

УДК 621.785:535.211:669.15-194:669.017

ГРАДИЕНТНЫЕ И КОМПОЗИТНЫЕ ЗОНЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ И СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

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

^{1*} 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

² 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 поведение неметаллических включений при лазерной обработке сталей. Необходимо проанализировать особенности влияния скоростных плавления и кристаллизации включений на локальное упрочнение стальной матрицы. Необходимо также выявить возможности управляемой гетерогенизации структуры сталей при формировании локальных градиентных и композитных зон контактного взаимодействия в системах включение-матрица. Целью работы является выявление основных закономерностей трансформации межфазных границ включение-матрица и формирования зон контактного взаимодействия при лазерной обработке сталей. *Методика.* 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, используя различные энергии импульса. *Результаты.* Установлено, что при лазерном упрочнении сталей, содержащих неметаллические включения, происходит совмещение лазерной термообработки с микролегированием локальных участков матрицы от внутренних источников – неметаллических включений. Уровень лазерного упрочнения границ включение-матрица определяется оптимальным соотношением скоростей диссипативных и активационных процессов. Исследование особенностей формирования зон контактного взаимодействия в стальной матрице и включениях, а также упрочнения границ включение-матрица позволило выявить ряд закономерностей трансформации этих границ при лазерном воздействии. *Научная новизна.* Установлены особенности строения градиентных и композитных микрозон, которые возникают при взаимодействии неметаллических включений и стальной матрицы в момент лазерного воздействия, и их влияния на локальное упрочнение стальной матрицы. *Практическая значимость.* Использование полученных результатов позволит разработать режимы лазерной обработки, позволяющие использовать неметаллические включения как внутренние источники микролегирования, что позволит целенаправленно влиять на уровень упрочнения стали при ЛТО.

Ключевые слова: сталь, неметаллические включения, лазерное воздействие, упрочнение, градиентные и композитные зоны

ГРАДІЄНТНІ І КОМПОЗИТНІ ЗОНИ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ВКЛЮЧЕНЬ І СТАЛЬНОЇ МАТРИЦІ ПІСЛЯ ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ

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

^{1*} 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

² 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 поведінку неметалевих включень при лазерній обробці сталей. Необхідно проаналізувати особливості впливу швидкісних плавлення та кристалізації включень на локальне зміцнення сталеві матриці. Необхідно також виявити можливості керованої гетерогенізації структури сталей при формуванні локальних градієнтних і композитних зон контактної взаємодії в системах включення-матриця. Метою роботи є визначення основних закономірностей трансформації міжфазних границь включення-матриця і формування зон контактної взаємодії при лазерній обробці сталей. *Методика.* Матеріалами для досліджень були промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному опроміненню на установках

ГОС-30М і КВАНТ-16, використовуючи різні енергії імпульсу. **Результати.** Установлено, що при лазерному зміцненні сталей, які містять неметалеві включення, відбувається суміщення лазерної термообробки з мікролегуванням локальних ділянок матриці від внутрішніх джерел – неметалевих включень. Рівень лазерного зміцнення границі включення-матриця визначається оптимальним співвідношенням швидкостей дисипативних і активаційних процесів. Дослідження особливостей формування зон контактної взаємодії в сталій матриці і включеннях, а також змінення границь включення-матриця дозволило виявити ряд закономірностей трансформації цих границь при лазерній дії. **Наукова новизна.** Установлені особливості будови градієнтних і композитних мікрозон, які виникають при взаємодії неметалевих включень і сталі матриці в момент лазерної дії, та їх вплив на локальне змінення сталеві матриці. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити режими лазерної обробки, які дозволять використовувати неметалеві включення як внутрішні джерела мікролегування, що дозволить цілеспрямовано впливати на рівень змінення сталі при ЛТО.

Ключові слова: сталь, неметалеві включення, лазерна дія, змінення, градієнтні і композитні зони

GRADIENTAL AND COMPOSITE ZONES OF CONTACT INTERACTION OF INCLUSIONS AND STEEL MATRIX AFTER LASER ACTION

GUBENKO S.I. ^{1*}, DR. SC. (TECH.), PROF.
NIKULCHENKO I.O. ², post graduate

^{1*} 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

² 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 behavior of non-metallic inclusions under laser treatment of steels. It is necessary to analyse the peculiarities of influence of speed melting and crystallization of inclusions on the local strengthening of steel matrix. Also it is necessary to discover the possibilities of controlling heterogeneization of steels structure in the time of formation of local gradiental and composite zones of contact interaction in systems inclusion-matrix. The goal of work is elucidation of principal generalities of transformation of interphase inclusion-matrix boundaries and formation of zones of contact interaction under laser treatment of steels. **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 laser beaming on the installations GOS-30M and GUANTUM-16 using different energy of impulse. **Findings.** It was fixed under laser strengthening of steels containing non-metallic inclusions takes place combination laser heat treatment with micro-alloying of local section of matrix from inner sources – non-metallic inclusions. The level of strengthening of inclusion-matrix boundary is defined by optimal relationship of speeds of dissipation and activation processes. Investigation of peculiarities of formation of contact interaction zones in steel matrix and inclusions and also of the strengthening of inclusion-matrix boundaries was allowed to determine the series of principles of their transformation under laser action and their influence on the local strengthening of steel matrix. **Originality.** The peculiarities of structure of gradiental and composite micro-zones arising in the moment of laser action were determined. **Practical value.** The using of receiving results will allow to elaborate the regimes of laser treatment allowing to use the non-metallic inclusions as inner sources of micro-alloying that will allow to directly influence on the level of strengthening of steel under laser treatment.

Keywords: steel, non-metallic inclusions, laser action, strengthening, gradiental and composite zones

Введение

Известно, что неметаллические включения являются концентраторами напряжений и деформаций в сталях [1-7]. Они способствуют формированию структурной неоднородности при различных видах деформационно-термического воздействия [1,2,8]. При лазерном воздействии они способствуют микронеоднородному упрочнению стальной матрицы. Методы воздействия на неметаллические включения представляют одно из наиболее перспективных направлений обработки сталей [1,2,9-13].

Цель

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

Материалы и методики

Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному облучению на

установке ГОС-30М при энергии импульса 10, 18, 25 и 30 Дж. Скорость нагрева составляла 10^5 °С/с, время воздействия импульса – $(1,0 \dots 6,0) \cdot 10^{-3}$ с, скорость охлаждения – 10^6 °С/с. Проводили измерение нанотвердости на приборе “Nano Indenter II”.

Результаты

Ранее проведенными исследованиями было исследовано поведение неметаллических включений при лазерном воздействии [1,2]. Большую роль в трансформации границ включение-матрица при лазерном воздействии играют процессы плавления, оплавления и растворения неметаллических включений и плавление стальной матрицы [1,2]. Было установлено [1,2], 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 [1,2].

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 (рис. 1).

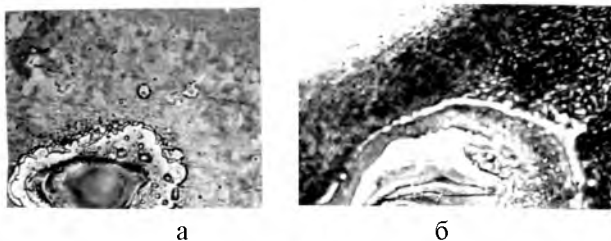


Рис. 1. Зоны взаимодействия матрицы с неметаллическим включением при лазерном воздействии: а – Al_2O_3 , б – $FeS-(Fe,Mn)S$; $\times 500$ / Zones of interaction of matrix with non-metallic inclusion under laser action: а – Al_2O_3 , б – $FeS-(Fe,Mn)S$; $\times 500$

Количество зон насыщения вблизи включений не зависело от типа и состояния включения в момент лазерного воздействия, но 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.

Участки матрицы, прилегающие к включению, отличаются распределением химических элементов. При наличии одной зоны насыщения в матрице

вблизи включения в ней, как и в работе [1], наблюдали постепенное уменьшение содержания элементов при удалении от включения (рис. 2,а). При наличии двух или трех зон насыщения наблюдали перепады концентраций с сохранением постепенного уменьшения содержания элементов в пределах каждой зоны.

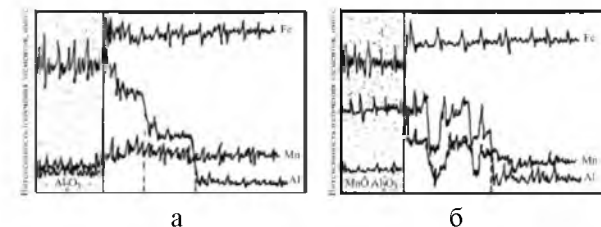


Рис. 2. Распределение элементов в зонах матрицы вблизи включения после лазерного воздействия / Distribution of elements in zones of matrix near inclusion after laser action

Таким образом, 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 (рис. 2,б), что косвенно подтверждает возможность существования механизма растворения (плавления) наноструктурных неметаллических включений.

Результаты изучения распределения нанотвердости матрицы показали, что вблизи включений (одна, либо первая зона) ее величина значительно превышает среднее значение вдали от включений (табл. 1).

Эта величина зависит от состава и структуры стали, определяющих степень ее упрочнения в процессе лазерного облучения и закалки. В первой (или единственной) зоне значения ($H_{нц}^B$) в 1,45 – 1,8 раз выше (коэффициент K_B), чем в матрице вдали от включения, что близко к результатам, полученным в работе [1]. Во второй и третьей зонах значения нанотвердости матрицы ниже, чем в первой зоне, но превышают величины $H_{нц}$ 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 включения.

Таблица 1.

Значения нанотвердости матрицы вблизи включений (H_{np}) и вдали от них (H_{m}) при энергии импульса 25 Дж и времени воздействия $3,6 \cdot 10^{-3}$ с / Values of nanohardness of matrix near inclusions (H_{np}) and far from them (H_{m}) with pulse energy 25 J and time of action $3,6 \cdot 10^{-3}$ s

Включение, сталь	H_{np} , x 10, МПа	H_{np} , x 10, МПа в зонах		
		1	2	3
Al ₂ O ₃ , MgO·Al ₂ O ₃ , 60Г	620	1100	-	-
		1085	942	744
MnO·SiO ₂ 2MnO·SiO ₂ , НБ-57	748	1130	1050	-
		1260	950	810
TiN, TiCN, 08Г	280	502	380	-
FeS-(Fe,Mn)S FeO-(Fe,Mn)S, 60Г	748	1220	1100	840
		1120	-	-

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. Как правило, химический состав этих частиц несколько отличается от исходного включения благодаря участию в их формировании компонентов матрицы. Встречаются также частицы, имеющие метастабильный состав, что связано с их образованием в условиях скоростного лазерного воздействия. Таким образом микронеоднородное упрочнение стальной матрицы при лазерном воздействии вблизи включений связано с возникновением термических напряжений, большого количества вакансий и дислокаций, локализацией высокоскоростных релаксационных процессов [1,2], а также с формированием градиентных и композитных зон различных типов (слоистых каскадного типа, пятнистых, дисперсных). В поверхностных слоях включений вследствие массопереноса компонентов стальной матрицы образовались зоны насыщения с каскадным ликвационным распределением элементов и значений нанотвердости (табл. 2).

Массоперенос через границы включение-матрица может привести к формированию на границах сегрегаций примесей [1] и граничных фаз. Встречались граничные прослойки с ультрадисперсной кристаллической, нанокристаллической и аморфной структурой, что объясняется высокоскоростным характером процесса

их формирования. Лазерное воздействие на границы включение-матрица сопровождается сложными структурными и фазовыми превращениями во включениях, матрице и в межфазных границах. К процессам, которые сосредоточены в межфазных границах включение-матрица, следует отнести: «диффузионные» превращения - массоперенос элементов включения и матрицы; фазовые и химические превращения – образование сегрегаций и граничных фаз; структурные превращения - перестройки системы межфазных дефектов и изменение сопряжения решеток включения и матрицы.

Таблица 2.

Значения нанотвердости в поверхностных слоях неметаллических включений / Values of nanohardness in surface layers of non-metallic inclusions

Включение	Сталь	H_v , x 10, МПа в зонах 1,2 (от матрицы) и в середине включения		
		1	2	середина
MgO·Al ₂ O ₃	60Г	3550	3180	3030
MnO·SiO ₂	НБ-57	1360	1210	1140
TiN, TiCN	08Г	2570	-	2240
FeO·TiO ₂	08Г	1040	1010	910
FeO·Al ₂ O ₃ MnO·Al ₂ O ₃	08Ю	3480	-	3030
		3330	3100	2900
FeO·MnO	08кп	660	610	550
SiO ₂	ЭЗ	3200	-	2840
SiO ₂	08кп	3050	3030	2850
(Mn,Fe)S	08кп	740	715	650

Научная новизна и практическая значимость

Уровень лазерного упрочнения границы включение-матрица определяется оптимальным соотношением скорости диссипативных и активационных процессов. Исследования особенностей формирования зон контактного взаимодействия в стальной матрице и включениях, а также упрочнения границ включение-матрица позволили выявить ряд закономерностей трансформации этих границ при лазерном воздействии [1]:

- в результате легирования локальных участков матрицы в условиях аномального массопереноса вблизи включений создаются ликвационные упрочненные зоны, представляющие собой градиентные и композитные слои различного типа: слоистые с каскадным и «пятнистым» распределением элементов и нанотвердости, дисперсные с разными типами упрочняющих фаз, а также комбинированные;

- в поверхностных слоях включений в результате аномального массопереноса элементов из матрицы создаются градиентные и композиционные участки слоистого типа с каскадным ликвационным распределением элементов, «туннельные», квазиэвтектические, а также дисперсные;

- границы включения-матрица претерпевают изменения, связанные с электронным взаимодействием фаз, сдвиговым сопряжением кристаллических решеток, где важную роль играют сдвиговые полиморфные превращения в матрице и включении, а также фазовым распадом и формированием неравновесных граничных фаз – кристаллических, нанокристаллических или аморфных, имеющих различную структуру.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Губенко, С. И. Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. - Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536с.
Gubenko S. I., Parusov V. V., Dereviachenko I. V. Nemetallicheskie vkluchenija v stali [Non-metallic inclusions in steel]. Dnepropetrovsk, ART-PRESS Publ., 2005. 536p. <http://www.art-press.com.ua/home>
2. Губенко С. И. Трансформация неметаллических включений в стали / Москва: Металлургия, 1991. – 225 с.
Gubenko S. I. Transformatsija nemetallicheskih vkluchenij v stali [Transformation of non-metallic inclusions in steel]. Moscow, Metallurgy Publ., 1991, 225p. <http://www.metallurgv-publishers.net>
3. Куслицкий А.Б. Неметаллические включения и усталость стали. К., Техника, 1976, 128с.
Kuslitskij A.B. Nemetallicheskie vkluchenija i ustalost stali [Non-metallic inclusions and fatigue of steel]. Kiev, Technics Publ., 1976. 128 p. <http://kiev.glo.ua/marketing/tehnika-specializirovannoe-izdatelstvo-gp.html>
4. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Металлургия, 1980. – 176 с.
Javojski V.I., Rubenchik Yu.I., Ozenko A.P. Nemetallicheskie vkluchenija i svoistva stali [Non-metallic inclusions and properties of steel]. Moscow, Metallurgy Publ., 1980. 176 p. <http://www.metallurgv-publishers.net>
5. Шпис Х.-И. Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации. М.: Металлургия, 1971. – 125 с.
Shpis H.-I. Povedenie nemetallicheskih vkluchenij v stali pri cristallizatsii i deformatsii [Behaviour of non-metallic inclusions in the time of crystallization and deformation]. Moscow, Metallurgy Publ., 1971. 125 p. <http://www.metallurgv-publishers.net>
6. Виноград М.И., Громова Г.П. Включения в легированных сталях и сплавах. М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
Vinograd M.I., Gromova G.P. Vkluchenija v legirovannih staljah i splavah [Inclusions in alloy steels and alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1972. 216 p. <http://www.metallurgv-publishers.net>
7. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
Ekobory T. Phizika i mehanika razrushenija i prochnosti tverdyh tel [Physics and mechanics of fracture of solid bodies]. Moscow, Metallurgy Publ., 1971. 264 p.

Выводы

При лазерном упрочнении сталей, содержащих неметаллические включения, происходит совмещение лазерной термообработки с микролегированием локальных участков матрицы от внутренних источников – неметаллических включений.

<http://www.metallurgv-publishers.net>

8. 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

Gubenko S.I. Vozmozhnosti transformatsii nemetallicheskih vkluchenij i mizhphasnih granits vchluchenie-matritsa pri visokoenergeticheskikh 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, v. 36, no. 3, pp. 287-315 <http://mfint.imp.kiev.ua/ua/index.html>

9. Упрочнение деталей лучом лазера / Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. – К.: Техника, 1981. – 131 с.

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. <http://kiev.glo.ua/marketing/tehnika-specializirovannoe-izdatelstvo-gp.html>

10. Леонтьев П.А., Чеканов Н.Т., Хан М.Г. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов.–М.: Металлургия, 1986. – 142 с.

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. <http://www.metallurgv-publishers.net>

11. Криптал М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. Структура и свойства сплавов обработанных излучением лазера. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.

Kryshtal M.A., Zhukov A.A., Kokora A.N. Struktura i svoystva splavov obrabotannyh izlucheniem lazera [Structure and properties of alloys treating with laser beam]. Moscow, Metallurgy Publ., 1973. 192 p. <http://www.metallurgv-publishers.net>

12. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов: Справочник // Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. – М.: Машиностроение, 1985. – 496с.

Rikalina N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. Lazernaja i elektronnoluchevaja obrabotka materialov: Spravochnik [Laser and electron-beam treatment of materials], Moscow, Machine building Publ., 1985. 496 p. <http://www.mashin.ru>

13. Дж. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. М, Мир, 1974, 467с.

J. Rady. Dejstvie mozhnogo lazernogo izluchenija [Action of powerful laser radiation]. Moscow, Peace Publ., 1974. 467 p. <http://www.mir-publishers.net>

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

Поступила в редколлегию 21.03.2015

Принята к печати 24.03.2015