

УДК 669.18

ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

ГУБЕНКО С. И., д. т. н., проф.

Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

Аннотация. Постановка проблемы. Превращения в неметаллических включениях при лазерной обработке сталей исследованы мало. Необходимо проанализировать особенности влияния скоростного нагрева на различные превращения во включениях разных типов, что может вызвать изменение свойств самих включений и сталей после лазерной обработки. Следует 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 при лазерном нагреве. 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. **Методы исследования** – петрография и оптическая микроскопия (Неофот-21). **Результаты.** Установлено, что 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 микроразностей. 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 скоростном нагреве. **Научная новизна.** Установлены особенности превращений в неметаллических включениях при скоростном нагреве и охлаждении, которые проходят при взаимодействии неметаллических включений и стальной матрицы. **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 улучшения механических свойств.

Ключевые слова: сталь; неметаллические включения; лазерное воздействие

ПЕРЕТВОРЕННЯ В НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕННЯХ ЗА ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ

ГУБЕНКО С. І., д. т. н., проф.

Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

Анотація. Постановка проблеми. Перетворення в неметалевих включеннях під час лазерної обробки сталей досліджено мало. Необхідно проаналізувати особливості впливу швидкісного нагріву на різноманітні перетворення у включеннях різних типів, що може викликати зміну властивостей самих включень і сталей після лазерної обробки. Слід також виявити можливості управління гетерогенізацією структури неметалевих включень і стальної матриці під час формування локальних градієнтних і композитних зон контактної взаємодії в системах включення – матриця. **Мета роботи** – визначення основних закономірностей трансформації неметалевих включень під час лазерного нагріву. Матеріалами для досліджень були промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному нагріву на установках ГОС-30М і КВАНТ-16. **Методи дослідження** – петрографія та оптична микроскопія (Неофот-21). **Результати.** Встановлено, що за лазерної дії відбуваються 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 микроразностей. Досліджено особливості перетворень у включеннях за швидкісного нагріву в умовах лазерної дії, яка дозволяє виявляти високотемпературну структуру включень на полірованій поверхні. Обговорюються особливості перетворень у включеннях за звичайного та швидкісного нагріву. **Наукова новизна.** Встановлено особливості перетворень у неметалевих включеннях під час швидкісного нагріву та охолодження, котрі відбуваються за взаємодії неметалевих включень і стальної матриці. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити методи і режими лазерної обробки, які дозволять впливати на розміри, склад, структуру і розподіл неметалевих включень у сталях з метою підвищення механічних властивостей.

Ключові слова: сталь; неметалеві включення; лазерна дія

TRANSFORMATIONS IN NON-METALLIC INCLUSIONS BY HIGH-TEMPERATURE METALLOGRAPHY

GUBENKO S.I., *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin av., 4, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5427-1154

Abstract. Formulation of the problem. It is interest to research the transformations in non-metallic inclusions under laser treatment of steels. It is necessary to analyse the peculiarities of influence of 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 laser heating. The materials for investigation were commercial steels containing different non-metallic inclusions. The specimens of different steels with preliminary polished surface were exposed to laser beaming on the installations GOS-30M and GUANTUM-16. Methods of investigation – petrography and optical microscopy (Neophot-21) were used. **Findings.** It was fixed 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 high-speed 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 laser 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; laser action

Введение

Фазовые и структурные превращения в неметаллических включениях играют большую роль в протекании различных процессов структурообразования в сталях при рекристаллизации, ползучести, горячей пластической деформации, старении, полиморфных превращений [1; 2]. При лазерном воздействии на шлифах происходит испарение атомов с поверхности [1–6], что также позволяет фиксировать структуру высокотемпературного состояния сплава в момент скоростного нагрева. Этот метод также позволяет с помощью вакуумного травления фиксировать высокотемпературное состояние неметаллических включений в упрочненном слое. Лазерная обработка является одним из перспективных способов поверхностного упрочнения различных деталей машин и механизмов.

Остаются недостаточно исследованными процессы трансформации неметаллических включений и их влияние на локальное упрочнение стальной матрицы, во многом определяющие неоднородный характер лазерного упрочнения. Методы воздействия на неметаллические включения представляют одно из наиболее перспективных направлений обработки сталей.

Цель работы

Целью работы является изучение процессов трансформации неметаллических включений при лазерном воздействии.

Материалы и методики

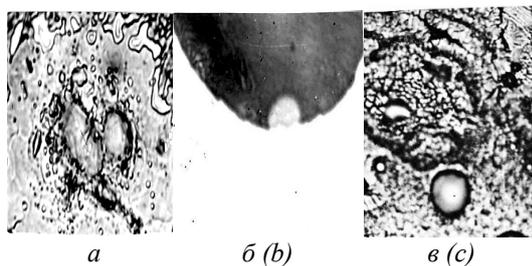
Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному облучению на установке ГОС-30М при энергии импульса 25 Дж. Параметры лазерного воздействия приведены в работах [1; 2]. Металлографические исследования проводили при высоких температурах, а также с помощью микроскопа Неофот-21. Применяли петрографический метод идентификации включений.

Результаты

Под действием лазерного излучения исходная структура границ включение – матрица переходит в неравновесное высокоэнергетическое состояние, что вызывает развитие диссипативных процессов, связанных со стремлением системы включение – матрица к состоянию с минимумом свободной энергии. В результате система включение – матрица переходит к состоянию неустойчивого равновесия, которое определяет структуру и свойства лазерно-закаленной межфазной границы. Большую роль в трансформации границ включение – матрица при лазерном воздействии играют процессы плавления, оплавления и растворения неметаллических включений, а также плавление стальной матрицы.

Вероятность растворения, оплавления и расплавления включений зависит от их типа (рис. 1). Растворение включений в момент лазерного

воздействия может не сопровождаться либо сопровождаться их плавлением, матрица в контакте с включениями плавится, либо остается твердой, что связано с неоднородностью энергетического и



теплового поля. Глубина зоны растворения включений зависит от режима лазерной обработки: чем больше энергия импульса W и время воздействия $\tau_{\text{имп}}$, тем она больше.

Рис. 1. Неметаллические включения после лазерного плавления и растворения: а – Al_2O_3 , б – SiO_2 , в – $(Fe, Mn)S$; $\times 500 \times 6$ / Fig. 1. Non-metallic inclusions after laser melting and saturation: a – Al_2O_3 , b – SiO_2 , c – $(Fe, Mn)S$; $\times 500 \times 6$

В момент лазерного воздействия процесс растворения (и плавления) включения происходит путем неупорядоченных переходов атомов включения через границу с расплавленной либо твердой матрицей. Механизм сверхскоростного растворения и плавления включений связан с взаимным (включение \leftrightarrow матрица) скоростным массопереносом атомов через границы раздела, которые тоже плавятся. При этом аномальный скоростной массоперенос через границы включения – матрица сопровождается обменом электронами между включениями (доноры) и матрицей (акцептор).

Следует отметить еще один важный фактор, влияющий на условия массопереноса между включениями и стальной матрицей – это электромагнитное поле, индуцируемое лазерным излучением, под действием которого на компоненты сплавов возникают определенные силы, направление которых зависит от магнитных свойств этих компонентов. Действие сил, обусловленных электромагнитным полем, способствует аномальному перераспределению атомов элементов включений и стальной матрицы, обладающих разными магнитными свойствами (магнитным моментом).

Таким образом, при лазерном воздействии электронное взаимодействие между включением и матрицей усложняется электромагнитным взаимодействием между атомами контактирующих фаз.

Массоперенос компонентов из матрицы в поверхностный слой включения может ускорить процесс растворения или плавления, если растворимость этих элементов во включении достаточно велика. Изменение на поверхности включения химического состава и достижение предела растворимости элементов матрицы создают условия для перехода поверхностного слоя включения в жидкое состояние с минимальными затратами энергии на разрыв межатомных связей. По-видимому, это может быть связано с искажением решетки включения проникшими из матрицы атомами и возникновением повышенной плотности дефектов кристаллического строения и значительных напряжений в поверхностном слое. 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. Проведя расчеты, можно определить критический размер зародыша жидкой фазы в поверхностном слое включения.

Последовательность образования сильно разупорядоченных участков на поверхности включения, а также перемещения межфазной границы включения – жидкая матрица в процессе плавления включения и самой границы включения – матрица можно представить следующим образом: на поверхности включения, насыщенной элементами матрицы, образуются сильно разупорядоченные участки – зародыши плавления, которые целиком переходят в жидкую сталь, растворяясь в ней и насыщая прилегающие к включению участки матрицы элементами включения. Положение границы включения – матрица изменяется, она искривляется в зависимости от характера взаимного массопереноса. При переходе сильно разупорядоченного участка включения в жидкое состояние площадь поверхности S и энергия межфазной границы включения – матрица $E_{\text{МФГ}}$ изменяются.

Расплавленное или оплавленное с поверхности неметаллическое включение находится в расплавленной стальной матрице и образуется локальная микрометаллургическая ванна, в которой под действием лазерного излучения возникают гидродинамические потоки в условиях вихревого термокапиллярного перемешивания, что вызывает перемещение включения. Это вносит элементы конвективного массопереноса элементов включения и матрицы в общий процесс аномального скоростного массопереноса. На скорость лазерного растворения должна влиять анизотропия поверхностных свойств включения (или его фаз).

Вероятность массопереноса от включения в матрицу через границу их раздела тем больше, чем меньше разрывается межатомных связей, т. е. чем менее плотно упакована атомная плоскость. Стойкость неметаллического включения при контактном взаимодействии с жидкой матрицей зависит от степени отклонения системы от квазиравновесного состояния в момент лазерного воздействия, т. е. от разницы химических потенциалов компонентов во включении и матрице. 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. [1; 2; 7].

Следует учитывать неоднородность нагрева образцов [8–12], что способствует разнообразию превращений, протекающих во включениях. Полиморфные превращения проходят во включениях FeO, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, CaO, β-кварц SiO₂→α-кварц

SiO₂→тридимит SiO₂, CaO·SiO₂, 2CaO·SiO₂, MnO·SiO₂, превращения нестабильных включений в более стабильное состояние наблюдали в случаях FeO→Fe₃O₄, Fe₂O₃→Fe₃O₄, Al₂O→Al₂O₃, CrO→Cr₂O₃. 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 [1; 2], 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, Al₂O, Cr₂O, CrO₃, Mn₃O₄, Cr₃O₄, TiO, Ti₂O₅, которые появились при переходе стабильных фаз и включений SiO₂, Cr₂O₃, MnO, Al₂O₃, TiO₂ в нестабильное состояние в экстремальных условиях ЛТО.

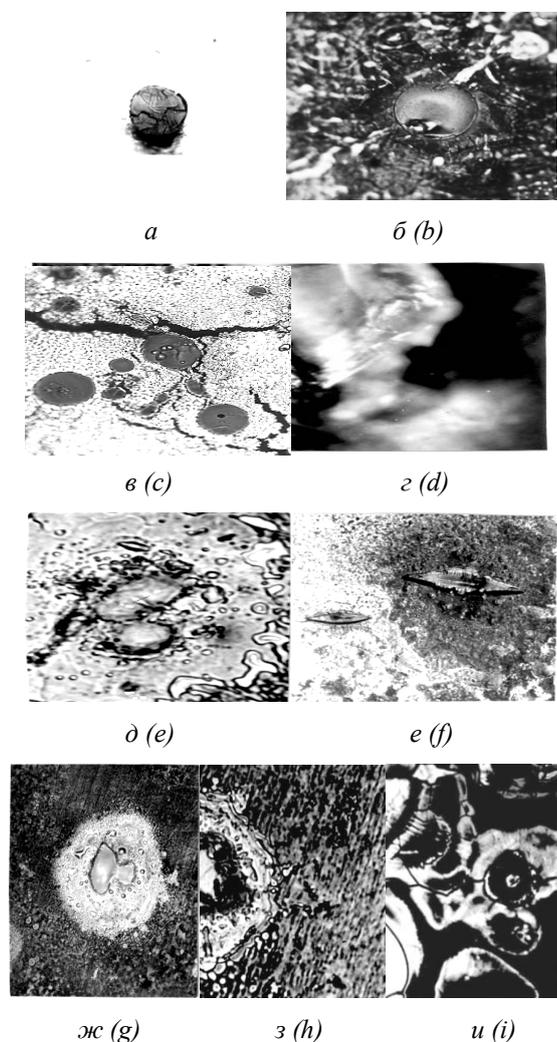


Рис. 2. Неметаллические включения после лазерного нагрева: а – $\times 1\ 200$, б – $\times 1\ 000$, в–ж – $\times 900$ /
Fig. 2. Non-metallic inclusions after laser heating: а – $\times 1\ 200$, б – $\times 1\ 000$, с–і – $\times 900$

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·SiO₂ как в виде самостоятельных включений, так и в виде фаз многофазных включений. Разрушение кристаллической решетки включений свидетельствует о значительном возбуждении атомов (ионов) при внесении большого количества дефектов (в первую очередь, вакансий, дислокаций и дисклинаций).

В работах [1; 2; 7] рассмотрено поведение различных включений при лазерном воздействии. Процессы скоростных диссоциаций, 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 ультрамелкозернистость, столбчатая форма зерен, в также наличие зон сдвига (рис. 2 е).

При лазерном воздействии в результате сложного взаимодействия между включениями и стальной матрицей [1; 2; 7] 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. 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 нанofазы – «сателлитные» частицы (рис. 2 з). Как правило, химический состав этих частиц несколько отличается от исходного включения благодаря участию в их формировании компонентов матрицы.

Массоперенос через границы включения – матрица может привести к формированию на границах сегрегаций примесей и граничных фаз (рис. 2 и). 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 включения – матрица реализуется сложная многокомпонентная система благодаря сгущению количества i -х компонентов включения и стальной матрицы [1; 2].

Во включениях некоторых оксидов как простых (MeO, Me₂O₃, MeO₂, Me₂O₅), так и сложных (MeO·Me₂O₃, nMeO·MeO₂), обнаруживаются дисперсные частицы, представляющие собой либо более низкие 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, Al₂O, CrO, SiO, характерны для высокотемпературного состояния и при низких температурах не стабильны [1; 2].

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.

Выводы

Применение 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. 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. Неметаллические включения в стали : монография / [С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко]. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
2. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали : монография / С. И. Губенко. – Москва : Metallurgia, 1991. – 225 с.
3. Упрочнение деталей лучом лазера : монография / [В. С. Коваленко, Л. Ф. Головки, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак]. – Киев : Техника, 1981. – 131 с.
4. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов : монография / [П. А. Леонтьев, Н. Т. Чеканов, М. Г. Хан]. – Москва : Metallurgia, 1986. – 142 с.
5. Структура и свойства сплавов обработанных излучением лазера : монография / [М. А. Криштал, А. А. Жуков, А. Н. Кокора]. – Москва : Metallurgia, 1973. – 192 с.
6. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов : справочник // [Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора]. – Москва : Машиностроение, 1985. – 496 с.
7. 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.
8. 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*. – 2008. – Т. 9. – № 1. – С. 181–184.
9. 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.
10. 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.
11. 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*. – Вип. 3 (56). – Т. 2. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 22–29.
12. 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.

REFERENCES

1. 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)
2. Gubenko S.I. *Transformatsija nemetallicheskih vkluchenij v stali* [Transformation of non-metallic inclusions in steel]. Moscow : Metallurgy Publ., 1991, 225 p. (in Russian)
3. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Merkulov G.V. and Strizhak A.I. *Uprochnenie detalij luchom lazera* [Strengthening of parts with laser beam]. Kyiv : Technics Publ., 1981, 131 p. (in Russian)
4. 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)
5. Kryshtal M.A., Zhukov A.A. and Kokora A.H. *Struktura i svojstva cplavov obrabotannih izlucheniem lazera* [Structure and properties of alloys treating with laser beam]. Moscow : Metallurgy Publ., 1973, 192 p. (in Russian)
6. Rikalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V. and Kokora A.N. *Lazernaja i elektronoluchevaja obrabotka materialov* [Laser and electron-beam treatment of materials]. Moscow : Machine building Publ., 1985, 496 p. (in Russian)
7. Gubenko S.I. *Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij i mizhphasnih granits vcluchenie-matritsa pri visokoenergeticheskij obrabotkah* [Possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase inclusion-matrix boundaries under high-energy treatments]. *Metallofizika, noveishie tehnologii* [Metal Physics, New Technologies]. 2014, vol. 36, no. 3, pp. 287–315. (in Russian)
8. Denisenko A.I., Tsotsko V.I., Spiridonova I.M. and Peleshenko B.G. *Rozpodil tempetaruti odnovimirnogo 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)
9. Tsotsko V.I. and Denisenko A.I. *Temperaturnye 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 nacionalnogo universiteta* [Messenger of Dnepropetrovst national university]. 2004, no. 2, pp. 72–77. (in Russian)
10. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obratzsa v uslovijah mestnoj termotsikliruuschej obrabotki* [Analytical modeling of temperature field in one-dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Suchasni problem metalurgii*. [Modern problems of metallurgy]. 2007, vol. 10, pp. 170–178. (in Russian)
11. Tsotsko V.I., Spiridonova I.M., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Analiticheskoe modelirovanie polja temperature odnomernogo obratzsa v uslovijah mestnoj termotsikliruuschej obrabotki* [Analytical modeling of temperature field in one-

dimensional sample of the local thermo-cycling processing]. *Siustemnie tehnologii* [System technologies]. Dnipropetrovsk, 2008, issue 3 (56), vol. 2, p. 22 (in Russian)

12. Tsotsko V.I., Peleshenko B.G. and Denisenko A.I. *Nestatsionarnoe pole temperature v metalle v uslovijah impulsnogo energeticheskogo vozdeistviya* [Steady temperature field in the metal under the conditions of pulsed energy impact]. *Visokoenergeticheskaja obrabotka materialov* [High-energy treatment of materials]. Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2009, pp. 202–208. (in Russian)

Поступила в редколлегию 13.07.2017 г.

Принята к печати 20.07.2017 г.

УДК 621.793.3

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНИ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОКРИТТІВ КОБАЛЬТ – ГРАФІТ

ОВЧАРЕНКО В. І.^{1*}, к. т. н., доц.,
КОРОЛЯНЧУК Д. Г.², м. н. с.

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua

² Кафедра матеріалознавства, Державний вищий навальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua

Анотація. Постановка проблеми. Вивчення впливу режиму електроосадження, геометрії та розміру частинок графіту, які використовувалися як наповнювач в осадах кобальту, на морфологію поверхні композиційного електролітичного покриття кобальт – графіт товщиною 3...15 мкм. Досліджено морфологію поверхні композиційного електролітичного покриття кобальт – графіт товщиною 3...15 мкм. **Результати.** Виявлено вплив режиму осадження, геометрії та розміру частинок графіту на морфологію поверхні композиційних електролітичних покриттів кобальт – графіт товщиною 3...15 мкм. Установлено, що для одержання композиційних електролітичних покриттів кобальт – графіт із суцільним шаром кобальтових осадів необхідно використовувати як наповнювач графіт, який наноситься електроконтактним способом на підкладку перед процесом електроосадження, та частинки, які утворюються в результаті руйнування графітового анода в процесі електролізу. **Наукова новизна.** Обговорюється вплив режиму осадження, геометрія та розмір частинок графіту на формування морфології поверхні композиційних електролітичних покриттів кобальт – графіт. **Практична значимість.** Результати досліджень дозволяють одержувати композиційні електролітичні покриття кобальт – графіт товщиною 3...15 мкм із суцільним шаром кобальтових осадів.

Ключові слова: кобальт; графіт; електроосадження; покриття; морфологія поверхні

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ КОБАЛЬТ – ГРАФИТ

ОВЧАРЕНКО В. И.^{1*}, к. т. н., доц.,
КОРОЛЯНЧУК Д. Г.², м. н. с.

^{1*} Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua

² Кафедра материаловедения, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua

Аннотация. Постановка проблемы. Изучение влияния режима электроосаждения, геометрии и размера частиц графита, которые использовались в качестве наполнителя в осадках кобальта, на морфологию поверхности композиционного электролитического покрытия кобальт – графит толщиной 3...15 мкм. Исследована морфология поверхности композиционного электролитического покрытия кобальт – графит толщиной 3...15 мкм. **Результаты.** Вывявлено влияние режима осаждения, геометрии и размера частиц графита на морфологию поверхности композиционных электролитических покрытий кобальт – графит толщиной 3...15 мкм. Установлено, что для получения композиционных электролитических покрытий кобальт – графит со сплошным слоем кобальтовых осадков необходимо использовать в качестве наполнителя графит, который предварительно наносится электроконтактным способом на подложку перед электроосаждением, и частицы, которые образуются в результате разрушения графитового анода в процессе электролиза. **Научная новизна.** Обсуждается влияние режима осаждения, геометрии и размера частиц графита на формирование морфологии поверхности композиционных электролитических покрытий кобальт – графит. **Практическая**