

О. П. МАКСИМКИН, А. В. ЯРОВЧУК, К. В. ЦАЙ, Т. А. ДОРОНИНА, А. В. РУСАКОВА

ФОРМИРОВАНИЕ КРАТЕРОВ, АНАЛОГИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИМ, НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, БОМБАРДИРУЕМЫХ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Приведены результаты исследования изменений морфологии поверхностей сталей 12X18H10T и 65Г в результате имитационных экспериментов по бомбардировке материалов заряженными высокоскоростными частицами на ускорителях. Установлено, что формирующиеся на облучаемой поверхности кратеры аналогичны тем, которые возникают при экспозиции металлических материалов в открытом космосе.

Наблюдения за состоянием поверхности космических аппаратов после эксплуатации на околоземной орбите позволили обнаружить множество микроповреждений в виде кратеров и каверн различной глубины и размеров, образовавшихся под влиянием бомбардировки высокоскоростными частицами [1–3]. К числу таких частиц помимо метеоритов космического происхождения относятся техногенные макро- и микрообъекты так называемого «космического мусора», поток которого формируется из фрагментов, остатков и осколков спутниковых систем, ракет-носителей и всевозможного выработавшего свой срок оборудова-

ния. Недооценка влияния всех этих факторов на космические аппараты длительного срока действия способна вызвать целый ряд нежелательных явлений. Существуют данные [4, 5], свидетельствующие о проникновении бомбардирующих микрочастиц в металлические объекты на значительную глубину, в тысячи раз превышающую их размеры. Возникающие при столкновении частиц с поверхностью ударные и акустические волны, распространяясь в материале, вызывают проявление запробежных эффектов, изменяя его структуру, свойства, а также функциональные качества искусственного космического объекта.

Наиболее чувствительными к действию запоружных эффектов являются материалы, функциональные свойства которых определяются стабильностью структуры и фазового состава. К таким материалам относятся сплавы с эффектом «памяти формы», которые широко применяются в искусственных спутниках и космических аппаратах в качестве уплотнительных соединений, антенн и других узлов.

В связи с тем что в настоящее время космическое аппаратостроение и материаловедение являются приоритетными направлениями космической программы Казахстана, исследования в этой области чрезвычайно своевременны. Тем не менее, несмотря на актуальность и значимость работ, посвященных изучению деградации структуры и свойств материалов с эффектом «памяти формы» под действием высокоскоростных частиц, число их в научной литературе крайне ограничено, что обусловлено высокой стоимостью проведения космических экспериментов. Это послужило поводом для разработки и постановки имитационных наземных испытаний материалов на различного рода ускорителях, в ходе которых на поверхности материалов формируются кратеры, аналогичные космическим.

В настоящей работе приведены результаты изучения особенностей образования кратеров при бомбардировке заряженными частицами (электронами и ионами аргона) нержавеющей стали 12X18H10T, которая проявляет эффект «памяти формы» при мартенситных превращениях, и стали 65Г.

Методика экспериментов

Объектами исследования служили плоские образцы из нержавеющей стали 12X18H10T и стали 65Г после термической обработки и деформации. Имитационные эксперименты по воздействию космических частиц на материалы осуществляли с помощью ускорителя импульсных электронов «Нептун», а также на материаловедческом стенде ЦМР-1, позволяющем воздействовать на поверхность материала ионами аргона. Перед облучением все термообработанные образцы тщательно шлифовали и полировали с помощью шлифовальной бумаги и полировальных паст различной крупности абразива и в различных электролитах, что позволило получить высокую

чистоту обработки поверхности. Разработанная нами установка для бомбардировки материалов частицами ионов ЦМР-1 (рис. 1) выполнена на базе прибора для ионного травления RES-100 (Balzers, Швейцария) и содержит две независимые ионные пушки, которые позволяют формировать поток заряженных частиц в интервале $E = 2-7$ кэВ плотностью потока ионов $j = 55-160$ мкА/см². Облучение проводилось в вакууме при давлении $\sim 10^{-5}$ торр.

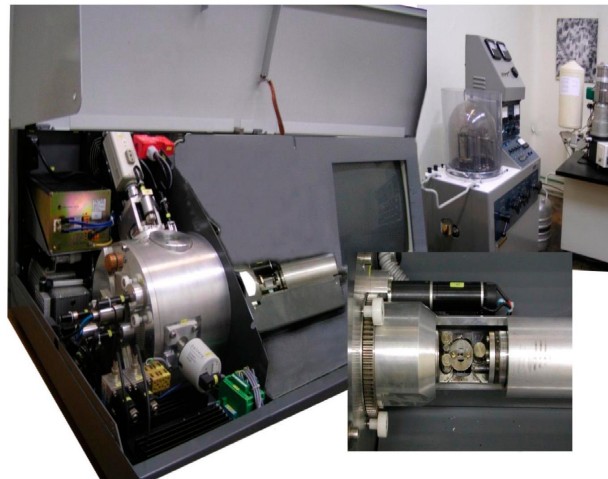


Рис. 1. Внешний вид установки для ускорения ионов ЦМР-1

Поскольку в аустенитных сталях эффект «памяти формы» реализуется в результате бездиффузионного мартенситного превращения, протекающего по типу $\gamma \rightarrow \alpha'$, образцы предварительно подвергали отжигу при 1050 °С в течение 1 ч с охлаждением на воздухе, в результате чего материал приобретал полностью аустенитную ГЦК - структуру с величиной зерна ~ 50 мкм. Появление и накопление мартенситной α' -фазы в образцах в результате облучения фиксировали с помощью феррозонда FERITSCOPE MP30.

В ходе проведения имитационных экспериментов по облучению на импульсном ускорителе «Нептун» удельную мощность потока электронов изменяли от $5 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^{10}$ Вт/см² при времени воздействия импульса ~ 4 с. Исследования структурных изменений осуществляли с использованием оптического микроскопа Nephot и электронных микроскопов: просвечивающего УЕМ 100 CX и растрового Amrey 1200. Для выявления структуры материала использовали химическое и электрохимическое травление в стандартных растворах.

Экспериментальные результаты

Исследования показали, что облучение потоком электронов с удельной мощностью $\sim (2,5-2,7) \cdot 10^{10}$ Вт/см² вызывает сквозное расплавление стальных образцов в области падения частиц, тогда как при параметрах мощности меньше, чем $5 \cdot 10^8$ Вт/см², на поверхности мате-

риалов образуются кратеры. Схема бомбардировки стальных образцов частицами и образования кратеров приведена на рис. 2. При облучении металлической поверхности высокоэнергетическими электронами и ионами аргона на поверхности образца наблюдали зоны повреждения, имеющие вид кратеров или характерных пятен, в которых металл перешел в расплавленное состояние.

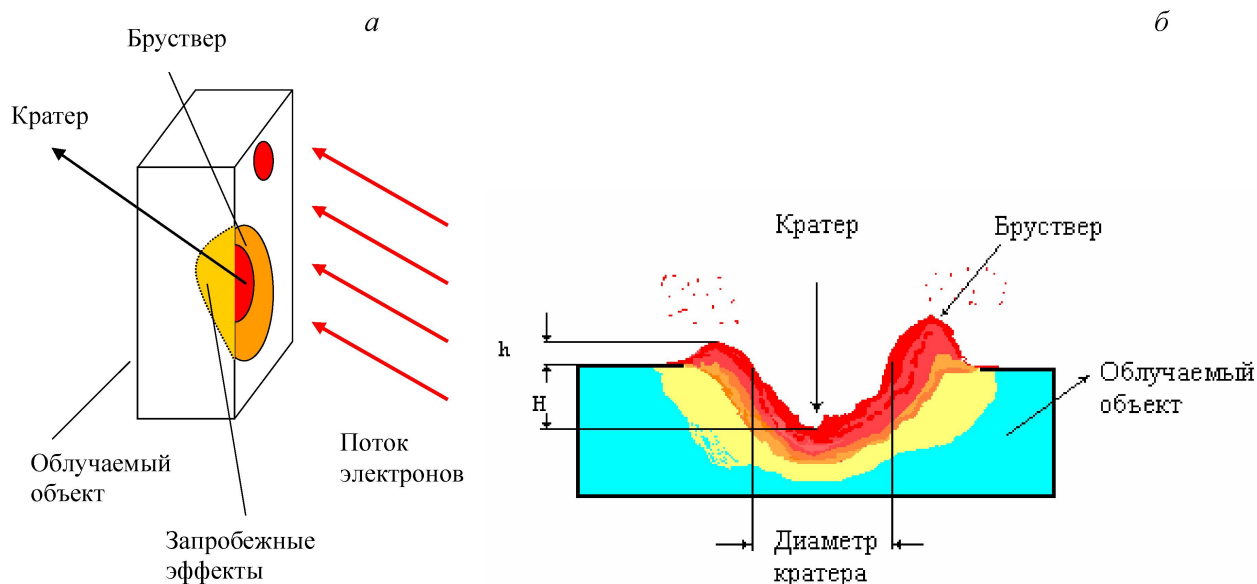


Рис. 2. Схемы *a* – облучения поверхности стальных образцов высокоэнергетическими электронами и ионами аргона; *б* – образования кратера: *H* – глубина кратера, *h* – высота бруствера

На рис. 3 приведены снимки внешнего вида кратеров, сформировавшихся на поверхности стали 12Х18Н10Т под действием бомбардиров-

ки электронами. Как видно из представленных снимков, оба кратера имеют форму, близкую к сферической. По краю кратера располагается

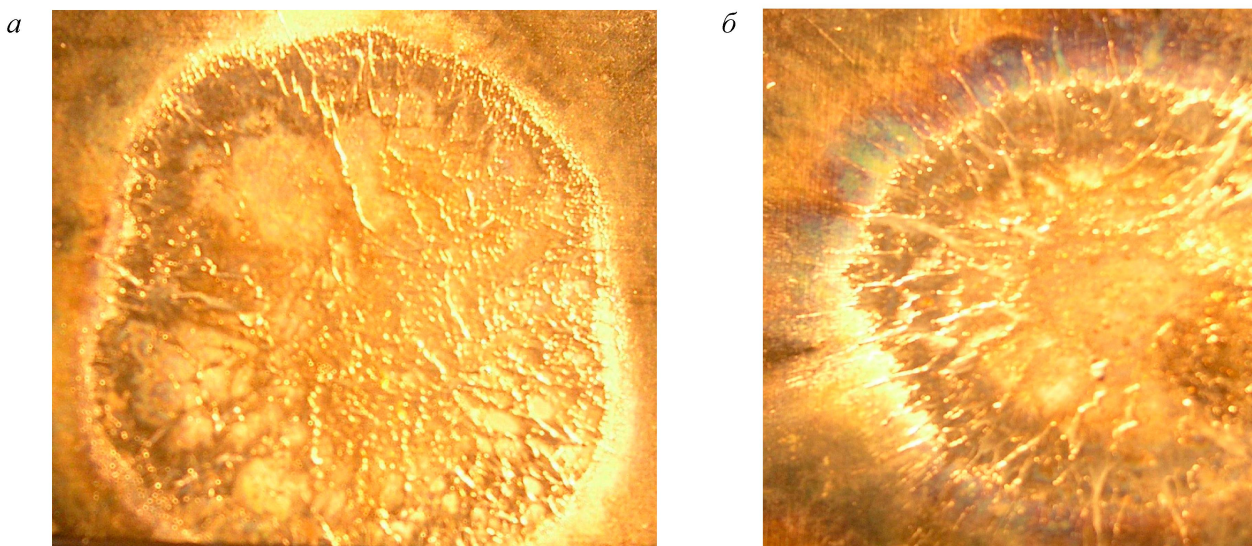


Рис. 3. Кратеры на поверхности стали 12Х18Н10Т после воздействия потока электронов мощностью (кэВ): *a* – 300; *б* – 500

бруствер, образованный наплывом материала. Подобная форма кратера наблюдается при воздействии потоков частиц, падающих на поверхность металла практически под прямым углом. Центр кратера после бомбардировки потоком электронов мощностью 330 кэВ покрыт каплями расплава металла довольно крупных размеров, тогда как при большей мощности потока частиц капли имеют значительно меньшие размеры. Топологические особенности кратеров свидетельствуют о том, что металл в области падения потока частиц интенсивно расплавляется и частично выбрасывается в виде расплавленных капель, оседающих как внутри, так и снаружи кратера. При обоих режимах облучения от центра к краю кратера располагаются удлиненные наплывы металла в форме отдельных длинных капель, лежащих в радиальном направлении. Облучение металла пучком электронов 500 кэВ вызывает появление так называемых «лучей» из расплав-

ленного металла, которые расположены за границей кратера и представляют собой крупные брызги расплава металла, выплеснутого из области падения потока.

Установлена зависимость геометрии кратеров от энергии и угла падения потока электронов. Как показали исследования, искажения сферической формы и появление кратеров эллипсоидного вида связаны с изменением направления потока частиц и сменой угла падения электронов от прямого к косому. Оценка размеров кратеров позволила установить, что глубина и диаметр кратеров возрастают с увеличением энергии электронов. В таблице приведены данные по изменению размеров кратеров от энергии падающего потока электронов. Оказалось, что при повышении энергии электронов на 50 % внутренний диаметр кратера (центральная часть кратера до бруствера) увеличивается на $8 \div 16$ %, глубина – на $1,9 \div 2,5$ %.

Влияние энергии электронов на размеры кратеров, формирующихся на поверхности стали 65Г
(обозначения см. на рис. 1)

Энергия электронов, КэВ	Диаметр кратера (внутренний), мм	Диаметр кратера с бруствером, мм	Глубина кратера, мм	Высота бруствера h, мм
330	9,8	10,9	1,148	1,158
500 (2 импульса)	10,9	11,7	1,223	1,262
330	11,3	11,5	1,172	1,184
500 (2 импульса)	12,5	12,9	1,179	1,205

Образование микрократерных полей, подобных космическим, удалось имитировать на установке ЦМР-1 при бомбардировке стальных образцов ионами аргона, ускоренными до энергии $5 \div 7$ кэВ. Характерный снимок поля микрократеров, полученного при бомбардировке ионами аргона, приведен на рис. 4.

Изменения свойств материала в пространственных масштабах обнаруживаются, как правило, в объеме, превосходящем видимые размеры кратеров. Подобные явления наблюдались при воздействии на металлический объект лазерных мощных импульсов [7]. При этом авторами [7] были установлены миграция легирующих элементов, скопление примесей и образование большого числа дислокационных дефектов на расстоянии, заметно удаленном от поверхности кратера. В ряде случаев обнаруживался эффект

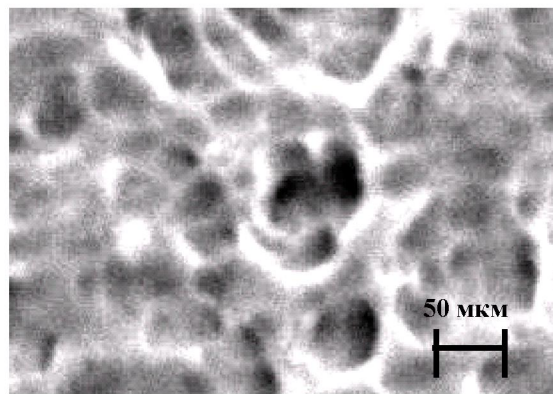


Рис. 4. Поле кратеров, образованное на поверхности стали 12X18H10T ионами аргона с энергией $E = 6$ кэВ

отслоений и скола части материала на стороне объекта, противоположной облучаемой.

Нами проведены исследования морфологических особенностей кратера на стальном образце

по его глубине после облучения концентрированным потоком электронов. Для этого проводилось послойное снятие материала (рис. 5). Оказалось, что топография поверхности после снятия слоев сохраняется и аналогична строению поверхностного слоя. Наряду с изменениями морфологии поверхности образца бомбардирующие частицы при соударении с металлическим объектом, по-видимому, вызывают появление и распространение вглубь материала ударных и акустических волн, диссипация которых способна трансформировать фазово-структурное состояние аустенитной стали, инициировать протекание $\gamma \rightarrow \alpha'$ мартенситного превращения.

Измерения, проведенные с помощью феррозонда FERITSCOPE MP30, позволили устано-

вить, что в зонах максимального изменения топографии, непосредственно под кратером, отмечается присутствие магнитной фазы, что свидетельствует о развитии мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения.

Исследования, проведенные с помощью ПЭМ-метода, подтвердили этот факт. Более того, установлено, что на различной глубине образца структура различна и определяется расстоянием, на которое распространяются вглубь запрежженные эффекты. В зависимости от степени дефектности структуры, которую приобретает материал при облучении под действием запрежженных эффектов, наблюдаются та или иная стадия развития мартенситного превращения и соответствующая структура материала. На рис. 5, а, б приве-

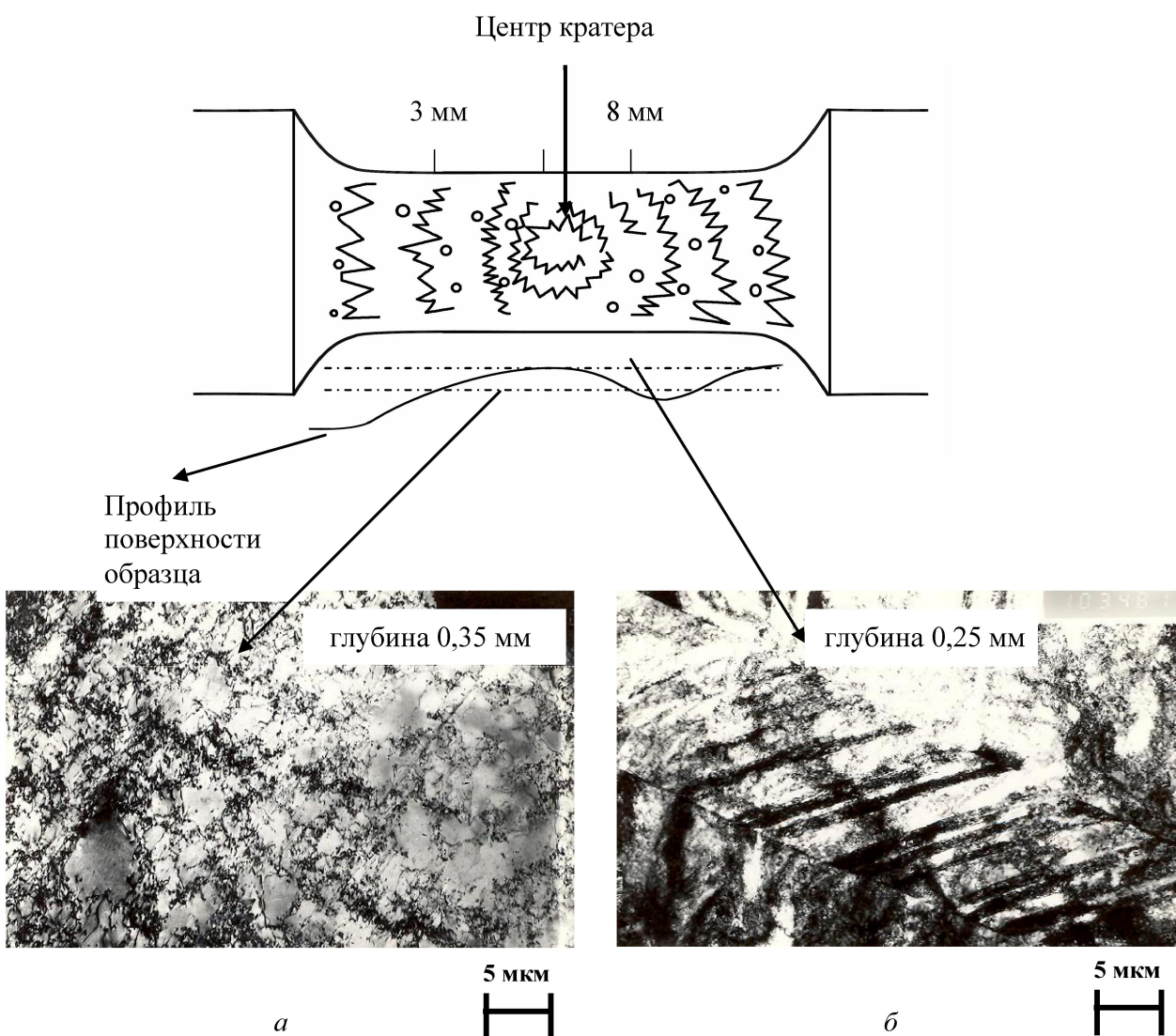


Рис. 5. Профиль поверхности образца стали 12X18H10T после облучения электронами и структура материала в зоне кратера на глубине (мм): а – 0,35; б – 0,25

дены фотографии ПЭМ-изображения структуры стали, сформированной в результате облучения электронами на различной глубине образца в зоне кратера.

Видно, что под влиянием запорбежных ударно-волновых эффектов в областях, где действие волн максимально, в зонах под кратерами, отмечается наличие развитой структуры мартенсита (рис. 5, а), тогда как в областях, где запорбежные эффекты оказали меньшее влияние, обнаружены участки с хорошо выраженной ячеистой дислокационной структурой (рис. 5, б).

Таким образом, предварительные эксперименты показали возможность изучения условий формирования кратеров на поверхности металлических материалов и имитации космической повреждаемости их поверхностей в наземных условиях.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

впервые показано, что при имитационных экспериментах при воздействии высокоскоростных частиц электронов и ионов на поверхности стальных образцов появляются микрократеры, форма и размеры которых аналогичных поверхностным дефектам, возникающим при воздействии микрочастиц космического мусора;

установлена взаимосвязь энергии падающих частиц и размеров формирующихся кратеров;

впервые установлено, что в результате действия запорбежных эффектов, возникающих при бомбардировке микрочастицами поверхности стали 12X18N10T, происходит трансформация фазово-структурного состояния материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труханов Е.М., Василенко А.П., Пчеляков О.П., Сильвестров В.В. и др. Исследование ударных микроструктур

на элементах российской космической станции «Мир» // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. №6. С. 84-90.

2. Иванов Л.И., Никитушкина О.Н. Эрозия поверхности образца, экспонированного в открытом космосе, вследствие униполярных дуг // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 1. С. 38-41.

3. Родэ О.Д., Кузин Г.А., Кондратьева М.Р., Базилевский А.Т., Зиновьева Н.Г. Микрократеры на мишенях экспонированных на околоземной орбите // Косм. исслед. 1990. Т. 28, вып. 1. С. 117-124.

4. Зильбербранд Е.Л., Румянцев Б.В., Толкачев М.Д., Ушеренко С.М. Микроструктура стальных преград, обработанных высокоскоростным потоком микрочастиц // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 4. С. 89-94.

5. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникновение частиц в преграды и создание композиционных материалов. Минск, 1998. 208 с.

6. Ооцука К., Силмидзу К., Судзуки Ю., Сэкигити Ю., Тадаки Ц. Сплавы с эффектом «памяти формы». М.: Металлургия, 1990. 224 с.

7. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Бедняков С.А., Новиков Л.С. Изменение морфологии поверхности металлов при сверхзвуковых соударениях // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 1. С. 48-51.

Резюме

Үдеткіштерде зарядталған жылдамдығы жоғары бөлшектермен материалдарды атқылау бойынша имитациялық эксперименттер нәтижесінде 12X18N10T мен 65Г болаттардың беттік морфологиясының өзгерістерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Сәулеленген беттерде қалыптасушы кратерлер ашық гарыштағы металл материалдардың экспозициясы кезінде пайда болатын кратерлерге ұқсас болады.

Summary

The model experiments with Cr18Ni10Ti and 65-G steels irradiated by high energy ion and electron was carry out. It was found that the craters, reshaped on an irradiated surface, are similar to those, which one arise on exposure of metallic stuffs in outside space.

Институт ядерной физики
НЯЦ РК, г. Алматы

Поступила 16.02.07г.