки, позволяющие влиять на размеры, состав, структуру и распределение неметаллических включений в сталях с целью повышения механических свойств.

*Ключевые слова:* сталь, неметаллические включения, высокотемпературная металлография, лазерное воздействие

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЕНЬ В НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕННЯХ МЕТОДОМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ МЕТАЛОГРАФІЇ

ГУБЕНКО С.І. <sup>1\*</sup>, *д.т.н, проф.*,  
НИКУЛЬЧЕНКО І.О. <sup>2</sup>, *аспірант*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38(056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 3748 357 orcid.org/0000-0003-2184-8230

**Анотація.** *Мета.* Представляє інтерес дослідити перетворення в неметалевих включеннях при високотемпературному вакуумному нагріві та лазерній обробці сталей. Необхідно проаналізувати особливості впливу повільного та швидкісного нагріву на різноманітні перетворення у включеннях різних типів, що може викликати зміну властивостей самих включень і сталей після термічної або лазерної обробки. Необхідно також виявити можливості управління гетерогенізацією структури неметалевих включень і стальної матриці при формуванні локальних градієнтних і композитних зон контактної взаємодії в системах включення-матриця. Метою роботи є визначення основних закономірностей трансформації неметалевих включень за допомогою високотемпературної металогії та лазерного нагріву. *Методика.* Матеріалами для досліджень були

промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали нагріву у вакуумі на установках ІМАШ-5С і Рейнхарт, а також лазерному нагріву на установках ГОС-30М і КВАНТ-16. Використовували методи дослідження – вакуумна металографія, петрографія і оптична мікроскопія (Неофот-21). **Результати.** Установлено, що при нагріві у вакуумі у включеннях проходять різні перетворення, що обумовлені поліморфізмом, переходом в більш стабільний стан, виділенням та розчиненням другої фази, зміною складу. Ці перетворення викликають напруження, які сприяють локальній спонтанній рекристалізації. При високотемпературному нагріві проходить дисоціація та розчинення включень, що супроводжується локальним насиченням сталльної матриці каскадного типу та виділенням «сателітних» включень. Перерозподіл включень при високотемпературному нагріві сприяє декоруванню високотемпературних границь і прояву структурної спадковості. При лазерній дії проходить плавлення та швидкісна кристалізація включень, зсувові поліморфні перетворення у включеннях, перехід у більш або менш стабільний стан, виділення та розчинення другої фази, зміна складу, відновлення металів з оксидів, формування градієнтних і композитних мікрозон. Досліджені особливості перетворень у включеннях при швидкісному нагріві в умовах лазерної дії, яка дозволяє виявляти високотемпературну структуру включень, які знаходяться на полірованій поверхні. Обговорюються особливості перетворень у включеннях при звичайному та швидкісному нагріві. **Наукова новизна.** Установлені особливості перетворень в неметалевих включеннях при різних умовах нагріву та охолодження, котрі проходять при взаємодії неметалевих включень і сталльної матриці. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити методи і режими різних обробок, які дозволять впливати на розміри, склад, структуру і розподіл неметалевих включень в сталях з метою підвищення механічних властивостей.

*Ключові слова:* сталь, неметалеві включення, високотемпературна металографія, лазерна дія

## INVESTIGATION OF TRANSFORMATIONS IN NON-METALLIC INCLUSIONS BY HIGH-TEMPERATURE METALLOGRAPHY

GUBENKO S.I.<sup>1\*</sup>, *dr. Sc. (tech.), prof.*  
 NIKULCHENKO I.O.<sup>2</sup>, *post graduate*

<sup>1\*</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, phone +38(056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, orcid.org/0000-0001-5427-1154

<sup>2</sup> Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, phone +38 (056) 3748 357 orcid.org/0000-0003-2184-8230

**Abstract.Purpose.** It is interest to research the transformations in non-metallic inclusions under high-temperature heating and laser treatment of steels. It is necessary to analyse the peculiarities of influence of slow and high-speed heating on the different transformations in different types of inclusions that can to cause the change of properties of inclusions and steels after heat or laser treatment. Also it is necessary to discover the possibilities of controlling heterogeneization of non-metallic inclusions and steel matrix in the time of formation of local gradiental and composite zones of contact interaction in systems inclusion-matrix. The goal of work is to discover the fundamental types of transformations in non-metallic inclusions by high-temperature metallography and laser heating. **Methodology.** The materials for investigation were commercial steels containing different non-metallic inclusions. The specimens of different steels with preliminary polished surface were exposed to heating in vacuum on the installations IMASH-5C and Rainhart and also exposed to laser beaming on the installations GOS-30M and GUANTUM-16. Methods of investigation – vacuum metallography, petrography and optical microscopy (Neophot-21) were used. **Findings.** It was fixed under high-temperature heating in vacuum the different transformations in non-metallic inclusions take place which cause by polymorphism, transition into more stable condition, precipitation and dissolution of second phase, change of chemical composition. These transformations cause the stresses promoting local spontaneous recrystallization. Under high-temperature heating dissociation and dissolution of non-metallic inclusions takes place that in accompanied by local saturation of steel matrix of cascade type and also by precipitation of “satellite” inclusions. Redistribution of inclusions under high-temperature heating promotes decoration of high-temperature boundaries and manifestation of structural heredity. Under laser action melting and speed crystallization of non-metallic inclusions, shear polymorphic transformations, transition into more or less stable condition precipitation and dissolution of second phase change of chemical composition, reduction of metals from oxides, formation of gradiental and composite microzones takes place. The peculiarities of transformations in non-metallic inclusions being on the polished surface under speed heating in the condition of laser action were investigated. The peculiarities of transformations in non-metallic inclusions under ordinary and high-speed heating are discussed. **Originality.** The peculiarities of transformations in non-metallic inclusions under different conditions of heating and cooling taking place under interaction between non-metallic inclusions and steel matrix were determined. **Practical value.** The using of receiving results will allow to elaborate the methods and regimes of different types of treatment allowing to influence on the sizes, chemical composition, structure and distribution of non-metallic inclusions in steels with the aim of raise of mechanical properties.

*Keywords:* steel non-metallic inclusions, high-temperature metallography, laser action

### Введение

Высокотемпературная металлография с 60-х годов прошлого столетия применялась для прямого исследования различных фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах [1-4]:

рекристаллизации [4], ползучести [4], горячей пластической деформации [4-6], старения [4], бейнитного превращения [3], полиморфных превращений [4]. Этот метод также позволяет с помощью вакуумного травления фиксировать высокотемпературное состояние сплава на

поверхности шлифа. При лазерном воздействии на шлифах происходит испарение атомов с поверхности [5,6-10], что также позволяет фиксировать структуру высокотемпературного состояния сплава в момент скоростного нагрева.

### Цель

Целью работы является изучение процессов трансформации неметаллических включений методами высокотемпературной металлографии и при лазерном воздействии.

### Материалы и методики

Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали нагреву в вакууме на установках ИМАШ-5С и Рейнхарт до температур 200-1250°C и лазерному облучению на установке ГОС-30М при энергии импульса 25 Дж. Параметры лазерного воздействия приведены в работах [5,6]. Металлографические исследования проводили при высоких температурах, а также с помощью микроскопа Неофот-21. Применяли петрографический метод идентификации включений.

### Результаты

В неметаллических включениях при высокотемпературном нагреве происходят различные превращения, связанные с полиморфизмом, переходом в более стабильное состояние, выделением и растворением второй фазы, изменением состава и т.д. [11-12]. О наличии превращений свидетельствуют перегибы на кривых изменения микротвердости неметаллических включений при изменении температуры [5,6]. Полиморфные превращения проходят во включениях  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\beta$ -кварц  $\text{SiO}_2 \rightarrow \alpha$ -кварц  $\text{SiO}_2 \rightarrow$  тридимит  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ , превращения нестабильных включений в более стабильное состояние наблюдали в случаях  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3$ . Температуры этих превращений различны, но все они проходят в интервале температур, что обусловлено наличием примесей на включениях. Превращения во включениях проходят по нормальному механизму зарождения и роста новой фазы (рис. 1, а), при ускоренном охлаждении они проходят по сдвиговому механизму (рис. 1, б). Благодаря вакуумному травлению удаётся зафиксировать промежуточные стадии превращений. Независимо от механизма образования зародыша новой фазы или модификации включения (гомогенное или гетерогенное зарождение в дефектных участках структуры), происходит упругое искажение кристаллической решётки исходной фазы и образование межфазной границы,

сопровождающееся преодолением поверхностного натяжения и давления на межфазной поверхности.

При отжиге во включениях также проходят превращения разных фаз в более стабильное состояние: кристобалит превращается в тридимит, включения галаксита, находившиеся в стекловидной матрице оксидов марганца, алюминия и кремния, преобразовались в частицы корунда, муллита и спессартита в процессе выдержки стали 08Ю при 1100...1200°C. В многофазных включениях метастабильное состояние обусловлено отсутствием термодинамического равновесия между фазами. В результате выделения новых фаз термодинамическое равновесие в системе включения становится более стабильным. Состав сложных оксидов типа шпинелей в метастабильном состоянии часто не соответствует стехиометрической формуле. В процессе отжига соотношение оксидов стабилизируется, что наблюдали на включениях  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ . Например, содержание алюминия во включении  $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  изменилось от 35 до 60%.

Полиморфные превращения проходят в отдельных фазах гетерофазных включений (рис. 1, в -  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ , г -  $\text{TiO}_2 + \text{TiCN}$ ). При этом пластичных фазах наблюдали микросдвиги, связанные с релаксацией напряжений (рис. 1, в). В процессе высокотемпературного нагрева в силикатных стеклах, имеющих довольно сложный химический состав и ликвиацию, происходит распад пересыщенных твердых растворов, в аморфной матрице выделяются дисперсные частицы новых фаз, т.е. идет твердофазная кристаллизация. В стеклах оксидов марганца, алюминия и кремния наблюдали частицы  $\text{MnO}$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ,  $3\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ . Выделение включений избыточных фаз возможно не только в стеклах, но и в некоторых других видах включений.

Полиморфные превращения во включениях сопровождаются объемными эффектами, вызывающими напряжения в самих включениях и на межфазных границах, что приводит к искажению кристаллической решетки стальной матрицы. Если величина напряжений в матрице вблизи включения превышает предел текучести, возникают релаксационные пластические сдвиги (рис. 1, д), приводящие к накоплению дефектов кристаллической решетки, что способствует локальной рекристаллизации. Механизм спонтанной рекристаллизации стальной матрицы, обусловленной напряжениями, которые возникают благодаря различным превращениям в неметаллических включениях, зависит от температуры нагрева [5,6]. В момент превращения на включениях возникают центры рекристаллизации и формируются новые рекристаллизованные зерна (рис. 1, е).

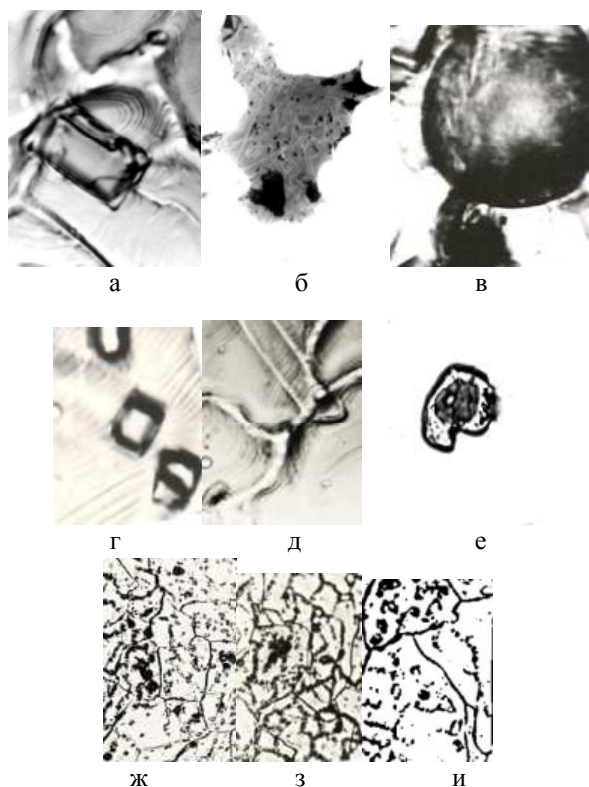


Рис. 1. Неметаллические включения после высокотемпературного нагрева в вакууме: а –  $\times 1200$ , б-и –  $\times 900$  / Non-metallic inclusions after high-temperature heating in vacuum: а –  $\times 1200$ , б-и –  $\times 900$

При высокотемпературном нагреве происходит диссоциация и растворение неметаллических включений в стальной матрице (рис. 1, ж). Об интенсивном диффузионном обмене между включениями и матрицей свидетельствуют зоны взаимного насыщения поверхностей включения и матрицы по обе стороны от границы включение-матрица [5,6]. Как правило, в стальной матрице наблюдали либо одну зону насыщения с плавным уменьшением содержания элементов, либо две - три зоны насыщения с каскадным распределением элементов [5,6]. Из пересыщенного твердого раствора появляются дисперсные «сателлитные» частицы, что также связано со стремлением к самоорганизации системы (твердого раствора), накопившей элементы включения (рис. 1, е). Эти процессы способствуют уменьшению средних размеров включений. В работах [5,6] приведены многочисленные сведения о влиянии режима нагрева и охлаждения сталей на трансформацию неметаллических включений различных типов при высокотемпературном нагреве. В процессе растворения исходных и выделения новых включений происходит их перераспределение в стальной матрице, что приводит к декорированию высокотемпературных границ зерен и проявлению структурной наследственности (рис. 1, ж - и).

При лазерном воздействии в неметаллических включениях происходят различные превращения, связанные с полиморфизмом, переходом в более

либо менее стабильное состояние, выделением и растворением второй фазы, изменением состава, восстановлением металлов и т.д. [5,6,11-13]. Полиморфные превращения проходят во включениях FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CaO,  $\beta$ -кварц SiO<sub>2</sub>→ $\alpha$ -кварц SiO<sub>2</sub>→тридимит SiO<sub>2</sub>, CaO•SiO<sub>2</sub>, 2CaO•SiO<sub>2</sub>, MnO•SiO<sub>2</sub>, превращения нестабильных включений в более стабильное состояние наблюдали в случаях FeO→Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O→Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrO→Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В условиях лазерного воздействия при ускоренном охлаждении они проходят по сдвиговому механизму нередко с образованием мартенситных структур (рис. 2, а). Микротвёрдость полиморфных включений после ЛТО возрастала в 1,5...1,8 раза, у неполиморфных – в 1,1...1,2 раза [5,6], что связано с появлением при превращениях больших внутренних напряжений, приводящих иногда к разрушению включений.

Лазерная обработка позволяет фиксировать высокотемпературные фазы включений (рис. 2, б). К таким включениям относятся SiO, CrO, Al<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Cr<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO, Ti<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, которые появились при переходе стабильных фаз и включений SiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> в нестабильное состояние в экстремальных условиях ЛТО.

После лазерного воздействия обнаружены случаи аморфизации ряда включений в сталях R7, 08кп, 08Ю, 12ГС, 08ГСЮГФ, содержащих пластичные сульфиды (Fe,Mn)S и силикаты (Fe,Mn)O•SiO<sub>2</sub> как в виде самостоятельных включений, так и в виде фаз многофазных включений. Разрушение кристаллической решётки включений свидетельствует о значительном возбуждении атомов (ионов) при внесении большого количества дефектов (в первую очередь, вакансий, дислокаций и дисклинаций). В работах [5,6,13] рассмотрено поведение различных включений при лазерном воздействии. Процессы скоростных диссоциации, растворения, оплавления и плавления неметаллических включений в момент лазерного воздействия во многом определяют их фазовое и структурное состояние в упрочненном поверхностном слое стальных изделий. Вероятность растворения, оплавления и расплавления включений зависит от их типа (рис. 2, д).

Глубина зоны растворения включений зависит от режима лазерной обработки: чем больше энергия импульса W и время воздействия  $\tau_{\text{имп}}$ , тем она больше. Механизм сверхскоростного растворения и плавления включений связан с взаимным (включение↔матрица) скоростным массопереносом атомов через границы раздела, которые тоже плавятся. В гипернеравновесных условиях лазерного воздействия в поверхностном слое включения, контактирующего с расплавленной или твердой матрицей, образуется зона с повышенной плотностью дислокаций и вакансий. Согласно дислокационной теории плавления, участки этой зоны, представляющие собой сильно искаженные области с практически разупорядоченной решеткой могут быть

зародышами жидкой фазы. В пределах сильно разупорядоченного участка на поверхности включения (зародыша жидкой фазы) находятся атомы с наиболее нарушенными электронными конфигурациями. При закалке из жидкого состояния в поверхностном слое включений либо во всем объеме формируется зона лазерной кристаллизации, для которой характерны ультра мелкозернистость, столбчатая форма зерен, в также наличие зон сдвига (рис. 2, е).

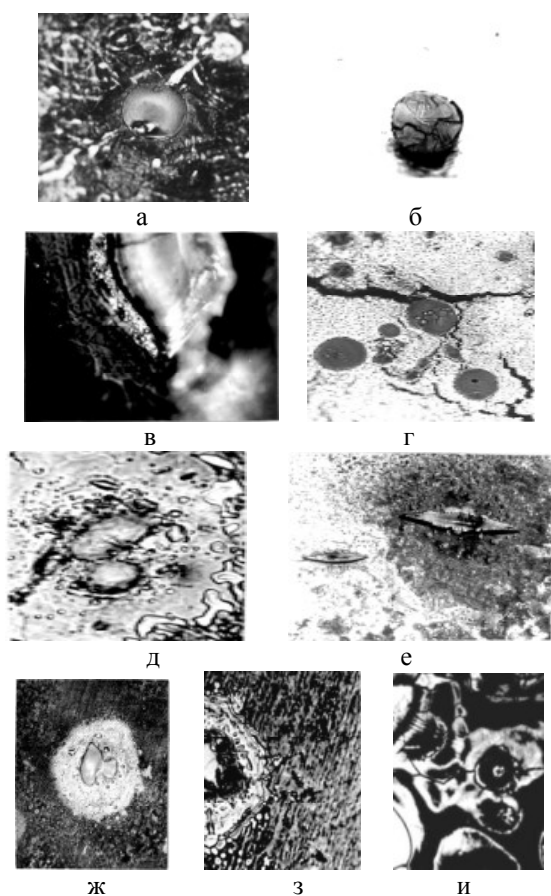


Рис. 2. Неметаллические включения после лазерного нагрева: а –  $\times 1200$ , б –  $\times 1000$ , в-ж –  $\times 900$  / Non-metallic inclusions after laser heating: а –  $\times 1200$ , б –  $\times 1000$ , в-ж –  $\times 900$

При лазерном воздействии в результате сложного взаимодействия между включениями и стальной матрицей [5,6,13] происходит их взаимное насыщение компонентами, что приводит к формированию градиентных и композитных структур вблизи включений (рис. 2, ж, з). Указанные процессы сопровождаются фазовыми превращениями в поверхностных слоях включений, что обусловлено их сложным взаимодействием с металлической матрицей. Было установлено, что массоперенос через границы включение-матрица приводит к насыщению зон матрицы компонентами включений. В условиях резкого охлаждения атомы элементов, перешедшие из включений в матрицу, фиксируются в твердом растворе, поэтому зоны

матрицы вблизи включений представляют собой пересыщенный компонентами включений твердый раствор. Анализ участков стальной матрицы, прилегающих к включению, показал, что их структура неоднородна. Возможны несколько вариантов их строения: одна зона, либо две или три зоны насыщения; при этом в неметаллическом включении может вовсе не быть приповерхностной зоны насыщения, либо может быть одна или две зоны. При наличии нескольких зон насыщения в матрице наблюдали своеобразный каскад концентраций элементов в зонах взаимодействия матрицы и 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. Следует отметить еще один тип распределения элементов включения в прилегающих участках матрицы. При коллективном массопереносе, связанном с растворением в матрице зерен включения, наблюдали «пятнистое» распределение элементов включения в прилегающих участках матрицы, что косвенно подтверждает возможность существования механизма растворения (плавления) наноструктурных неметаллических включений [5,6,13]. 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 градиентных 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. 2, г). Как правило, химический состав этих частиц несколько отличается от исходного включения благодаря участию в их формировании компонентов матрицы.

Массоперенос через границы включение-матрица может привести к формированию на границах сегрегаций примесей и граничных фаз (рис. 2, и). Встречались граничные прослойки с ультрадисперсной кристаллической, нанокристаллической и аморфной структурой, что объясняется высокоскоростным характером процесса их формирования. Образование граничной фазы за столь малое время воздействия свидетельствует о коллективном характере этого процесса за счет активации группы атомов разного сорта в условиях высоких давления и температуры, когда на границе включение-матрица реализуется сложная многокомпонентная система благодаря сгущению количества  $i$ -х компонентов включения и стальной матрицы [5,6]. В результате на границе раздела

возникает слой с новым химическим составом и структурой.

Во включениях некоторых оксидов как простых ( $\text{MeO}$ ,  $\text{Me}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MeO}_2$ ,  $\text{Me}_2\text{O}_5$ ), так и сложных ( $\text{MeO} \cdot \text{Me}_2\text{O}_3$ ,  $n\text{MeO} \cdot \text{MeO}_2$ ), обнаруживаются дисперсные частицы, представляющие собой либо более низшие оксиды, либо корольки чистого металла (рис. 2, в). В простых оксидах произошло частичное или полное восстановление металла, продукты диссоциации оксидов зафиксированы резким охлаждением, причем некоторые из них, такие как, например,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}$ ,  $\text{SiO}$  характерны для высокотемпературного состояния и при низких температурах не стабильны [11,12]. Восстановление темп. оксидов проходило без распада на простые оксиды. Практически полностью восстанавливался металл составляющего низшего оксида  $\text{MeO}$ , металл же составляющего высшего оксида  $\text{Me}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MeO}_2$  восстанавливался частично. Диссоциация оксидов проходит под действием лазерного облучения, благодаря которому ионы кислорода удаляются из решетки исходного оксида. Эти ионы перемещаются к поверхности и удаляются в окружающую атмосферу, а в покинутых ионами кислорода местах решетки оксида возникают локальные искажения, которые приводят к перестройке решетки высшего оксида в решетку низшего оксида или металла.

Процесс восстановления оксидов начинается одновременно на нескольких реакционных центрах, которыми являются нарушения кристаллического строения и проходит с очень высокой скоростью в условиях генерирования новых дефектов кристаллического строения.

#### Научная новизна и практическая значимость

Показаны возможности применения высокотемпературной вакуумной металлографии, а

также выявления высокотемпературной структуры при лазерном воздействии для изучения фазовых и структурных превращений в неметаллических включениях. Исследованы особенности протекания различных превращений в неметаллических включениях различных типов при обычном и скоростном нагреве и охлаждении. Обсуждаются процессы влияния этих превращений на локальную структуру стальной матрицы, а также структуру самих включений. Результаты исследований раскрывают возможности для разработки методов целенаправленного влияния на неметаллические включения, а также локальную структуру стальной матрицы вблизи включений, что позволит управлять параметрами включений (размеры, фазовый состав, распределение) и уровнем прочностных и пластических характеристик сталей.

#### Выводы

Применение высокотемпературной металлографии и лазерного воздействия позволило изучить различные превращения, которые проходят в неметаллических включениях в разных условиях нагрева и охлаждения. Эти превращения связаны с полиморфизмом, переходом в более либо менее стабильное состояние, выделением и растворением второй фазы, изменением состава, восстановлением металлов и т.д. Различные превращения сопровождаются появлением новых внутренних межфазных границ во включениях, а условия сопряжения фаз включения определяют когезивную прочность этих границ [5,6]. При традиционном рассмотрении новых фаз в неметаллических включениях как концентраторов напряжений и деформаций, эти границы во многом определяют уровень прочности и поведение включений при пластической деформации и разрушении.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лозинский, М.Г. Структура и свойства металлов и сплавов при высоких температурах : монография / М.Г. Лозинский. - Москва: Металлургия, 1963. – 266с.
2. Лозинский, М.Г. Высокотемпературная металлография: монография / М.Г. Лозинский. - Москва: Машигиз, 1956. – 232с.
3. Смолмен Р. Современная металлография: монография / Смолмен Р., Ашби К. – Москва: Атомиздат, 1970. – 208с.
4. Лозинский, М.Г. Современное состояние высокотемпературной металлографии: монография / Лозинский, М.Г., Тананов А.И. – Москва: Наука, 1974. – 151с.
5. Губенко, С. И. Неметаллические включения в стали: монография / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. - Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536с.
6. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали: монография / С.И. Губенко. - Москва: Металлургия, 1991. – 225 с.
7. Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. Упрочнение деталей лучом лазера : монография / . – К.: Техника, 1981. – 131 с.
8. Леонтьев П.А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов: монография / Леонтьев П.А., Чеканов Н.Т., Хан М.Г. – Москва: Металлургия, 1986. – 142 с.
9. Криштал М.А. Структура и свойства сплавов обработанных излучением лазера : монография / Криштал М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. – Москва: Металлургия, 1973. – 192 с.
10. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов: справочник // Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. – Москва: Машиностроение, 1985. – 496с.
11. Нарита К. Кристаллическая структура неметаллических включений в стали : монография / Москва: Металлургия, 1969. – 191 с.
12. Литвинова Т.И. Петрография неметаллических включений: монография / Литвинова Т.И., Пирожкова В.П., Петров А.К. – М.: Металлургия, 1972. – 460 с.

13. Губенко С.И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение-матрица при высокоэнергетических обработках / *Металлофизика, новейшие технологии.* - 2014. - т. 36. - №3. - С. 287-315

**REFERENCES**

1. Lozinsky M.G. *Structura I svoystva metallov I splavov pri vysokih temperaturah* [Structure and properties of metals and alloys under high temperatures]. Moscow, Metallurgy Publ., 1963, 266p.(in Russian).
2. Lozinsky M.G. *Visokotemperaturnaya metallographia* [High-temperature metallography]. Moscow, Machgiz Publ., 1956, 232p.(in Russian).
3. Smallman R., Ashbee K. *Sovremennaya metallographia* [Modern metallography]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970, 208p. (in Russian).
4. Lozinsky M.G., Tananov A.I. *Sovremennoe sostoyanie visokotemperaturnoy metalligraphii* [Modern condition of high-temperature metallography]. Moscow, Science Publ., 1974, 151p. (in Russian).
5. Gubenko S. I., Parusov V. V., Derevianchenko I. V. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Dniepropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2005. 536p.(in Russian).
6. Gubenko S. I. *Transformatsija nemetallicheskih vkluchenij v stali* [Transformation of non-metallic inclusions in steel]. Moscow, Metallurgy Publ., 1991, 225p.(in Russian).
7. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Merkulov G.V., Strizhak A.I. *Uprochnenie detalij luchom lazera* [Strengthening of parts with laser beam]. Kiev, Technics Publ., 1981. 131 p.(in Russian).
8. Leontjev P.A., Chekanov N.T., Han M.G. *Lazernaja poverhnostnaja obrabotka metallov i splavov* [Laser surface treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 142 p. (in Russian).
9. Kryshstal M.A., Zhukov A.A., Kokora A.H. *Struktura I svoystva splavov obrabotannih izlucheniem lazera* [Structure and properties of alloys treating with laser beam]. Moscow, Metallurgy Publ., 1973. 192 p. (in Russian).
10. Rikalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. *Lazernaja I elektronoluchevaja obrabotka materialov* [Laser and electron-beam treatment of materials], Moscow, Machine building Publ., 1985. 496 p. (in Russian).
11. Narita K. *Kristallicheskaya struktura nemetallicheskih vkluchenij v stali* [Crystalline structure of non-metallic inclusions in steel], Moscow, Metallurgy Publ., 1969, 191p.(in Russian).
12. Litvinova T.I., Pirozhkova V.P., Petrov A.K. *Petrographiya nemetallicheskih vkluchenij* [Petrography of non-metallic inclusions]. Moscow, Metallurgy Publ., 1972, 460p. (in Russian).
13. Gubenko S.I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij I mizhphasnih granits vkluchenie-matritsa pri visokoenergeticheskikh obrabotkakh* [Possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries under high-energy treatments]. *Metallofizika, noveishietehnologii – Metal Physics, New Technologies*, 2014, v. 36, no. 3, pp. 287-315. (in Russian).

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