

УДК 669:53.49

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241120.52.691

ТРАНСФОРМАЦІЯ НЕМЕТАЛІЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ И НАГРЕВЕ

ГУБЕНКО С. И., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Аннотация. *Цель работы* – изучение фазовых и структурных превращений в неметаллических включениях при импульсном нагружении и последующем нагреве. **Методика.** Проводили динамическое нагружение образцов сталей по схеме метания тонкой пластины (давление 80...90 ГПа, скорость деформации 100 с^{-1} , время воздействия $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$). После импульсного нагружения часть образцов подвергли отжигу или термоциклированию. Исследования проводили методами: металлографическим ("Neophot-21"), электронномикроскопическим (JSM-35), петрографическим, количественной металлографии («Квантимер»). **Результаты.** Исследованы особенности фазовых и структурных превращений в неметаллических включениях при импульсном нагружении и последующем нагреве (высокотемпературный отжиг, термоциклирование). Установлено, что взрывное воздействие, создающее напряжения вблизи включений, оказывают влияние на характер фазовых превращений при последующем нагреве. **Научная новизна.** Определены основные фазовые и структурные превращения в неметаллических включениях, проходящие в момент импульсного нагружения (полиморфные превращения, переход в нестабильное состояние, аморфизация, распад твердых растворов). Показано влияние взрывного воздействия на превращения во включениях при последующем высокотемпературном отжиге и термоциклировании (переход в более стабильное состояние, «расстекловывание», диффузионное дробление, выделение «сателлитных» частиц). **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит разработать режимы импульсной обработки давлением, а также комплексной обработки (взрыв + высокотемпературный отжиг, термоциклическая обработка), позволяющие влиять на механические и эксплуатационные свойства сталей различного назначения.

Ключевые слова: *сталь; неметаллические включения; взрывное нагружение; отжиг; термоциклирование; фазовые превращения*

ТРАНСФОРМАЦІЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТАЛІ ЗА ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА НАГРІВАННЯ

ГУБЕНКО С. І., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Анотація. *Мета роботи* – вивчення фазових і структурних перетворень у неметалевих включеннях за імпульсного навантаження і наступного нагрівання. **Методика.** Проводили динамічне навантаження зразків сталей за схемою метання тонкої пластины (тиск 80...90 ГПа, швидкість деформації 100 с^{-1} , час впливу $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$). Після імпульсного навантаження частину зразків піддали відпалу або термоциклюванню. Дослідження проводили методами: металогіфічним ("Neophot-21"), електронномікроскопічним (JSM-35), петрогіфічним, кількісної металогіфії («Квантимер»). **Результати.** Досліджено особливості фазових і структурних перетворень у неметалевих включеннях за імпульсного навантаження і наступного нагрівання (високотемпературний відпал, термоциклювання). Встановлено, що вибухова дія, яка створює напруження поблизу включень, впливає на характер фазових перетворень під час подальшого нагрівання. **Наукова новизна.** Визначено основні фазові і структурні перетворення в неметалевих включеннях, що відбуваються в момент імпульсного навантаження (поліморфні перетворення, перехід у нестабільний стан, аморфізація, розпад твердих розчинів). Показано вплив вибухової дії на перетворення у включеннях за подальшого високотемпературного відпалу і термоциклювання (перехід у більш стабільний стан, «розкльовання», дифузійне дроблення, виділення «сателітних» частинок). **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити режими імпульсної обробки тиском, а також комплексної обробки (вибух + високотемпературний відпал, термоциклічна обробка), що дозволяють впливати на механічні та експлуатаційні властивості сталей різного призначення.

Ключові слова: сталь; неметалеві включення; вибухове навантаження; відпал; термоцикловання; фазові перетворення

TRANSFORMATION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL UNDER EXPLOSIVE LOADING AND HEATING

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

Material Science Department, National Metallurgical Academy Of Ukraine, 4, Haharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 3748 357, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Abstract. Purpose. The goal of the work was to study phase and structural transformations in nonmetallic inclusions under pulsed loading and subsequent heating. **Methodology.** Dynamic loading of the samples of steels was carried out according to the scheme of throwing a thin plate (the pressure 80...90 GPa, the deformation rate was 100 sec^{-1} , the exposure time was $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$). After pulsed loading, some of the samples were annealed or thermal cycling. The studies were carried out by methods: metallographic ("Neophot-21"), electron microscopic (JSM-35), petrographic, quantitative metallography ("Quantimet"). **Findings.** The features of the phase and structural transformations in nonmetallic inclusions under pulsed loading and subsequent heating (high-temperature annealing, thermal cycling) were investigated. It has been found that the explosive action, which creates stresses near the inclusions, influence on the nature of phase transformations during subsequent heating. **Originality.** The main phase and structural transformations in nonmetallic inclusions that occur at the moment of pulsed loading (polymorphic transformations, transition to an unstable state, amorphization, decomposition of solid solutions) have been determined. The effect of explosive action on transformations in inclusions during subsequent high-temperature annealing and thermal cycling (transition to a more stable state, "devitrification", diffusion crushing, separation of "satellite" particles) was shown. **Practical value.** The use of the results obtained will make it possible to develop modes of pulsed pressure treatment, as well as complex treatment (explosion + high-temperature annealing, thermal cycling), which allow influencing the mechanical and operational properties of steels for various purposes.

Keywords: steel; non-metallic inclusions; explosive loading; annealing; thermal cycling; phase transformations

Введение. Взрывное воздействие применяется для обработки стальных изделий с целью получения метастабильных структур, обеспечивающих повышенный уровень физических, механических, функциональных характеристик, а также для сварки взрывом [1; 2]. Неметаллические включения при этом претерпевают фазовые и структурные превращения, способствующие изменению их физико-механических свойств [3–6]. Целью работы было изучение фазовых и структурных превращений в неметаллических включениях при импульсном нагружении и последующем нагреве.

Материалы и методики. Проводили динамическое нагружение образцов сталей Э3, 12ГС, 08кп, 08ГСЮГФ, 08Ю и 08Х18Н10Т по схеме метания тонкой пластины. Давление составляло 80...90 ГПа, скорость деформации 100 с^{-1} , время воздействия $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. После импульсного нагружения часть образцов подвергли отжигу (950 °С, 3 ч) или термоциклированию (950 °С, 20 мин., 5 циклов).

Исследования проводили методами: металлографическим ("Neophot-21"), электронномикроскопический (JSM-35), петрографическим, количественной металлографии («Квантимет») [3].

Результаты исследований и их обсуждение. В процессе импульсного нагружения ударные волны создают высокие напряжения, вызывающие высокоскоростную деформацию, которая создает концентрации напряжений вблизи неметаллических включений [7–10]. Концентрации напряжений непрерывно возникают и релаксируют, создавая сильно возбужденные состояния вблизи включений [10].

К особенностям высокоскоростной (импульсной) деформации следует отнести резкое увеличение числа источников дислокаций и систем скольжения, возрастание скорости движения дислокаций, что все вместе приводит к резкому увеличению плотности дислокаций, а также точечных дефектов [1; 2; 7–16]. При взрывном нагружении во включениях

возможны структурные и фазовые превращения, которые стимулируются внесением повышенного количества дефектов кристаллического строения, а также аномальным ускорением массопереноса элементов [17]. Эти превращения способствуют переходу включений в нестабильное состояние.

Полиморфные превращения проходят во включениях FeO, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, CaO, SiO₂, CaO·SiO₂, 2CaO·SiO₂, MnO·SiO₂ [3]. После импульсного нагружения обнаружены нестабильные включения Al₂O, CrO и др., а также аналогичные фазы в гетерофазных включениях, у которых метастабильное состояние обусловлено отсутствием термодинамического равновесия между фазами. После взрывного воздействия количество нестабильных оксидов по сравнению с исходным состоянием увеличилось: до обработки они составляли 3...5 % от общего содержания оксидов в стали, после взрыва – до 15 %, что свидетельствует о дестабилизирующем влиянии импульсного нагружения на включения.

В сталях Э3, 12ГС наблюдали аморфизацию включений кремнезёма (рис. 1 а) — до 80 % включений. Разрушение кристаллической решётки включений свидетельствует о значительном возбуждении атомов (ионов) и внесении большого количества дефектов (дислокаций и дисклинаций). В сложных стеклах, наоборот, проходил процесс расстекловывания с образованием микрокристаллических частиц (рис. 1 б).

Взрывное нагружение вызвало также полиморфные превращения во включениях SiO₂, MnS, Al₂O₃, TiO₂, которые, проходя с высокой скоростью, приводят к возникновению фазовых напряжений во включениях (рис. 1 в). Обнаружены случаи аморфизации включений в сталях 08кп, 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.

Как показал анализ рентгено- и электронограмм, снятых с порошковой массы извлечённых включений, отдельные включения претерпели аморфизацию, что возможно благодаря высокоскоростной деформации, способствующей увеличению в них плотности дислокаций и дисклинаций до такой степени, когда нарушается дистанционный параллелизм, типичный для трансляционной симметрии.

При исследовании аморфных силикатных включений сложного состава, содержащих Mn, Fe, Si, Al, установлено, что аморфная матрица включений становится частично кристаллической. Микродифракция электронов сопровождается возникновением диффузного гало в малых углах перед основным диффузным гало с присутствием на первом гало тонких рефлексов, указывающих на выделение микрокристаллических зон, снижающих степень аморфности включений.

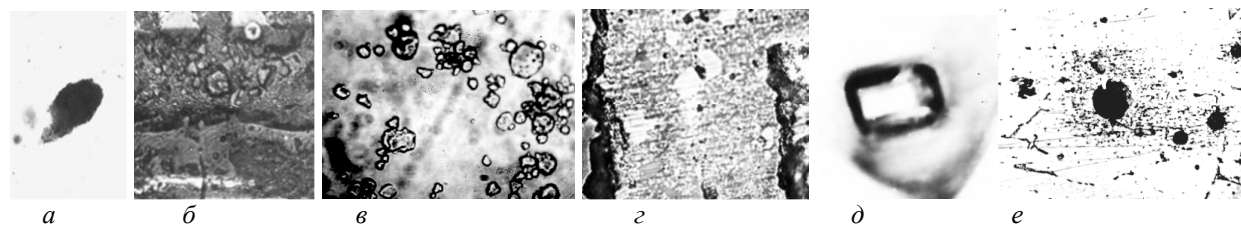


Рис. 1. Неметаллические включения после взрывного воздействия (а – г) и последующего термоциклирования (д, е); а–д – $\times 1000$, е – $\times 800$

В силикатах сложного состава, представляющих собой Fe–Si–O матрицу и частицы шпинели MnO·Al₂O₃, после взрыва обнаружены светлые выделения новой фазы (рис. 1 г). Анализ электронограмм показал,

что образовались силициды FeSi с кубической решеткой. В силикатах сложного состава, содержащих Fe, Mn, Al, Si появились дисперсные выделения оксидов (Fe,Mn)O, MnO·Al₂O₃,

$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, которые обнаруживаются в одном включении вследствие неоднородного распределения компонентов.

Таким образом, взрывная обработка, вносящая большое количество дефектов, способствует распаду пересыщенных твердых растворов во включениях.

Превращения во включениях в условиях импульсного нагружения проходят по сдвиговому механизму, при этом происходит упругое искажение кристаллической решётки исходной фазы и образование межфазной границы. Сдвиговое полиморфное или фазовое превращение во включениях состоит в перестройке решётки в результате перераспределения компонентов, а также упорядоченного коллективного перехода атомов из одной фазы в другую в условиях развития аномального массопереноса [17].

При последующем отжиге либо термоциклировании неметаллические включения, находящиеся в метастабильном состоянии, претерпевают изменения. Превращения во включениях (или в их фазах) при отжиге происходят по нормальному механизму (рис. 1 д), и сопровождаются диффузионным перераспределением компонентов.

Наблюдали превращения включений в более стабильное состояние, например, кристобалит \rightarrow тридимит. Двухфазные включения (частицы галаксита в матрице алюмомарганцевого силиката) превратились в трехфазные благодаря превращению галаксита в корунд и спессартит в процессе нагрева и выдержки стали 08Ю при 1 100...1 200 °С в течение 2,0...2,5 ч.

В результате выделения новых фаз термодинамическое равновесие в системе всего включения становится более стабильным. Состав сложных оксидов типа шпинелей в метастабильном состоянии после взрывного воздействия 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 28 до 69 %.

В ряде случаев микродифракция электронов характеризуется расщеплением основного диффузного гало, что связано с процессами «расслоения» аморфных включений. Действие высоких давлений и температуры приводит к кристаллизации (расстекловыванию) аморфных включений с образованием микрокристаллических зон. При нагреве до 1 000...1 200 °С после взрывного нагружения уровень аморфизации этих включений (или матрицы гетерофазных включений) опять повышается до 90...100 %.

Наблюдаемые явления расстекловывания аморфных и аморфизации кристаллических включений свидетельствуют о больших изменениях внутренней энергии вследствие накопления дефектов при пластической деформации, что приводит к изменению в локальных областях включений характера атомной структуры.

Активирование включений взрывным воздействием приводит при последующих отжиге или термоциклической обработке к их диффузионному дроблению в результате образования полей дисперсных выделений вокруг исходных включений (рис. 1 е). Эти процессы аналогичны образованию полей дисперсных «сателлитных» частиц при нагреве стали без предварительной взрывной обработки [3; 18], но взрывное воздействие приводит к уменьшению размеров этих выделений в среднем в 1,5 раза (табл.).

Выделение частиц второй фазы при распаде твердых растворов, либо диссоциации исходных частиц с образованием «сателлитов» связано с образованием и ростом зародышей новой фазы по механизмам, определяемым условиями обработки [3]. В случае термоциклирования частицы «сателлитов» более дисперсны, чем при отжиге после взрыва, а также после обычного отжига [18].

Средние размеры «спутниковых» частиц d_c и зоны их выделения R_c после отжига и термоциклирования стали 08Ю

Включение	$d_c^{отж}$, мкм / $d_c^{тер}$, мкм	$R_c^{отж}$, мкм / $R_c^{тер}$, мкм
Al ₂ O ₃	0,45/0,40	12/18
MnO·Al ₂ O ₃	0,48/0,41	14/20
(Fe,Mn)S	0,98/0,76	22/23
MnO·SiO ₂	0,61/0,52	22/25

Температура нагрева стали t_n , при которой идет дробление включений и время отжига τ , после взрывного воздействия значительно уменьшилась: для Al₂O₃ и MnO·Al₂O₃ t_n от 1300 до 950 °С, τ от 50 ч до 3 ч для получения дисперсных выделений примерно одних размеров. Для включений (Fe,Mn)S и MnO·SiO₂ t_n изменилась незначительно, однако от 20...25 ч до 3 ч уменьшилось τ для получения выделений одного порядка. Таким образом, взрывное воздействие является эффективным ускорителем дробления включений путем последующей термической обработки.

Фазовые превращения, происходящие при взрывном воздействии и способствующие образованию новых фаз, сопровождаются появлением межфазных границ, которые обеспечивают сцепление исходного включения с этими фазами. Сопряжение осуществляется по типу диффузионной микросварки [1; 3], что подтверждается поведением включений при последующей деформации [3; 19; 20], либо сдвиговым путем, что обусловлено условиями указанных видов обработки. В работах [3; 21] приведены результаты определения несоответствий f кристаллических решеток включений и стальной матрицы, которые могут быть полезны при изучении их возможных сопряжений в момент взрывного воздействия.

Таким образом, в процессе деформационно-тепловых воздействий (взрывное нагружение, взрыв + высокотемпературный отжиг либо термоциклическая обработка) в неметаллических включениях происходят фазовые и структурные перестройки, что способствует изменению размеров и распределению включений, их фазового и структурного состояния и несомненно влияет на локальные зоны стальной матрицы вблизи включений. Характер этих изменений может существенно изменить адгезионные связи на межфазных границах включение – матрица, привести к упрочнению либо, наоборот, пластифицированию неметаллических включений [19; 20], а также влиять на механизмы образования микроразрушений вблизи включений [3–5], коррозионное разрушение [22], износ [3–5; 23].

Выводы. Взрывное нагружение, а также комбинированное воздействие (взрыв + высокотемпературный отжиг либо термоциклическая обработка) приводят к фазовым и структурным превращениям в неметаллических включениях. Эти превращения способствуют изменению уровня стабильности, размеров и распределения включений, что существенно влияет на их физико-механические свойства, а также механические и эксплуатационные свойства стальных изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск : Наука, 1980. 219 с.
2. Эпштейн Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом. Москва : Металлургия, 1988. 280 с.
3. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали : монография. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.

4. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : изд. НМетАУ, ИЦ «Системные технологии», 2014. 301 с.
5. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталей : монография. Германия, Саарбрюккен (Saarbrücken) : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. 476 с.
6. Губенко С. И. Поведение неметаллических включений при высокоскоростной деформации в условиях взрывного воздействия. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1989. № 1. С. 40–41.
7. Губенко С. И. Волны деформации вблизи неметаллических включений в условиях взрывного воздействия. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1992. № 7. С. 32–33.
8. Ушеренко С. М., Губенко С. И., Ноздрин В. Ф. Дальнедействующие поля напряжений вблизи дисперсных частиц, возникающие при взрывном легировании металлических материалов. *Металлофизика*. 1991. Т. 13, № 7. С. 57–64.
9. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany-Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 341 с.
10. Губенко С. И. Влияние неметаллических включений на формирование структуры стальной матрицы при взрывном нагружении. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 36–41.
11. Ушеренко С. М., Губенко С. И., Ноздрин В. Ф. Изменение структуры металлической мишени при высокоскоростном внедрении дисперсных частиц. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991. № 6. С. 34–36.
12. Nozdrin V. F., Usherenko S. M., Gybenko S. I. Mechanism of hardening metals in superdeep penetration of high-speed particles. *Physics and chemistry of materials treatment*. 1991. № 6. Pp. 19–24.
13. Ушеренко С. М., Губенко С. И., Ноздрин В. Ф. Изменение структуры железа и стали при сверхглубоком внедрении высокоскоростных частиц. *Известия АН СССР. Металлы*. 1991. № 1. С. 124–125.
14. Ноздрин В. Ф., Ушеренко С. М., Губенко С. И. Упрочнение стали 08X18H10T дисперсными частицами при взрывном воздействии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991. № 10. С. 60–63.
15. Usherenko, S. M., Gybenko, S. I., Sobolev V. V. Structural changes during the bulk doping of nuclear stainless steel. *EUROMAT-96. Conference on materials and Nuclear Power*. Bournemouth, UK, 1996. Pp. 315–321.
16. Usherenko S. M., Nozdrin V. F., Gubenko S. I., Romanov G. S. Motion and deceleration of explosively accelerated solid particles in a metallic target. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1994. № 37 (15), pp. 2367–2375.
17. Лариков Л. Н., Мазанко В. Ф., Фальченко В. М. Массоперенос в металлах при импульсном нагружении. *Физика металлов и металловедение*. 1983. № 6. С. 144–145.
18. Губенко С. И., Сычков А. Б., Парусов Э. В., Денисенко А. И. Влияние высокотемпературного нагрева на трансформацию неметаллических включений в сталях. *Сталь*. 2018. № 5. С. 40–46.
19. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2016. 549 с.
20. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany-Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2019. 330 с.
21. Губенко С. И. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение – матрица и свойства сталей. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2017. 506 с.
22. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Исследование влияния неметаллических включений на коррозионное поведение колесной стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 7. С. 70–74.
23. Губенко С. И. Влияние неметаллических включений и продуктов коррозии на износостойкость железнодорожных колес. *Сталь*. 2019. № 6. С. 51–55.

REFERENCES

1. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980, 219 p. (in Russian).
2. Epstein G.N. *Stroyeniye metallov, deformirovannykh vzryvom* [The structure of metals deformed by the explosion]. Moscow : Metallurgy Publ., 1988, 280 p. (in Russian).
3. Gubenko S.I. and Oshkadevov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 2016, 528 p. (in Russian).
4. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskih vklucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, Information Technology Systems Technologies Publ., 2014, 301 p. (in Russian).
5. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenija i prochnost stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2015, 476 p. (in Russian).
6. Gubenko S.I. *Povedeniye nemetallicheskih vklucheniy pri vysokoskorostnoy deformatsii v usloviyakh vzryvnogo vozdeystviya* [The behavior of non-metallic inclusions during high-speed deformation in explosive

conditions]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1989, no. 1, pp. 40–41. (in Russian).

7. Gubenko S.I. *Volny deformatsii vblizi nemetallicheskih vklyucheniy v usloviyakh vzryvnogo vozdeystviya* [Deformation waves near non-metallic inclusions in explosive conditions]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1992, no. 7, pp. 32–33. (in Russian).

8. Usherenko S.M., Gubenko S.I. and Nozdrin V.F. *Dal'nodeystviyushchiye polya napryazheniy vblizi dispersnykh chastits, vznikayushchiye pri vzryvnom legirovanii metallicheskih materialov* [Long-range stress fields near dispersed particles arising from explosive alloying of metallic materials. Metallophysics]. 1991, vol. 13, no. 7, pp. 57–64. (in Russian).

9. Gubenko S.I. *Fizicheskaya priroda plastichnosti i uprochneniya metallov pri deformatsii* [Physical nature of plasticity and strengthening of metals upon deformation]. Germany-Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020, 341 p. (in Russian).

10. Gubenko S.I. *Vliyaniye nemetallicheskih vklyucheniy na formirovaniye struktury stal'noy matritsy pri vzryvnom nagruzhnenii* [Influence of non-metallic inclusions on the formation of the structure of the steel matrix under explosive loading]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2019, no. 4, pp. 36–41. (in Russian).

11. Usherenko S.M., Gubenko S.I. and Nozdrin V.F. *Izmeneniye struktury metallicheskoj misheni pri vysokoskorostnom vnedrenii dispersnykh chastits*. [Changes in the structure of a metal target during high-speed penetration of dispersed particles]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1991, no. 6, pp. 34–36. (in Russian).

12. Nozdrin V.F., Usherenko S.M. and Gybenko S.I. Mechanism of hardening metals in superdeep penetration of high-speed particles. *Physics and chemistry of materials treatment*. 1991, no. 6, pp. 19–24.

13. Usherenko S.M., Gubenko S.I. and Nozdrin V.F. *Izmeneniye struktury zheleza i stali pri sverkhglubokom vnedrenii vysokoskorostnykh chastits* [Changes in the structure of iron and steel during superdeep penetration of high-speed particles]. *Izvestiya AN SSSR. Metally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1991, no. 1, pp. 124–125. (in Russian).

14. Nozdrin V.F., Usherenko S.M. and Gubenko S.I. *Uprochneniye stali 08KH18N10T dispersnyimi chastitsami pri vzryvnom vozdeystvii* [Hardening of 08Kh18N10T Steel by Dispersed Particles under Explosive Impact]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of universities. Ferrous metallurgy]. 1991, no. 10, pp. 60–63. (in Russian).

15. Usherenko S.M., Gybenko S.I. and Sobolev V.V. Structural changes during the bulk doping of nuclear stainless steel. EUROMAT-96. Conference on materials and Nuclear Power. Bournemouth, UK, 1996, pp. 315–321.

16. Usherenko S.M., Nozdrin V.F., Gubenko S.I. and Romanov G.S. Motion and deceleration of explosively accelerated solid particles in a metallic target. *International journal of heat and mass transfer*. 1994, no. 37 (15), pp. 2367–2375.

17. Larikov L.N., Mazanko V.F. and Falchenko V.M. *Massoperenos v metallakh pri impul'snom nagruzhnenii* [Mass transfer in metals under pulsed loading. Physics of metals and metal science]. 1983, no. 6, pp. 144–145. (in Russian).

18. Gubenko S.I., Sychkov A.B., Parusov E.V. and Denisenko A.I. *Vliyaniye vysokotemperaturnogo nagreva na transformatsiyu nemetallicheskih vklyucheniy v stalyakh* [The effect of high-temperature heating on the transformation of non-metallic inclusions in steels]. *Stal'* [Steel]. 2018, no. 5, pp. 40–46. (in Russian).

19. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklyucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2016, 549 p. (in Russian).

20. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh*. [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2019, 330 p. (in Russian).

21. Gubenko S.I. *Mezhfaznye granitsi vkluchenie-matritsa I svoisrva staley* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany – Mauritius : Palmarium Academic Publishing, 2017, 506 p. (in Russian).

22. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. *Issledovaniye vliyaniya nemetallicheskih vklyucheniy na korroziyonnoye povedeniye kolesnoy stali* [Investigation of the influence of non-metallic inclusions on the corrosion behavior of wheel steel]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2011, no. 7, pp. 70–74. (in Russian).

23. Gubenko S.I. *Vliyaniye nemetallicheskih vklyucheniy i produktov korrozii na iznosostoykost' zheleznodorozhnykh koles* [Influence of nonmetallic inclusions and corrosion products on wear resistance of railway wheels]. *Stal'* [Steel]. 2019, no. 6, pp. 51–55. (in Russian).

Поступила в редакцию: 01.11.2020.