

05;12

## Изменения в микроструктуре и составе стали после воздействия высокоскоростного потока микрочастиц

© Е.Л. Зильбербранд,<sup>1</sup> Б.В. Румянцев,<sup>1</sup> М.Д. Толкачев,<sup>2</sup> С.М. Ушеренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: post@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии декабря РАН,  
199034 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: admin@ad.igpp.ras.spb.ru

<sup>3</sup> Белорусский национальный технический университет,  
220107 Минск, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 18 января 2006 г.)

Приведены результаты исследования микроструктуры и состава стали, подвергнутой воздействию потоком микрочастиц плотностью  $\sim 2 \text{ kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$  со скоростью 0.8–1.5 km/s. Отмечается, что наблюдаемые неоднородности микроструктуры не связаны с материалом воздействующего потока микрочастиц, а представляют собой области локальной деформации и технологических примесей стали, которые увеличиваются с ростом давления в ударной волне.

PACS: 81.40.Wx, 45.50.Tn

### Введение

Современные средства защиты космических аппаратов (КА) рассчитаны на воздействие высокоскоростных частиц размером более 0.1 mm, приводящее к образованию сквозных отверстий, механическому повреждению с изменением формы защищаемых объектов [1]. Рациональной конструкцией защиты признаны два экрана, предназначенные для эффективного диспергирования ударяющей частицы и поглощению вторичных частиц. Воздействие потока микрочастиц на корпус не рассматривалось ввиду отсутствия вышеперечисленных повреждений от них.

В ходе исследований по взрывной обработке металлических преград порошками различных материалов [2] было обнаружено, что при определенных условиях микрочастицы порошка проникают на значительную глубину в металлы, образуя сетку схлопнувшихся каналов. Основной причиной, обеспечивающей сверхглубокое проникание микрочастиц, считалось при динамическом воздействии потенциальной энергии преграды к проникающим частицам [3,4]. Альтернативная позиция сводилась к заносу микрочастиц в объем преграды по трещинам, образовавшимся в результате воздействия на преграду высокоскоростного потока материала [5,6].

Подтверждение возможности проникновения микрочастиц в металлы на глубину, в тысячи раз превышающую их размер, потребует новых подходов к построению защиты и выбору конструкционных материалов КА. Так, в работе [7] была выдвинута гипотеза, объясняющая повышенный уровень отказа электронных устройств КА за счет многократного воздействия высокоскоростных частиц, проникнувших через защиту космического аппарата без нарушения его целостности и герметичности.

Целью данной работы является исследование микроструктуры стальных преград после динамического воздействия высокоскоростным потоком частиц, разогнанных на баллистической установке, для выявления наличия микрочастиц порошка и следов их воздействия в объеме преграды.

### Методика

Для достижения поставленной цели исследовались микроструктура и состав стальной преграды до и после динамического воздействия сплошным и порошкообразным материалом. Особое внимание обращалось на вид, распределение и состав неоднородностей, отличающихся от матричного состояния стали. Исследование изменения структуры матрицы не производилось. Динамическое воздействие обеспечивалось столкновением разогнанного на баллистической установке ударника с преградой из стали. Исследование микроструктуры производилось на электронном сканирующем микроскопе АВТ-55 (Япония) в двух режимах: SE (Secondary Electrons) и BSE (Back Scattered Electrons). Режим SE дает изображение микрорельефа плоскости шлифа в виде совокупности зерен стальной матрицы и дефектов поверхности. Режим BSE дополнительно отражает фазовый состав поверхности, проявляет неметаллические включения в виде темных областей („легкая“ фаза). Элементный состав в микрообластях исследуемого стального образца регистрируется энергодисперсионной микронзондовой системой LINK AN 10 000 (Англия) в диапазоне от натрия до урана.

Таблица 1. Параметры нагружения стальной преграды

№ опыта	Параметры потока воздействия				Начальное давление в преграде, GPa
	Материал	Размер частиц, $\mu\text{m}$	Плотность, $\text{kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$	Скорость, km/s	
14	Фторопласт	Монолит	2.16	1.16	6.9
78	Корунд	40–60	2.0	0.77	2.2
15	«	40–60	2.0	1.18	4.8
16	«	40–60	2.0	1.55	7.8

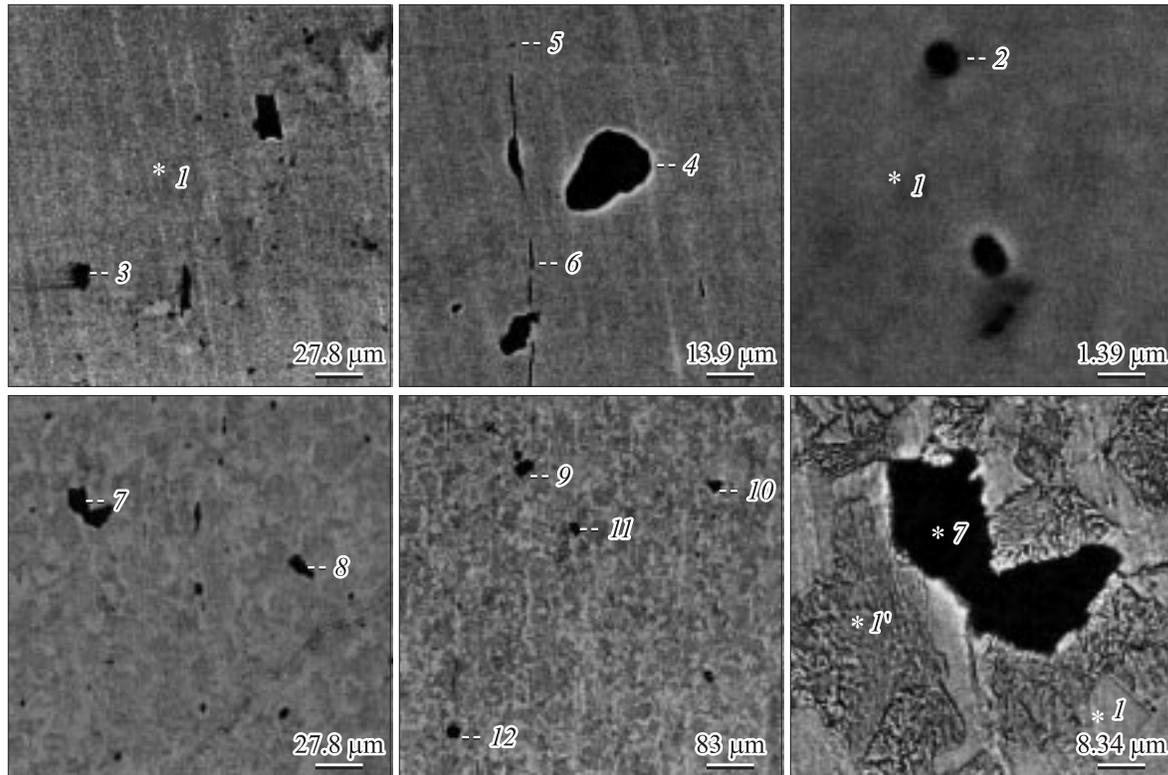


Рис. 1. Микроструктура стали Ст40 (верхний ряд — полированная поверхность, нижний — травленая). Режим съемки BSE.

## Экспериментальная часть

Фторопласт и порошки корунда в полимерной оболочке толщиной 1.5, диаметром 12 и длиной 20 mm разгонялись на баллистической установке и в течение 20–30  $\mu\text{s}$  воздействовали на преграду из стали Ст40 диаметром 27 и толщиной 15 mm. Динамический упругий предел стали Ст40 составляет 1.9 GPa.

Скорость потока микрочастиц подбиралась из условия нагружения в упругой или в упругопластической области. В упругой области давление, создаваемое потоком на границе с преградой, было недостаточным для преодоления прочностного сопротивления. Образования каверны на лицевой поверхности преграды при этом не происходило. При повышении скорости потока образовывалась поверхностная каверна в соответствии с гидродинамическими представлениями. В табл. 1 приведены

параметры материала потока и характеристики нагружения стальной преграды. Начальное давление в преграде находилось по методу торможения ударника о преграду при использовании сайта <http://www.ihed/ras.ru/rusbank/>.

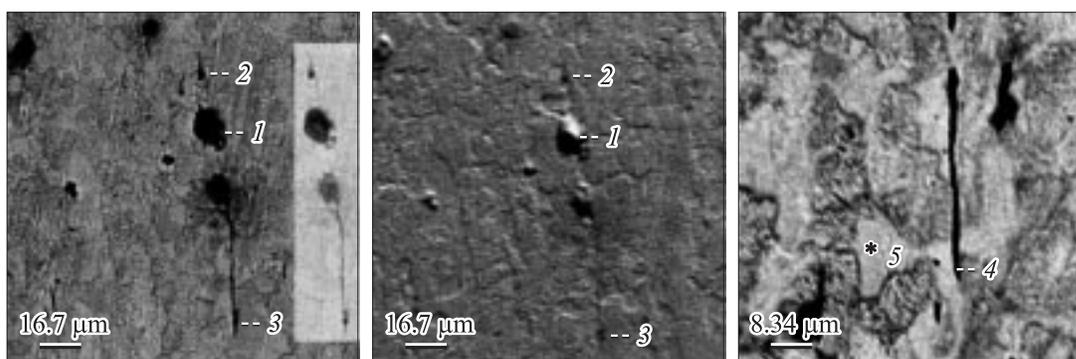
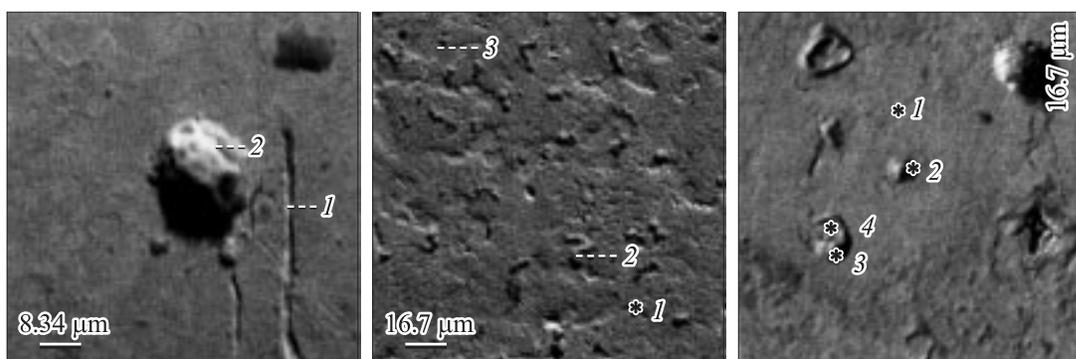
После обработки стальная преграда разрезалась по оси направления удара и полученное сечение шлифовалось наждачной шкуркой на основе карбида кремния различных размеров, полировалось водной суспензией корунда с размером частиц менее 1  $\mu\text{m}$ . Готовые шлифы обрабатывались ультразвуком и травились в течение 10 s в 3% растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

На рис. 1 приведены изображения шлифов исходной стали Ст40 с полированной (верхний ряд) и травленной (нижний ряд) поверхностью. Видно, что на поверхности шлифа наблюдается большое количество неоднородностей, представляющих собой неметаллические вклю-

**Таблица 2.** Элементный состав точек зондирования исходной стали Ст40 в mass.%

№ точки	Fe	Mn	Cr	Si	Cu	Al	S	Ca	Сумма
1(матрица ср.)	97.80	0.69	0.28	0.39	0.33	<u>0.04</u>	<u>0.02</u>	<u>0.02</u>	99.77
2	73.49	15.44	0.24	0.30	0.58	<u>0.04</u>	7.78	<u>0.03</u>	98.37
3	<b>6.77</b>	<b>21.17</b>	<b>0.12</b>	<b>0.11</b>	<b>0.06</b>	<b>41.80</b>	<b>16.16</b>	<b>0.44</b>	<b>86.65</b>
4	59.45	0.42	0.16	0.41	0.19	0.14	0.60	0.31	62.38
5	80.47	7.85	0.38	0.49	1.29	<u>0.12</u>	4.26	<u>0.00</u>	95.26
6	94.37	0.99	0.30	0.50	0.84	<u>0.06</u>	0.25	<u>0.01</u>	97.54
7	22.77	0.23	0.12	1.01	0.31	0.18	1.16	0.46	28.49
8	71.22	0.59	0.29	1.08	0.49	0.48	0.50	0.29	76.25
9	60.60	0.36	0.22	0.34	0.26	<u>0.08</u>	0.73	<u>0.06</u>	63.10
10	58.91	0.52	0.26	0.46	0.33	0.20	0.52	0.18	61.76
11	84.32	0.47	0.34	0.38	0.32	<u>0.04</u>	0.17	<u>0.07</u>	86.65
12	54.92	0.49	0.29	0.50	0.45	<u>0.10</u>	0.57	0.30	58.22

Примечание. 1. Точки зондирования: 1 — матрица, 2–6 — включения полированной поверхности шлифа, 7–12 — включения травленной поверхности (см. рис. 1). 2. Усредненный состав матрицы получен по 17 измерениям. 3. Подчеркнутые значения — меньше погрешности определения. 4. Не приведены значения Co, Ni, P, Mg, Zn, Ti, которые в большинстве своем ниже уровня погрешности прибора, кроме как в сумме содержания элементов. 5. Выделен состав неметаллического включения, содержания, содержащий застрявшие частицы шлифующего материала.

**Рис. 2.** Микроструктура стальной преграды Ст40 после нагружения фторопластом. Режимы съемки BSE, SE и BSE.**Рис. 3.** Микроструктура стальной преграды Ст40 после нагружения потоком частиц корунда (1 — изображение — образец опыта 78, 2 — 15, 3 — 16). Режим съемки — SE.

чения (технологические примеси), которые концентрируются вдоль полос скольжения и деформаций, образуя строчечные включения. Наличие и распределение неметаллических включений характеризует технический сплав Ст40 (ГОСТ 1778, ASTM E 1245) и должно учи-

тываться при дальнейшем анализе после динамического воздействия.

В табл. 2 приведены элементные составы матрицы и включений для исходного состояния стальной преграды. Обозначения точек зондирования соответствуют их

изображениям на рис. 1. Элементный состав включений соответствует смеси шлаковых примесей в виде сульфидов, оксидов, фосфидов, нитридов, карбидов. Для включений характерно присутствие серы, которая является индикатором технологических примесей в стали Ст40. Эпизодически регистрируются магний, цинк, титан.

Отличие суммы содержания элементов от 100% зависит от нерегистрируемого содержания легких элементов, в основном кислорода, ослабления отраженного сигнала от неоднородности рельефа (ямка–выступ) и характера поверхности (рыхлость). На примере точки 3 видно, что имеет место занос полировочного материала корунда на поверхность шлифа и задержка его в примесных включениях. Это обстоятельство также должно быть учтено при дальнейшем анализе.

Динамическое воздействие осуществлялось в двух режимах: нагружение сплошным и порошкообразным материалами. Регистрация состояния преграды осуществлялась на глубине  $\sim 10$  мм. На рис. 2, 3 приведены изображения шлифов стальной преграды после нагружения фторопластом (опыт 14) и порошком корунда при различных скоростях потока (опыты 78, 15, 16 в табл. 1). Направление динамического воздействия сверху вниз. Обращает на себя внимание увеличение количества включений, проявление их структуры и появление выплесков из них в направлении динамического воздействия.

## Обсуждение результатов

При исследовании стальных образцов основное внимание уделялось сопоставлению изображения и состава неоднородностей, отличающихся от зерен матрицы. Как и следовало ожидать, состав микрообластей в зернах матрицы, независимо от вида зерна феррит (точка 1) или перлит (точка 1') на рис. 1, хорошо воспроизводится, что позволило усреднить составы матрицы различных образцов.

Состав неоднородностей (табл. 2), идентифицируемых как неметаллические включения [8], разнообразен по следующим причинам:

- различный состав технологических примесей: оксиды, сульфиды, силициды и т. д.;
- „рыхлое“ состояние хрупких тугоплавких соединений;
- различная стойкость к шлифованию и травлению.

Можно выделить три группы неоднородностей: крупные, строчечные с определяющим размером более  $10 \mu\text{m}$  [8] и мелкие — менее  $2 \mu\text{m}$ . Последние имеют качественно воспроизводимое повышенное содержание марганца и серы (точки 2, 5 в табл. 2). По сравнению с матрицей все включения имеют более темное изображение (поглощение зондирующего электронного потока) без тонкой структуры, расширенный состав элементов. В целом содержание примесных элементов выше их содержания в матрице; особенно это заметно

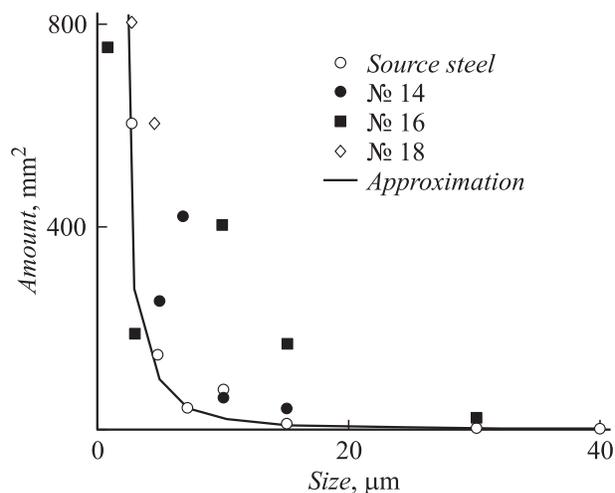


Рис. 4. Распределение неоднородностей по размерам для стали Ст40 до и после динамического воздействия.

в отношении серы и кальция. Поэтому увеличение количества примесного элемента в результате обработки порошком, содержащим этот же элемент, как это отмечалось, например для хрома в стали Ст35 [9], не может служить прямым доказательством проникновения данного элемента в матрицу.

Показательно, что шлифующий материал фиксируется во включениях и не задерживается на поверхности зерен матрицы.

Распределение количества включений по размерам хорошо аппроксимируется соотношением, вытекающим из постоянства поверхности включений определенного размера на единицу площади шлифа (рис. 4).

Последовательное изучение микроструктуры стальной преграды до и после динамического воздействия в упругопластической области позволило выявить особенности, связанные с объемным воздействием ударной волны на включения технологических примесей. При исследовании шлифов преград (рис. 2, 3) после динамического воздействия потока особое внимание обращалось на неоднородности микроструктуры, которые тестировались по сравнению изображений в режимах SE и BSE. Режим SE с угловым расположением приемника потока отраженных электронов хорошо показывает, что после динамической обработки появляются неоднородности, выступающие над поверхностью шлифа, т. е. представляющие области с повышенной стойкостью к абразивному воздействию и травлению.

В табл. 3 приведены элементные составы неоднородностей шлифов стальной преграды после динамического воздействия в точках, отображенных на рис. 2, 3. Как и следовало ожидать, состав матрицы до и после динамической обработки одинаков в пределах погрешности прибора. В то же время наряду с неоднородностями, характерными для исходной стали (табл. 2), появилась группа неоднородностей, элементный состав которых имеет

Таблица 3. Элементный состав точек зондирования стали после динамического воздействия в mass.%

№ опыта	№ точки	Fe	Mn	Cr	Si	Cu	Al	S	Ca	Сумма
14	1	84.86	0.61	0.18	0.45	0.19	1.54	0.27	0.57	89.31
	2	85.51	4.25	0.29	0.45	0.36	<u>0.03</u>	1.94	<u>0.00</u>	93.21
	3	<b>32.78</b>	<b>26.70</b>	<b>0.18</b>	<b>0.18</b>	<b>2.77</b>	<b>14.02</b>	<b>18.18</b>	<b>0.08</b>	<b>95.11</b>
	4	<b>70.99</b>	<b>3.57</b>	<b>0.28</b>	<b>0.30</b>	<b>0.52</b>	<b>13.75</b>	<b>2.30</b>	<b>0.11</b>	<b>96.54</b>
15	2	70.32	0.68	0.27	0.38	0.54	<u>0.06</u>	0.23	0.72	74.19
16	2	51.17	0.44	<u>0.08</u>	0.18	0.24	<u>0.07</u>	<u>0.05</u>	<u>0.15</u>	52.77
	3	54.63	0.32	<u>0.09</u>	0.33	0.28	<u>0.11</u>	<u>0.03</u>	<u>0.05</u>	56.26
78	2	69.82	0.46	<u>0.08</u>	0.43	0.22	0.39	<u>0.09</u>	0.30	72.43
Матрица ср.		97.85	0.69	0.27	0.41	0.33	<u>0.05</u>	<u>0.02</u>	<u>0.03</u>	99.85

Примечание 1. Состав точек зондирования 14–5, 15–1, 15–3, 16–1, 16–4, 78–1 учтен при определении усредненного состава матрицы (см. рис. 2, 3). 2. Усредненный состав матрицы получен по 11 измерениям. 3–5 — то же, что в табл. 2.

пониженную сумму (выделены курсивом в табл. 3). По соотношению элементов — это микрообласти матрицы, выступающие над плоскостью шлифа (точки 2, 3 на рис. 3), рассеивание отраженного сигнала на которых дает пониженную сумму элементного состава. Появление их, по-видимому, связано с локализацией деформации на границе стыков зерен матрицы при воздействии ударной волны с интенсивностью, недостаточной для пластического деформирования зерна в целом. В процессе приготовления шлифа они разрушаются, как хрупкие образования. Также фиксируются крупные неметаллические включения со следами хрупкого разрушения после динамического нагружения (рис. 3).

Замечено, что при увеличении давления нагружения выше упругого предела в преграде количество и размер неоднородностей возрастает (рис. 4), что, по-видимому, связано с ростом числа микрообластей с локальной деформацией, кумулятивным сжатием и динамическим расширением ударно-сжатой, более легкой, относительно окружающей матрицы, фазы включений.

Характер, начальное распределение и увеличение размера неоднородностей при динамическом воздействии играют определенную роль в зарождении и развитии процесса разрушения металла.

Характерные каналы (треки) [2] в стальной преграде, обработанной потоком корундового порошка, содержащие остатки корундовых частиц, не найдены. Изображения полос деформации, выявляемых по расположению зерен и строчечных включений [8], микротрещин не могут быть приняты за „треки проникающих микрочастиц“, так как характеризуют стальную преграду до и после воздействия и не зависят от материала воздействующего потока. Фиксируемое в ряде включений различное содержание алюминия, его фиксация на неметаллических включениях для всех исследованных образцов преград, независимо от материала высокоскоростного потока, указывает на занос полировочного материала корунда, который не удалось удалить при ультразвуковой обработке шлифов.

Отсутствие принципиальных различий в микроструктуре стали, после воздействия порошка и монолитного фторопласта, подтверждает определяющую роль ударно-волнового нагружения в изменении характеристик преграды.

## Заключение

В данной постановке эксперимента и примененном уровне исследований микроструктуры до  $1\ \mu\text{m}$ , состава преграды до 0.01 mass.% сверхглубокого проникания микрочастиц в преграду не обнаружено. Аналогичный результат был получен в [10,11].

Наблюдаемые неоднородности микроструктуры стальной преграды после динамического нагружения высокоскоростным потоком являются неметаллическими включениями исходного материала и областями локальной деформации.

Отмечен рост числа и размера неоднородностей при воздействии ударной волной с амплитудой выше динамического предела текучести.

Работа выполнена в рамках совместного Белорусско-Российского проекта при поддержке гранта РФФИ № 04-01-81016.

## Список литературы

- [1] Bernhard R.P., Christiansen E.L., Hyde J. // Int. J. Impact Engng. 1995. Vol. 17. P. 57.
- [2] Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. Минск, 1998. С. 208.
- [3] Алтышулер Л.В., Андилевко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 5. С. 42.
- [4] Kiselev S.P., Kiselev V.P. // Int. J. Impact Engng. 2002. Vol. 27. P. 135.
- [5] Герасимов А.Э. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 1. С. 26.
- [6] Буравова С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 17. С. 63.

- [7] Ушеренко С.М., Романов Г.С., Дыбов О.А., Белоус А.И., Шведов С.В. // ИФЖ. 2002. Т. 75. № 6. С. 7.
- [8] Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. ГОСТ 1778-70. М., 1971. С. 24.
- [9] Зельдович В.И., Хомская И.В., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Ушеренко С.М., Дыбов О.А. // ФММ. 2002. Т. 93. № 5. С. 86.
- [10] Gladtsinov A.V., Ilushkina N.Yu., Kolomytsev V.E. // Int. J. Impact Engng. 2001. Vol. 26. P. 231.
- [11] Сивков А.А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 16. С. 59.