

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 621.762.04

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-620-626>

Поступило в редакцию 20.02.2019

Received 20.02.2019

**Член-корреспондент А. Ф. Ильюшенко, В. И. Овчинников***Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа Национальной академии наук  
Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

## **ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОТОКА МИКРОЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДОЙ**

**Аннотация.** Настоящая работа является продолжением работы, где были изложены результаты теоретического исследования процесса формирования электромагнитного поля при подрыве кумулятивного заряда и выдвинута гипотеза об образовании импульса электромагнитного излучения при соударении высокоскоростного потока частиц с металлической преградой. В настоящей работе кумулятивный заряд применяли для разгона порошковых микрочастиц до скоростей 2500 м/с и изучения процессов соударения высокоскоростных потоков частиц с преградой. Цель работы – изучение особенностей электромагнитного излучения при соударении высокоскоростного потока частиц с твердым телом. Исследование образующегося импульса электромагнитного излучения проводили по разработанной методике измерением индукции магнитного поля с применением датчиков Холла. Среднее значение индукции магнитного поля составляет 45,9 мТл. Регистрацию ионизирующей составляющей и оценку энергии излучения определяли по интенсивности засветки фотодетекторов (рентгеновской пленки). Оценка энергии частицы по длине пробега в фотоэмульсии дает величину 80–100 МэВ. Показано, что процесс высокоскоростного соударения и взаимодействия потока микрочастиц с металлической преградой сопровождается рядом эффектов, которые до настоящего времени остаются не изученными. В результате проведенных исследований получены практические результаты, которые подтверждают выдвинутую ранее гипотезу и позволяют дополнить представления о характере происхождения электромагнитного излучения при соударении высокоскоростного потока частиц с металлической преградой в условиях их проникания.

**Ключевые слова:** взрывчатые вещества, кумуляция, неидеальная плазма, ионизированный поток, электромагнитное излучение

**Для цитирования:** Ильюшенко, А. Ф. Особенности электромагнитного излучения при взаимодействии высокоскоростного потока микрочастиц карбида кремния с металлической преградой / А. Ф. Ильюшенко, В. И. Овчинников // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 620–626. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-620-626>

**Corresponding Member Alexander F. Ilyushchenko, Vladimir I. Ovchinnikov***Institute of Powder Metallurgy named after Academician O. V. Roman of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus*

## **FEATURES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE INTERACTION OF A HIGH-SPEED FLOW OF SILICON CARBIDE MICROPARTICLES WITH A METAL BARRIER**

**Abstract.** This work is a continuation of the work, where the results of the theoretical study of the formation of the electromagnetic field in the explosion of the cumulative charge were presented and the hypothesis of the formation of an electromagnetic pulse in the collision of a high-speed flow of particles with a metal barrier was put forward. In the present work, the cumulative charge was used to disperse powder microparticles to speeds of 2500 m/s and to study the processes of collision of high-speed particle flows with an obstacle. The purpose of the work is to study the features of electromagnetic radiation in the collision of a high-speed flow of particles with a solid. The study of the resulting pulse of electromagnetic radiation was carried out according to the developed method by measuring the magnetic field induction using Hall sensors. The average value of the magnetic field induction is 45.9 MT. Registration of the ionizing component and evaluation of the radiation energy were determined by the intensity of photodetector illumination (x-ray film). Evaluation of the particle energy along the path length in the emulsion gives a value of 80–100 MeV. It is shown that the process of high-speed collision and interaction of the micro-particle flow with a metal barrier is accompanied by a number of effects that have not yet been studied. As a result of the research, practical results are obtained that confirm the previously proposed hypothesis and allow to supplement the understanding of the nature of the origin of electromagnetic radiation in the collision of a high-speed flow of particles with a metal barrier in the conditions of their penetration.

**Keywords:** explosives, non-ideal plasma, ionized flux, accumulation, magnetic fields

**For citation:** Ilyushchenko A. F., Ovchinnikov V. I. Features of electromagnetic radiation in the interaction of a high-speed flow of silicon carbide microparticles with a metal barrier. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 620–626 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-620-626>

**Введение.** Исследование процессов, связанных с обработкой металлических образцов динамическим нагружением плотными потоками порошковых частиц, производившееся при разработке технологии защитных и упрочняющих покрытий, привело в конце 1970-х годов к обнаружению принципиально нового явления: проникание частиц на достаточно большие глубины в обрабатываемый материал [1; 2]. Экспериментальные исследования процесса проникания позволили достаточно быстро создать схему, обеспечивающую абсолютную повторяемость явления [3], что послужило базой для его планомерного экспериментального и теоретического изучения. В опубликованных к настоящему времени теоретических работах, посвященных анализу этой аномалии, выдвинут ряд гипотез, пытающихся объяснить сущность данного явления. Каждая из этих работ посвящена какому-либо из факторов, который мог бы быть ответственным за сообщение частице дополнительной энергии в процессе проникания. Но законченной теории, которая решила бы данную проблему полностью, до настоящего времени не создано. Применение кумулятивных ускорителей для разгона частиц до высоких скоростей  $>1000$  м/с используется нами для моделирования и изучения процессов взаимодействия потоков частиц космической пыли с космическими аппаратами в лабораторных условиях. Абсолютное большинство имеющихся публикаций по данной тематике связаны с космической пылью и высокоэнергетическими частицами, но только в части исследования их характеристик (массы, размеров, состава материала частиц, скорости, энергетических характеристик) [4]. Исследуются частицы (в том числе и содержащие органические включения) – остатки комет, частицы космической пыли в окрестностях Марса, Меркурия, Венеры, планетах-спутниках (Галилео), на различных околоземных орбитах, около Солнца, в отработанном газе двигателей ракет и спутников, в атмосфере Земли и т. п. Только отдельные немногие статьи посвящены исследованиям воздействия космической пыли на корпуса космических аппаратов, космических телескопов, элементов микроэлектроники и т. д.

При проведении экспериментов соударения потоков вещества и проникания отдельных частиц в металлические преграды, нами обнаружены эффекты электромагнитного и ионизирующего излучения, которые вначале были зафиксированы в виде засветок на рентгеновской пленке, а затем и с помощью разработанного прибора в виде спектров изменения индукции магнитного поля. Результаты исследований имеют важное значение и могут представлять интерес для ученых, занимающихся исследованием процессов высокоскоростного удара и высокоэнергетического взаимодействия частиц с твердым телом.

Цель исследований – изучение эффекта электромагнитного излучения в условиях ударно-волнового нагружения металлических мишеней высокоэнергетическим потоком порошковых частиц.

**Материалы и методы исследований.** В качестве модельных материалов металлических преград были выбраны сталь 10 и сталь 40. Образцы имели длину 100 мм и поперечное сечение диаметром 10 мм (сталь 10), 50 мм (сталь 40). Динамическую обработку осуществляли по схеме [5] при следующих стандартных параметрах: фоновое давление составляло порядка 10 ГПа, скорость частиц – 700–2000 м/с, время воздействия ~50 мкс. В качестве материала микрочастиц использовали порошок SiC фракции 63–70 мкм. В качестве взрывчатого вещества использовали аммонит 6ЖВ, количество взрывчатого вещества 200 г на один эксперимент, высота фокусирующей опоры 90 мм. После нагружения образцы разрезали для изучения микроструктуры и измерений твердости. Для оценки свойств обработанных материалов использованы стандартные методики и приборы. Удельное электросопротивление измеряли четырехконтактным методом на приборе HP 4140B (Hewlett-Packard), HP 4156B (Agilent).

Микроструктура исследована на оптическом микроскопе Leika INM100 и сканирующем электронном микроскопе S-4800 (Hitachi).

Микрорентгеноструктурный и структурно-фазовый анализ проведены на сканирующем микроскопе Stereoscan-360 с энергодисперсионной приставкой микрорентгеноспектрального анализа AN 10000 (Link Analytical) и рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3» в  $\text{Cu-K}_\alpha$  излучении соответственно.

*Электромагнитные характеристики процесса взаимодействия высокоскоростного потока частиц с металлической преградой.* При подрыве заряда в результате схлопывания кумулятивной воронки и последующего процесса растяжения кумулятивной струи происходит вытягивание силовых линий магнитного поля внутри кумулятивной струи вдоль ее оси, и соответственно происходит нарастание амплитуды магнитного поля. В результате соударения кумулятивной струи, в состав которой входит поток ионизированных частиц порошка и плазмы, и проникания частиц порошка ( $\sim 1\%$ ), материал мишени намагничивается и на поверхности раздела и вокруг мишени индуцируется магнитное поле (рис. 1), величина которого будет зависеть от структуры, магнитных свойств материала и ионизации потока.

Регистрацию магнитного излучения, как одной из составляющих электромагнитного излучения, осуществляли с помощью разработанной аппаратуры (РЭМИ-01) и датчиков Холла.

Полупроводниковые датчики Холла обладают высокой чувствительностью к изменению магнитного поля. Чувствительность преобразователя Холла (ПХ)  $\Upsilon$  к магнитному полю  $B$  в режиме изменения э. д. с. Холла описывается соотношением

$$\Upsilon = U_x / B = R_x I d^{-1} = I(\text{end})^{-1} = (Pb\mu / lden)^{1/2},$$

где  $U_x$  – напряжение Холла на выходе датчика;  $B$  – величина индукции магнитного поля (одна из составляющих  $B_x, B_y, B_z$ , направленная по нормали к соответствующему датчику);  $P$  – мощность, рассеиваемая на ПХ;  $R_x = -1 / en$  – коэффициент Холла;  $n$  и  $\mu$  – концентрация и подвижность

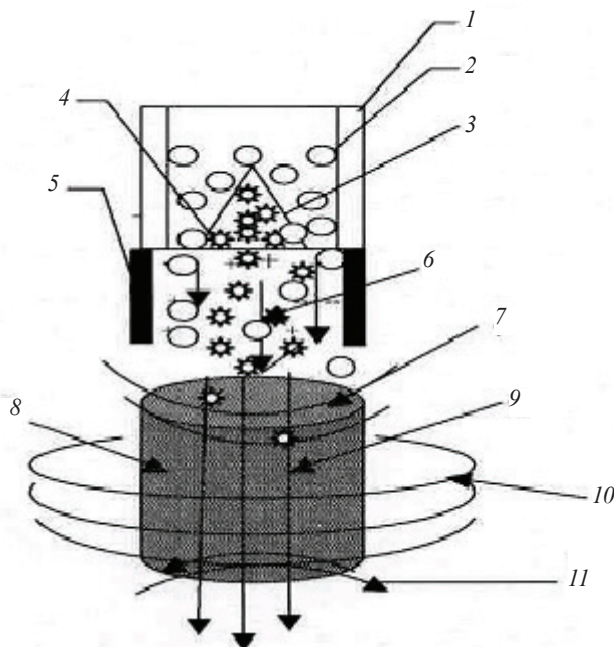


Рис. 1. Схема формирования электромагнитного поля при обработке металлического цилиндра потоком частиц порошка и неидеальной плазмы: 1 – корпус заряда, 2 – взрывчатое вещество, 3 – кумулятивная воронка, 4 – частицы порошка, 5 – регулирующая опора, 6 – поток ионизированных частиц порошка и плазмы, 7 – ударная волна, 8 – металлический цилиндр, 9 – электрическое поле, 10 – силовые линии магнитного поля, 11 – отраженная волна

Fig. 1. Scheme of formation of the electromagnetic field in the processing of the metal cylinder by the flow of powder particles and non-ideal plasma: 1 – body-of-charge, 2 – explosives, 3 – cumulative funnel, 4 – particle powder, 5 – regulatory support, 6 – stream of ionized powder particles and plasma, 7 – shock wave, 8 – metal cylinder, 9 – electric field, 10 – magnetic field lines, 11 – reflected wave

электронов соответственно;  $b$ ,  $l$  и  $d$  – ширина, длина и толщина пленки;  $I$  – ток питания преобразователя;  $-e$  – заряд электрона<sup>1</sup>.

Составляющие вектора индукции магнитного поля  $B$  определяли из измерений э. д. с. датчиками Холла по каждому каналу соответственно:

$$B_x = U_x / \Upsilon_1,$$

$$B_y = U_y / \Upsilon_2,$$

$$B_z = U_z / \Upsilon_3,$$

где  $\Upsilon_1$ ,  $\Upsilon_2$ ,  $\Upsilon_3$  – магнитные чувствительности датчиков Холла, измеренные при постоянном магнитном поле (в статике наиболее точные измерения).

В результате измерений были зарегистрированы спектры электромагнитного излучения амплитудой 0,1–1,5 В при длительности импульса  $(5–12)10^{-6}$  с на расстоянии 0,15 м от эпицентра взрыва. В результате проведенных расчетов среднее значение магнитной индукции  $B_{\text{ср}} = 45,9$  мТл

*Эффекты электромагнитного излучения.* Работы [6–8] посвящены вопросам космического корпускулярного излучения, электризации космических аппаратов (КА), моделирования и имитации космической радиации, основам физических процессов ионизации и излучений высоких энергий, в том числе при высокоскоростном соударении частиц космической пыли с КА.

Нами разработана методика регистрации предполагаемого ионизирующего излучения в условиях высокоскоростного соударения потока микрочастиц (ПМЧ) с преградой [5]. Для регистрации излучения использовали рентгеновскую медицинскую пленку с чувствительностью  $850 \text{ Р}^{-1}$  по критерию 0,85 над вуалью. Фотодетекторы, состоящие из трех пленок, тщательно заворачивали в 3–5 слоев черной бумаги, которая предварительно подвергалась контролю на предмет нарушения целостности. Пленочные фотодетекторы размещались в специальных контейнерах в радиальной и нормальной плоскостях в предположении цилиндрической симметрии эксперимента. На контейнеры воздействовали высокоскоростным ПМЧ карбида кремния. После обработки и проявления фотодетекторов бумага подвергалась повторному контролю. Геометрическое совпадение почернений на трех пленках не позволяет отнести засветки к артефактам.

При исследовании после проявления обработанных фотодетекторов обнаружены микро- и макроэффекты. Макроэффектами считали те, которые можно рассмотреть невооруженным глазом, или под лупой при увеличении до 5 крат. К микроэффектам относили те эффекты, которые видны в оптическом микроскопе при увеличении от 100 до 1000 раз.

На фотодетекторах, располагавшихся в щели вдоль направления потока частиц, получены засветки в виде чередующихся полос шириной 2–6 мм (рис. 2 а, б). Анализ структуры засветок, измерение их размерностей производили с полученных негативов на оптическом микроскопе Leica при увеличениях от 50 до 1000. Определение интенсивности засветок и обработку полученных результатов производили по компьютерной программе «Профиль 1.0»

Для оценки интенсивности засветки производили калибровку рентгеновской пленки засветкой на аппарате ДРОН-3 при режиме  $U = 23$  кВ,  $J = 3,5$  мА.  $U$  – ускоряющее напряжение,  $J$  – ток. Время засветки  $t = 1$  с. С учетом времени процесса 100 мкс, энергия излучения на засветку одной зоны составляет  $(0,5–1,2)10^{-2}$  Дж. Установлено, что структура линий засветки (треки) обладает признаками, характерными для траектории движения элементарных заряженных частиц в магнитном поле. Длина треков составляла  $(10–15)10^{-3}$  м, ширина одного трека  $(2–4)10^{-6}$  м, плотность треков составляла  $\sim 300 \text{ мм}^{-2}$ .

Установлено, что форма треков в эмульсиях различна, особенно это характерно для фотопленок, расположенных вдоль боковой поверхности цилиндрического образца. Это и непрерывные прямые треки и длинные треки сложной формы, напоминающие спирали или в форме меандра.

<sup>1</sup> Устройство для измерения индукции переменного магнитного поля: пат. № 9111 Респ. Беларусь МПК7 С1 G01R33/07 / В. И. Овчинников, В. Т. Шмурадко, Е. А. Дорошкевич; заяв. ГНУ «Институт порошковой металлургии» № а20031210; заявл. 10.12.2003; зарег. в Государственном реестре изобретений 11.01.2007 г.

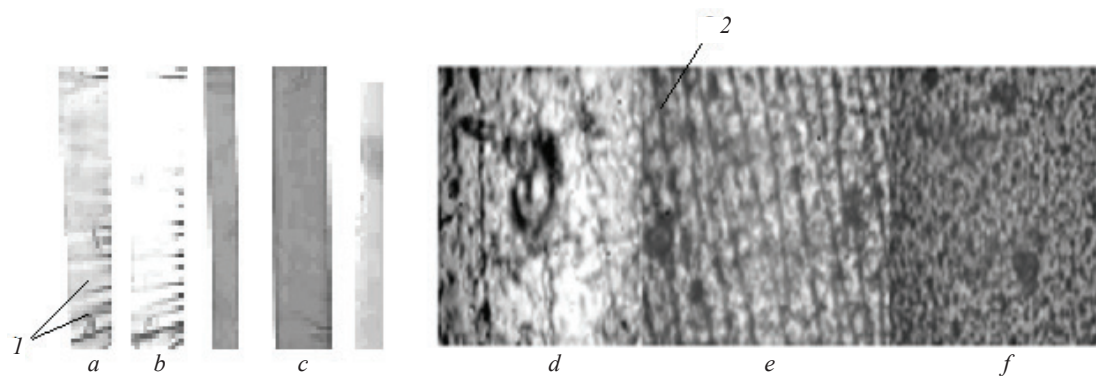


Рис. 2. Пленка, засвеченная при обработке частицами карбида кремния стального стержня в радиальном направлении: 1 – полосы засветки (*a* – трехкратная обработка, *b* – однократная, *c* – эталон); 2 – треки (*d* –  $\times 500$ ; *e* –  $\times 300$ ; *f* – структура пленки вне зоны засветки,  $\times 300$ )

Fig. 2. Film illuminated by silicon carbide particles in the radial direction of the steel rod: 1 – illumination bands (*a* – triple processing, *b* – single, *c* – standard); 2 – tracks (*d* –  $\times 500$ , *e* –  $\times 300$ , *f* – the structure of the film outside the illumination zone,  $\times 300$ )

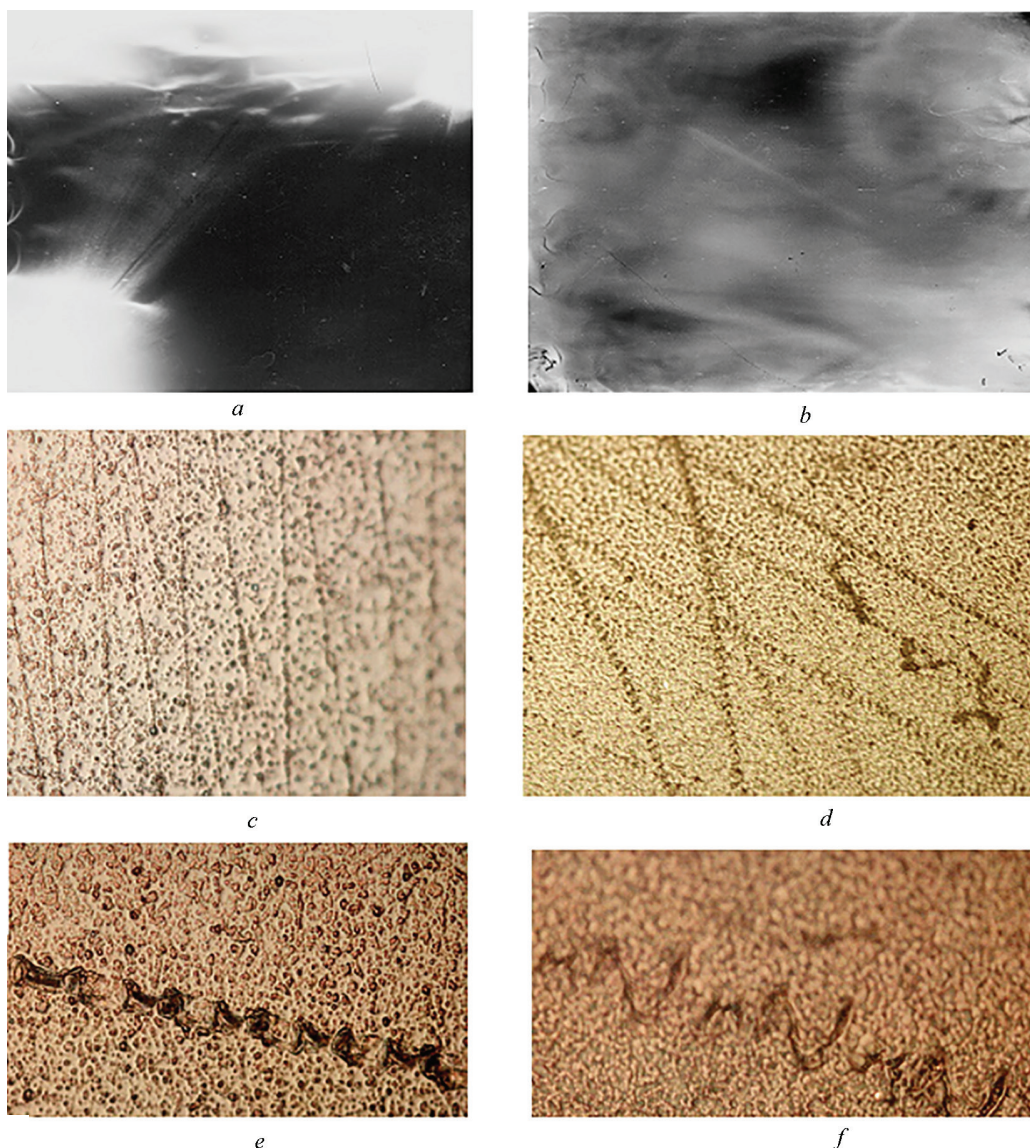


Рис. 3. Засветки фотодетекторов и виды треков при различных увеличениях: *a*, *b* –  $\times 1$ ; *c* –  $\times 200$ ; *d* –  $\times 400$ ; *e* –  $\times 500$ ; *f* –  $\times 600$

Fig. 3. Illumination of photo-detectors and the types of tracks at different magnifications: *a*, *b* –  $\times 1$ ; *c* –  $\times 200$ ; *d* –  $\times 400$ ; *e* –  $\times 500$ ; *f* –  $\times 600$

На рис. 3 представлены фотопленки, располагавшиеся вдоль боковой поверхности образцов цилиндрической формы: *a* – вокруг образца из алюминия, *b* – вокруг образца из стали. Более подробное изучение засветок под микроскопом с увеличением в 200–600 раз представлено на рис. 3, *c–f*. На рис. 3, *e, f* представлен типичный вид треков, напоминающий форму меандра. На рис. 3, *f* представлен увеличенный фрагмент трека, из которого хорошо видно, что трек имеет сложный узор. Учитывая место расположения фотодетектора за защитной преградой, размер трека и форму невозможно объяснить его происхождением, регистрацией  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения (напомним, что рентгеновская пленка завернута в несколько слоев черной бумаги).

Детектирование треков на пленках позволяет утверждать, что траектория движения источника, вызывающего почернение, находится в плоскости фотоэмульсии, так как вид трека по всей его длине не изменяется. Оценка энергии частицы по длине пробега в фотоэмульсии дает величину  $E \geq 80\text{--}100\text{ МэВ}$ .

Аналогичные дефекты и треки наблюдаются на поверхности полупроводниковых пластин кремния, которые располагаются в тех же местах взамен фотодетекторов (рис. 4).

Полированные монокристаллические пластины Si подвергали воздействию высокоскоростного потока микрочастиц SiC при скоростях разгона 1200–1500 м/с. После обработки часть пластин исследовалась в оптическом микроскопе при увеличениях от 500 до 1800 без предварительной подготовки (рис. 4, *a, b, d*), поверхность части пластин промывалась этиловым спиртом. На поверхности видны следы некачественной промывки (рис. 4, *c*). Таким образом, видно, что при динамическом нагружении металлических мишеней высокоскоростными потоками частиц порошка и неидеальной плазмы взрыва реализуется электромагнитное излучение с образованием элементарных частиц.

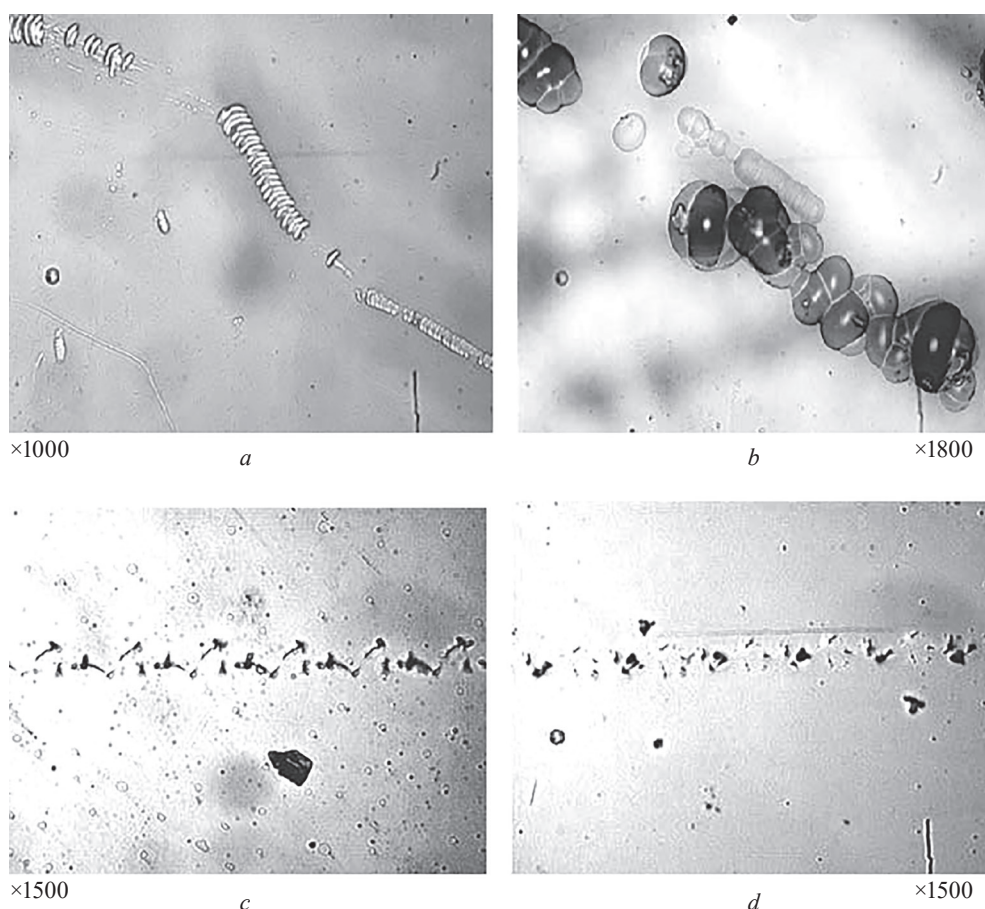


Рис. 4. Дефекты в пластине Si после воздействия высокоскоростным потоком микрочастиц SiC

Fig. 4. Defects in Si wafer after exposure to a high-speed flow of micro-particles of SiC

**Закключение.** В результате проведенных исследований получены практические результаты, которые позволяют дополнить представления о характере происхождения электромагнитного излучения при соударении потока частиц с металлической преградой в условиях их проникания.

Полученные результаты доказывают, что элементарные частицы, засветившие рентгеновскую пленку, можно получить не только на ускорителях частиц, но и в ограниченных локальных системах с высокой плотностью энергии, в которых возможно квантование полей и возмущение атомных взаимодействий при столкновении ускоренных до больших энергий материальных частиц.

### Список использованных источников

1. Горобцов, В. Г. О некоторых эффектах обработки высокоскоростной струей рабочего вещества / В. Г. Горобцов, С. М. Ушеренко, В. Я. Фуре // Порошковая металлургия. – 1979. – Вып. 3. – С. 8–12.
2. Черный, Г. Р. Механизм аномально низкого сопротивления при движении тел в твердых средах / Г. Р. Черный // ДАН СССР. – 1987. – Т. 292, № 6. – С. 1324–1328.
3. Введение порошка в металл / С. К. Андиленко [и др.] // Порошковая металлургия. – 1987. – № 3. – С. 100–102.
4. Электропроводность продуктов взрыва, измеренная вдоль распространения детонации / П. И. Зубков [и др.] // VI Забабакхинские научные чтения. – Снежинск, 2001. – С. 72.
5. Овчинников, В. И. Экспериментальное исследование электромагнитных полей в условиях взрывного динамического нагружения / В. И. Овчинников, О. В. Роман, А. И. Белоус // Материалы VIII Междунар. симпозиума «Использование энергии взрыва для получения материалов с новыми свойствами». – Москва, 2006. – С. 94–95.
6. Моделирование радиационного воздействия / А. И. Акишин [и др.] // Модель космического пространства / под ред. С. Н. Вернова. – Москва, 1966. – Т. 2. – С. 9–65.
7. О некоторых вопросах имитации и моделирования космической радиации в лабораторных условиях / А. И. Акишин [и др.] // Модель космического пространства / под ред. С. Н. Вернова, 1964. – С. 375–409.
8. Акишин, А. И. Электризация космических аппаратов / А. И. Акишин, Л. С. Новиков. – Москва, 1986. – С. 64–188.

### References

1. Gorobtsov V. G., Usherenko S. M., Fouras V. Ya. On some effects of processing high speed-growth stream of the working substance. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. Minsk, 1979, vol. 3, pp. 8–12 (in Russian).
2. Chernyi G. R. The mechanism of anomalously low resistance to motion of bodies in solid media. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Reports of Academy of Sciences of USSR], 1987, vol. 292, no. 6, pp. 1324–1328 (in Russian).
3. Andilevko S. K., Roman O. V., Gorobtsov V. G., Usherenko S. M. The introduction of the powder to the metal. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy], 1987, no. 3, pp. 100–102 (in Russian).
4. Zubkov P. I., Ivanov P. I., Kartashov A. M., Lukyanchikov L. A., Ten K. A. The electrical conductivity of explosion products measured along the propagation of detonation. *VI Zababakhinskije nauchnye chteniya* [VI Zababakhin scientific readings]. Snezhinsk, 2001, p. 72 (in Russian).
5. Ovchinnikov V. I., Roman O. V., Belous A. I. Experimental study of electromagnetic fields in conditions of explosive dynamic loading. *Materialy VIII Mezhdunarodnogo simpoziuma «Iskol'zovanie energii vzryva dlya polucheniya materialov s novymi svoystvami»* [Materials of the VIII International Symposium “The Use of Explosive Energy for the Production of Materials with New Properties”]. Moscow, 2006, pp. 94–95 (in Russian).
6. Akishin A. I. Radiation exposure modeling. Vernov S. N. (ed.) *Model of outer space*. Moscow, 1966, vol. 2, pp. 9–65 (in Russian).
7. Akishin A. I. et al. Some issues of simulation and modeling of space radiation laboratory conditions. Vernov S. N. (ed.) *Model of outer space*. Moscow, 1964, pp. 375–409 (in Russian).
8. Akishin A. I., Novikov L. S. *Electrification of space vehicles*. Moscow, 1986, pp. 64–188 (in Russian).

### Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, директор. Институт порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Alexil@mail.bel-pak.by.

Овчинников Владимир Ильич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: OvchinnikovVI@yandex.ru.

### Information about the authors

Ilyushchenko Alexander Fedorovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexil@mail.bel-pak.by.

Ovchinnikov Vladimir Ilyich – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: OvchinnikovVI@yandex.ru.