

УДК 539.8

PACS: 32.10.-f, 33.15.-e

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-515-521

EDN: DSJKSF

**Возникновение локализованных микрообластей  
при экстремальных воздействиях в марганцовистых сталях***М. Б. Лесков, Л. И. Квеглис, Р. Е. Сакенова, О. А. Масанский*

*Проведен литературный обзор и некоторые эксперименты, иллюстрирующие изменения состава, структуры и свойств марганцовистых сплавов, обусловленные иерархически согласованными превращениями в системе возбужденных атомов в условиях экстремальных воздействий. Предлагается рассмотрение изменений в системе возбужденных атомов на различных масштабных уровнях, включая ядерные превращения.*

*Ключевые слова:* марганцовистые стали, сталь 20ГЛ, сталь Fe86Mn13C, пластическая деформация, ударное нагружение, сильноточные импульсно-периодические воздействия, синергетика, ядерные превращения.

**Введение**

Исследование структурно-фазовых превращений в металлах и сплавах является одной из важных задач физики конденсированного состояния. Особый интерес представляют структурно-фазовые превращения при экстремальных воздействиях различной физической природы: механические, тепловые, электромагнитные и т. д. на металлический объект.

При механических воздействиях на твердое тело возникают упругие и пластические деформации, в процессе которых, согласно [1] выполняются условия:

1) появление зон локальных растягивающих нормальных напряжений, создающих увеличенный молярный объем, в котором может происходить локальная структурная трансформация;

2) действия в этих зонах моментных напряжений, которые создают локальную кривизну и приводят к возникновению сильно возбужденного неравновесного материала в зоне кривизны кристаллической решетки;

3) возникновение в зоне кривизны кристаллической решетки новых структурных состояний в потенциальном поле системы частиц, имеющих собственную полосу энергетических состояний в электронно-энергетическом спектре (рис. 1).

На рисунке 1 приведен пример возникновения модуляции растягивающих и сжимающих нормальных и касательных напряжений под действием внешней нагрузки. Эта модуляция напряжений создает зоны кривизны кристаллической решетки, в которых есть сопряжение увеличенных или уменьшенных межатомных расстояний. Закритические состояния приводят к образованию бифурка-

Лесков Михаил Борисович<sup>1</sup>, аспирант.

E-mail: leskovmb@gmail.com

Квеглис Людмила Иосифовна<sup>2</sup>, профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: kveglis@list.ru

Сакенова Римма Ерболатовна<sup>2</sup>, PhD.

E-mail: sakenova\_rimma@mail.ru

Масанский Олег Александрович<sup>1</sup>, доцент, к.т.н.

E-mail: omasansky@sfu-kras.ru

<sup>1</sup> Политехнический институт СФУ.

Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79.

<sup>2</sup> ВКУ им. С. Аманжолова.

Республика Казахстан, Восточно-Казахстанская

область, 070002, г. Усть-Каменогорск,

ул. 30-й Гвардейской дивизии, 34.

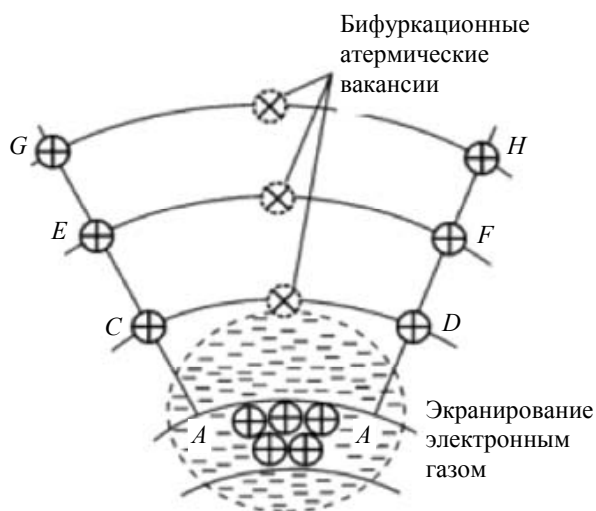
Статья поступила в редакцию 1.09.2023

После доработки 24.11.2023

Принята к публикации 5.12.2023

© Лесков М. Б., Квеглис Л. И., Сакенова Р. Е.,  
Масанский О. А., 2023

ционных атермических вакансий. Здесь возникают межузельные бифуркационные структурные состояния (МБСС), которых нет в стабильном трансляционно-инвариантном кристалле. Происходит перераспределение электронного газа в зонах кривизны, где изменяются межионные расстояния и возникают МБСС [2].



**Рис. 1.** Генерация межузельных бифуркационных вакансий в зонах локальной кривизны кристаллической решетки и возникновение nano частицы в зоне локального сжатия кристаллической решетки [2]

В работе [3] определены понятия масштабных уровней для процессов, происходящих в твердом теле. Эти уровни сводятся в основном к трем: макроскопический уровень, мезоскопический уровень и нануровень. В работе [4] приведены зависимости термодинамического потенциала Гиббса от молярного объема с учетом локальных зон гидростатического растяжения различного масштаба, в которых возникают дефектные структуры и область гидростатического сжатия. Мы считаем, что каждый тип деформационного дефекта, как солитон кривизны определенного масштабного уровня, характеризуется собственным локальным минимумом. В результате в зонах локализации деформации происходит возникновение жидкоподобного состояния, в котором создается большая подвижность атомов. В жидкоподобном состоянии формируются интерметаллиды. Нагрузка создает сдвиг, который приводит к переключению химических связей и изменяет симметрию кристаллической фазы.

Стоит обратить внимание на область гидростатического сжатия, отвечающую описанию сближения атомов в результате внешних энергетических воздействий. Здесь возможны два положения: ситуация, когда термодинамический потенциал Гиббса находится в отрицательной и в положительной области энергии. Эти два положения принципиально различаются. В случае если рассматривать область отрицательного термодинамического потенциала, то в ней возможны промежуточные метастабильные состояния, хоть и обладающие энергией Гиббса со значениями, превышающими энергию стабильного состояния. В случае области положительного термодинамического потенциала мы имеем дело с непрерывным возрастанием энергии при продолжающемся сжатии. Из работы [5] известно, что под влиянием ударного нагружения взрывом в зоне локализации деформации градиент давления создает условия для переключения химических связей. Нами предложена энергетическая диаграмма механохимической реакции. Если, энергии, приходящей извне, достаточно для того, чтобы превысить энергию связи исходного состояния, то произойдет разрыв химических связей и элементы окажутся в виде ионов. Это возбужденные состояния атомов, время нахождения в которых около  $10^{-13}$  с [6]. В результате переключения химических связей образуются продукты механохимических реакций, которые будут иметь энергию Гиббса меньшую, чем энергия исходного состояния. Природа химической связи полностью определяется электрическим взаимодействием ядер и электронов [7]. На примерах сплавов железа с марганцем такие взаимодействия становятся очевидными.

В работе [8] теоретически и экспериментально показано, что для возбуждения ядра железа необходима энергия 80–120 кэВ (рис. 2).

Из рисунка 2 следует, что при облучении образца железа энергиями порядка 1 МэВ возможны возбуждения ядер, в результате которых могут реализовываться трансмутации, например, железа в марганец. В работе [9] экспериментально обнаружено, что достаточно энергии 1,034 МэВ, чтобы возбудить переходы  $Fe \leftrightarrow Mn$ .

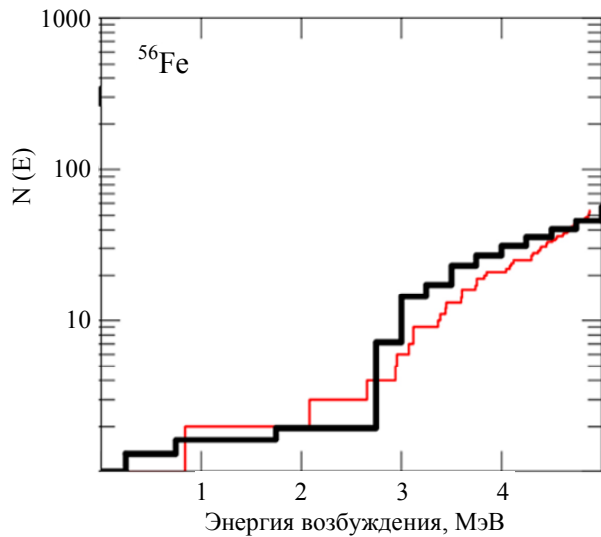


Рис. 2. Сравнение совокупного количества наблюдаемых уровней ядерных переходов  $N(E)$  в зависимости от  $U$  (МэВ) энергии возбуждения для образца Fe56. Красная тонкая линия – теоретические предсказания, толстые черные линии – экспериментальные данные [8]

Цель работы – объяснить результаты экспериментов, полученные на образцах марганцовистых сталей, подвергнутых экстремальным воздействиям различной природы, с позиции возможной трансмутации  $Fe \leftrightarrow Mn$ .

### Образцы и методы

Образцы стали 20ГЛ сечением  $1\text{ см}^2$  и длиной  $\sim 5\text{ см}$  помещали в сильноточный импульсно-периодический ускоритель СИНУС-7 и подвергали воздействию тока 20 кА как показано на рисунке 3 [10].

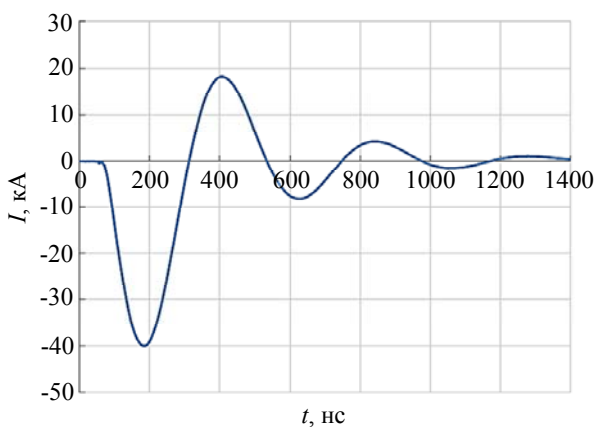


Рис. 3. Зависимость изменения тока, прошедшего через образец стали 20ГЛ от времени в установке СИНУС-7,  $I$  – ток,  $t$  – время

Образцы Fe86Mn13C подвергали следующей термообработке: перед закалкой образцы отжигали при температуре  $800\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 7 часов для растворения карбидов. Термический нагрев под закалку на аустенит происходил ступенчато. Первоначально нагрев, производили до  $750\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$  и выдерживали 5 часов. Затем производили нагрев до  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 30 минут и выдерживали при заданной температуре 6 часов и охлаждали в воде. После закалки образцы подвергали механическому нагружению на маятниковом копре для оценки ударной вязкости [11]. Различные области излома таких образцов исследовали в сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с энергодисперсионной приставкой INCA [12].

### Результаты и их обсуждение

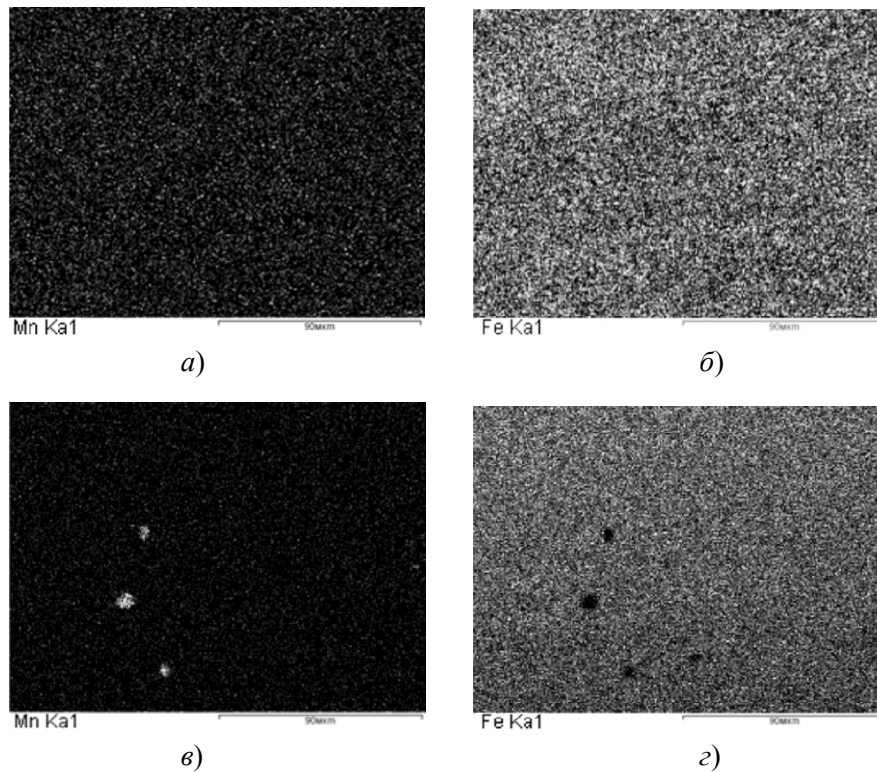
Как было указано выше, на образцах стали 20ГЛ разряжали конденсатор и создавали импульсный ток силой в 20 кА. Под действием импульсного тока возбуждается электронная подсистема атома, при этом резко повышается плотность электронов на уровне Ферми. Возбужденное состояние электронов приводит к возбужденному состоянию нуклонов в ядре атома [8].

Возбужденные состояния нуклонов и электронов взаимодействуют друг с другом так, что некоторые частоты в спектрах попадают в резонанс. В результате происходит поглощение и испускание квантов энергии, что приводит к различным типам низкотемпературных ядерных превращений. В качестве примера может служить работа [9] где проведен эксперимент «ускоритель работает в стационарном режиме при энергии протонного пучка ниже порога реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}(1,882\text{ МэВ})$  и генерации нейтронов не происходит; при подаче отрицательного короткого (200 нс) импульса напряжения 40 кВ на генерирующую нейтроны мишень, электрически изолированную от корпуса установки, энергия протонов увеличивается до 1,915 МэВ, что и приводит к вспышке нейтронного излучения».

На рисунке 4 приведен один и тот же участок поверхности образца стали 20ГЛ, по кото-

рому был пропущен ток силой 20 кА. Сравнивая рисунки *а)*, *б)*, *в)* и *г)* можно заключить, что в локализованных областях диаметром  $\approx 3$  мкм происходило превращение железа в

марганец. Образцы до прохождения импульсного тока не содержали выделений марганца (рис. 4*а*, 4*б*). Таким образом, можно сделать вывод о превращении Fe в Mn [10].

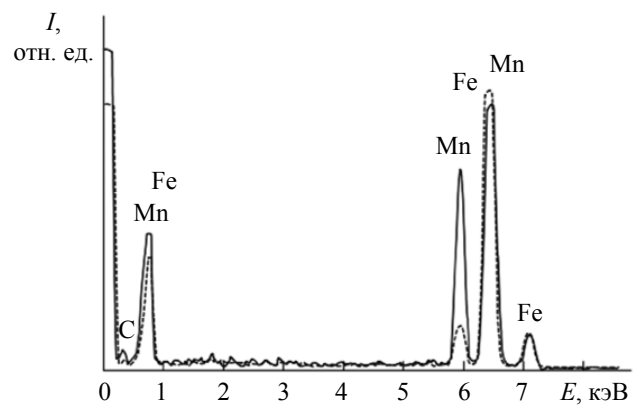


**Рис. 4.** Изображение карт распределения химических элементов, полученные на исследуемой поверхности образца стали 20ГЛ, в характеристическом рентгеновском излучении: *а)* – марганца до воздействия токов силой 20 кА; *б)* – железа до воздействия токов силой 20 кА; *в)* – марганца после воздействия; *г)* – железа после воздействия

Образцы стали Fe86Mn13C с наибольшей (около 300 Дж/см<sup>2</sup>) ударной вязкостью имели неоднородную структуру зоны разрыва. В зоне удара маятника копра формируется хрупкий излом. В зоне отрыва этого же образца присутствуют только кратеры вязкого излома. На дне таких кратеров обнаружены частицы, которые наблюдаются только в зонах отрыва образцов с вязким изломом. Исследования химического состава частиц на дне кратера и стенок кратера с помощью микрозонда и энергодисперсионной приставки показали, что частицы на дне кратеров обогащены марганцем. До ударного нагружения распределение компонентов в сплаве было однородным и соответствовало формуле Fe86Mn13C.

На рисунке 5 представлены результаты энергодисперсионного анализа, полученные от образца, структура которого представляет

собой кратеры вязкого излома. Глубина каждого кратера на изломе составляет в среднем 15 мкм [12, 1]. Это удалось определить с помощью перефокусировки зонда при вертикальном смещении предметного столика сканирующего электронного микроскопа.

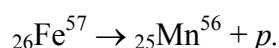


**Рис. 5.** Энергодисперсионные спектры: частица ровная линия графика; край кратера пунктирная линия

В работе В. Е. Панина результаты этого эксперимента связаны с аномально высокими скоростями массопереноса в динамических ротациях [1]. Например, в работе [13] показано возрастание скорости массопереноса на 15 порядков (по сравнению с обычной диффузией) в условиях сверхвысоких давлений и сдвиговых деформаций. Но таких скоростей массопереноса все еще недостаточно для образования таких массивных участков марганца (3 мкм) за столь короткий промежуток времени.

Результаты экспериментов, представленные на рисунках 4 и 5, позволяют предположить, что в условиях экстремальных воздействий на образцы сплавов 20ГЛ и Fe86Mn13C в областях локализации деформации возможен переход  $Fe \leftrightarrow Mn$ . Известно, что железо может претерпевать переход в марганец и обратно [14–16].

В образцах Fe86Mn13C обнаружен эффект магнитного последствия после ударной нагрузки [17]. Спектр ядерного  $\gamma$ -резонанса, полученный от деформированного образца, стали Fe86Mn13C размерами 0,1×5×5 мм с источником  $Co_{57}$ , содержал парамагнитный синглет, по форме напоминающий картину, показанную для марганца авторами работы [15]. Поскольку образец стали Fe86Mn13C после ударной нагрузки становился магнитным, авторы ожидали увидеть спектр в виде характерного секстета. Отсутствие секстета в спектре свидетельствует о том, что при комнатной температуре достаточно  $\gamma$ -излучения для того, чтобы материал утратил магнитные свойства [18]. Авторы предполагаем возможность протонного распада [19] в образцах стали Fe86Mn13C, подвергнутых ударной нагрузке и далее облучению  $\gamma$ -квантами в Мессбауэровском спектрометре:



Причину возможного протонного распада мы связываем с резонансными эффектами, теоретически обоснованными в работе [20, 21] и экспериментально представленными в работе [22], где показан скачкообразный характер накопления деформации при механическом напряжении вблизи предела текучести. Спектральная плотность акустической эмиссии представляет собой острые резонансные линии, свидетельствующие о существовании

резонансных объемов в пластически деформируемом материале. Особенности температурного поведения спектральной плотности свидетельствуют об увеличении колебательной энергии стоячих волн в резонансных объемах деформируемого материала.

## Заключение

На основании анализа литературы и экспериментальных результатов, полученных в образцах марганцовистых сталей предполагается возможность трансмутации железа в марганец при энергиях, не превышающих 200 кэВ. Это происходит за счет синергии и кумуляции энергии на разных масштабных уровнях.

Показано, что рассмотрение трех уровней масштабной иерархии, предложенной В. Е. Паниным, недостаточно для полного описания процессов, происходящих при экстремальных внешних воздействиях на твердое тело. Следует расширить это рассмотрение, добавив четвертый уровень взаимодействия – электрон-ядро, приводящий ядро в возбужденное резонансное состояние.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. / Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 3. С. 7–26.
2. Панин В. Е., Панин А. В., Елсукова Т. Ф., Попкова Ю. Ф. / Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 6. С. 7–18.
3. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. / Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 3. С. 7–26.
4. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. / Физика металлов и металловедение. 2010. Т. 110. № 5. С. 487–496.
5. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Физматлит, 2008.
6. Журков С. Н., Санфирова Т. П. / Журнал технической физики. 1958. Т. 28. С. 1719–1726.
7. Паулинг Л. Природа химической связи. – М. – Л.: Госхимиздат, 1947.
8. Capote R., Herman M., Obložinský P. et al. / Nuclear Data Sheets. 2009. Vol. 110. № 12. P. 3107–3214.
9. Алейник В. И., Касатов Д. А., Макаров А. Н., Таскаев С. Ю. / Приборы и техника эксперимента. 2014. № 4. С. 9.
10. Каравайцева А. А., Квезлис Л. И., Герт С. С., Анфилофьев В. В. / Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 3. С. 356–365.

11. Kveglis L. I., Dzhes A. V., Volochaev M. N. et al. / Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2015. Vol. 8. № 1. P. 48–56.
12. Квеглис Л. И., Носков Ф. М., Казанцева В. В. и др. / Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 43–45.
13. Ениколопов Н. С. / Тезисы доклада Международного симпозиума по химической физике. – М.: Изд. отд. хим. физики, Черногоровка, 1981. С. 83.
14. Kervran C. Louis. Transmutations Biologiques, Metabolismes Aberrants de l'Azote, le Potassium et le Magnesium. – Paris: Librairie Maloine S.A., 1962.
15. Vysotskii V. I., Kornilova A. A. Nuclear Fusion and Transmutation of Isotopes in Biological Systems. – М.: MIR Publishing House, 2003.
16. Biberian J.-P. / J. Condens Matter Nucl. Sci. 2012. № 7. P. 11–25.
17. Лесков М. Б., Квеглис Л. И., Носков Ф. М., Лоптин И. С. Способ контроля качества литых заготовок из стали 110Г13Л и устройство для его осуществления. Патент № 2618503 (РФ). 2017.
18. Казанцева В. В. Структурные и фазовые превращения, протекающие в областях локализации деформации стали 110Г13Л при динамических нагрузках: Дисс. канд. техн. наук. – Красноярск. СФУ. 2010.
19. Jackson K. P. et al. / Phys. Lett. B. 1970. № 33. P. 281.
20. Гареев Ф. А., Жидкова И. Е., Ратис Ю. Л. / Прикладная физика. 2005. № 3. С. 24–33.
21. Головнев И. Ф., Головнева Е. И., Мерзиевский Л. А., Фомин В. М. / Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 3. С. 35–43.
22. Макаров С. В., Плотников В. А. / Известия Алтайского государственного университета. 2019. № 1(105). С. 39–43.

PACS: 32.10.-f, 33.15.-e

## Changes in the composition, structure, and properties in samples of manganese steels under extreme impacts

*M. B. Leskov<sup>1</sup>, L. I. Kveglis<sup>2</sup>, R. E. Sakenova<sup>2</sup> and O. A. Masansky<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Siberian Federal University  
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia  
E-mail: leskovmb@gmail.com

<sup>2</sup> Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University  
34 30th Gvardeiskoy Divisii st., Ust-Kamenogorsk, East Kazakhstan region, 070002,  
Republic of Kazakhstan

*Received 1.09.2023; revised 24.11.2023; accepted 5.12.2023*

***The paper contains a literature review and some experiments illustrating changes in the composition, structure, and properties of manganese alloys due to hierarchically consistent transformations in a system of excited atoms under extreme conditions. It is proposed to consider changes in the system of excited atoms at various scale levels, including nuclear transformations.***

***Keywords:*** manganese steels, 20GL steel, Fe86Mn13C steel, plastic deformation, impact loading, high-current pulse-periodic effects, synergetics, nuclear transformations.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-515-521

### REFERENCES

1. Panin V. E., Egorushkin V. E., Derevyagina L. S. and Deryugin E. E., Physical Mesomechanics **16** (3), 183–190 (2013).
2. Panin V. E., Panin A. V., Elsukova T. F. and Popkova Yu. F., Physical mesomechanics **17** (6), 7–18 (2014) [in Russian].

3. Panin V. E. and Egorushkin V. E., *Physical mesomechanics* **14** (3), 7–26 (2011) [in Russian].
4. Panin V. E. and Egorushkin V. E., *Physics of metals and metal science* **110** (5), 487–496 (2010) [in Russian].
5. Zeldovich Ya. B. and Raiser Yu. P., *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*, Moscow, Fizmatlit, 2008 [in Russian].
6. Zhurkov S. N. and Sanfirova T. P., *Journal of technical physics* **28**, 1719–1726 (1958) [in Russian].
7. Pauling L., *The nature of the chemical bond*, Cornell Univ., 1960.
8. Capote R., Herman M., Obložinský P. et al., *Nuclear Data Sheets* **110** (12), 3107–3214 (2009).
9. Aleinik V. I., Makarov A. N., Taskaev S. Y. and Kasatov D. A., *Instruments and Experimental Techniques* **57** (4), 381–385 (2014) [in Russian].
10. Karavaitseva A. A., Kveglis L. I., Gert S. S. and Anfilofiev V. V., *Journal of the Siberian Federal University. Series: Technics and technologies* **12** (3), 356–365 (2019) [in Russian].
11. Kveglis L. I., Dzhes A. V., Volochaev M. N. et al., *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies* **8** (1), 48–56 (2015) [in Russian].
12. Kveglis L. I., Noskov F. M., Kazantseva V. V. et al., *Steel in Translation* **42** (12), 817–819 (2012) [in Russian].
13. Enikolopov N. S., *Abstracts of the International Symposium on Chemical Physics*, Moscow, Ed. otd. chem. Physics, Chernogolovka, 1981, p. 83 [in Russian].
14. Kervran C. Louis, *Transmutations Biologiques, Metabolismes Aberrants de l'Azote, le Potassium et le Magnesium*, Paris, Librairie Maloine S.A., 1962.
15. Vysotskii V. I. and Kornilova A. A., *Nuclear Fusion and Transmutation of Isotopes in Biological Systems*, Moscow, MIR Publishing House, 2003.
16. Biberian J.-P., *J. Condens Matter Nucl. Sci.*, № 7, 11–25 (2012).
17. Leskov M. B., Kveglis L. I., Noskov F. M. and Lopin I. S. A method for quality control of cast billets from steel 110G13L and a device for its implementation. Patent № 2618503 (RF). 2017 [in Russian].
18. Kazantseva V. V., *Structural and phase transformations occurring in the regions of localization of deformation of steel 110G13L under dynamic loads: Diss. cand. tech. Sciences*. Krasnoyarsk. SFU, 2010 [in Russian].
19. Jackson K. P. et al., *Phys. Lett. B*, № 33, 281 (1970).
20. Gareev F. A., Zhidkova I. E. and Ratis Yu. L., *Applied Physics*, № 3, 24–33 (2005) [in Russian].
21. Golovnev I. F., Golovneva E. I., Merzhievsky L. A. and Fomin V. M., *Physical mesomechanics* **16** (3), 35–43 (2013) [in Russian].
22. Makarov S. V. and Plotnikov V. A., *Proceedings of the Altai State University*, № 1(105), 39–43 (2019) [in Russian].