

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УДАРНОГО ВНЕДРЕНИЯ ПЕНЕТРАТОРОВ В ГРУНТ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Е. В. Леун<sup>1</sup>, А. А. Поляков<sup>1</sup>, С. А. Защирицкий<sup>1</sup>, В. К. Сысоев<sup>1</sup>,  
К. М. Пичхадзе<sup>2</sup>, В. В. Шалай<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «НПО Лавочкина»,  
Россия, 141402, г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, 24  
<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4  
<sup>3</sup>Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье обсуждаются условия возникновения так называемого инерциального взрыва при ударном внедрении металлического пенетратора с аппаратурой для научных исследований в грунт небесных тел и меры по недопущению этого. Показано, что основным параметром, определяющим возможность возникновения инерциального взрыва у металлических пенетраторов, является критическая перегрузка  $G_{кр}$ , превышающая определенное пороговое значение, индивидуальное каждому металлу. Обсуждаются вопросы влияния криогенных температур космических условий эксплуатации пенетраторов на снижение критической перегрузки  $G_{кр}$ . Рассматриваются способы компенсации или минимизации этих негативных особенностей. Определены значения критической перегрузки  $G_{кр}$ , соответствующие земным и космическим условиям эксплуатации для ряда сплавов и высокопрочных металлов, широко используемых в ракетно-космической технике. Также оценивается уровень максимальной перегрузки, выдерживаемой научной аппаратурой, для современного уровня развития технологий.

**Ключевые слова:** космические исследования, небесное тело, пенетратор, ударное внедрение, высокоскоростной удар, перегрузка, критическая скорость, подповерхностный грунт, инерциальный взрыв.

### Введение

Для космических исследований параметров небесных тел и их подповерхностного грунта разрабатываются и создаются малые космические аппараты в виде специальных устройств — пенетраторов для доставки научной аппаратуры (НА) в грунт исследуемого тела. Пенетраторы подобны большой игле с заостренным металлическим наконечником, выводятся в космическое пространство и запускаются в направлении исследуемого небесного тела для последующего ударного внедрения в него. Для исследования Луны, Марса и других небесных тел [1–8] разрабатывались пенетраторы, движущиеся после запуска по инерции, т.е. инерционные пенетраторы (в дальнейшем — пенетратор).

Конструкции пенетраторов постоянно совершенствуются, и к 2017 году в России был разработан новый тип пенетратора на основе кристаллической модификации льда [3] с возможностью не только выдерживать высокую ударную нагрузку, но и удаления его после внедрения за счет сублимации льда.

Процесс ударного внедрения пенетратора в грунт небесного тела является наиболее важным событием, существенно влияющим на его последующую работоспособность. При высокой ударной перегрузке использование металлических изделий (наконечник, элементы конструкции, припой в НА) может приводить к их т.н. инерциальному взрыву,

способному негативно повлиять на эффективность всей научной миссии. Этот вопрос недостаточно полно описан в печати, и статья направлена на частичное устранение этого недостатка.

### Постановка задачи

В связи с вышесказанным задачами данной работы является определение предельных значений перегрузок, возникающих при ударном внедрении пенетраторов в грунт небесных тел в космических условиях, не приводящих к инерциальному взрыву его металлических элементов и радиоэлектронной аппаратуры.

### Теория

В этом разделе рассмотрены физико-технические основы возникновения негативных последствий высокоскоростного внедрения пенетратора в грунт небесного тела, связанные в первую очередь с инерциальным взрывом металлических частей пенетратора, а также вопросы ударостойкости научной аппаратуры.

*1. Особенности высокоскоростного удара пенетратора при внедрении в грунт небесного тела.*

Как следует из многочисленных работ, посвященных особенностям и последствиям высокоскоростного удара металлов в высокопрочную преграду, возникающая ударная нагрузка может

приводить к т.н. инерциальному взрыву металла. В этом случае поведение металла становится почти полностью подобным взрыву взрывчатых веществ, таких как тротил и др.

Физическая природа такого явления упрощенно описывается тем, что при высокоскоростном ударе, приводящем к высокой перегрузке  $G$ , кристаллическую решетку металла наконечника за счет сил инерции начинают упорядоченно покидать подвижные заряженные частицы — электроны. Большое число вышедших электронов, их значительный поток становятся критичным для прочности самой кристаллической решетки, приводя в итоге к ее лавинообразному разрушению и взрыву с выбросом мелких осколков металла и энергии (в том числе в виде свечения, высокотемпературной атомно-паровой смеси металла, ударной волны), уровень которой превышает запасенную кинетическую энергию двигавшегося металлического penetrатора.

В работах [9–11] обосновывается связь между критической скоростью и параметрами кристаллической решетки металла наконечника penetrатора:

$$v_{kp} = \sqrt{\frac{2ef\varepsilon}{m_p \cdot A}}, \quad (1)$$

где  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг — масса протона;  $A$  — атомная масса металла наконечника;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона, используемый для перевода единицы энергии из джоулей (Дж) в электронвольты (эВ),  $\varepsilon$  — энергия металлической связи материала наконечника penetrатора, эВ/атом<sup>-1</sup>[12],  $f$  — коэффициент эффективности удара.

Значение коэффициента  $f$  определяется экспериментально для разных металлов и отражает вероятность того, что металлический наконечник разрушится или взорвется при ударе вследствие нарушения металлической связи  $e$  атомов в его кристаллах. Как правило, он лежит в диапазоне [13]:

$$0,75 < f < 1. \quad (2)$$

Этот подход, вероятно, может быть вполне логичен для исследований, связанных с оружейной тематикой по отработке эффективности бронепробивания различных высокопрочных преград (мишеней) из материалов с близкими значениями прочности. В таких случаях значение критической скорости можно использовать как референтный информативный параметр для расчета условий возникновения инерциального взрыва.

Однако, несмотря на то, что penetrатор имеет много общего с бронебойным снарядом, в качестве мишени могут быть грунты небесных тел с существенно большим разбросом прочностных характеристик: от лунного реголита ( $\approx 10$  МПа) до высокопрочного реголита астероидов, приближающегося к высокопрочным бетонам ( $\approx 100$  МПа) [14]. Поэтому для анализа всех нюансов ударного внедрения penetrатора более обоснованно использовать не критическую скорость  $v_{kp}$ , а критическую перегрузку  $G_{kp}$ . Выражение для  $G_{kp}$  можно получить, используя производную выражения (1) с учетом того, что параметры  $m_p$ ,  $A$ ,  $\varepsilon$ ,  $f$  являются постоянными коэффициентами:

$$G_{kp} = \frac{a_{kp}}{g} = \frac{\Delta v_{kp}}{g \cdot \Delta t} = \frac{1}{g} \left( \sqrt{\frac{2ef\varepsilon}{m_p \cdot A}} \right)'$$

$$= \frac{1}{g} \sqrt{\frac{2f\varepsilon}{m_p \cdot A}} \cdot \sqrt{\frac{1}{4e}} \cdot \frac{de}{dt} = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{f\varepsilon}{2m_p \cdot A \cdot e}} \cdot \frac{de}{dt}. \quad (3)$$

Параметр  $\frac{de}{dt}$  в уравнении (3) определяет количество электронов  $n$ , покинувших кристаллическую решетку за единицу времени при внедрении penetrатора, т.е. поток заряженных частиц, изменяющий ее суммарный заряд на значение  $\Delta q = n \cdot e$ , что эквивалентно электрическому току  $I$ :

$$\frac{de}{dt} \approx \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{n \cdot e}{\Delta t} = k_{\text{эл}} I, \quad (4)$$

где  $k_{\text{эл}}$  — коэффициент, учитывающий электрические и конструктивные особенности металла, в том числе: удельное электрическое сопротивление  $\rho_{\text{эл}}$  и его зависимость от температуры  $\rho_{\text{эл}}(T)$ , средняя длина и площадь поперечного сечения металлического наконечника penetrатора.

И тогда, с учетом этого, выражение (3) немного изменится, подтверждая электрическую природу инерциального взрыва одним из основоположников ракетно-космической техники Глушко В. П. [15] при критическом значении электрического тока  $I_{kp}$ , как и показано в [9–11]:

$$G_{kp} = \frac{k_{\text{эл}} \cdot I_{kp}}{g} \sqrt{\frac{f\varepsilon}{2m_p \cdot A \cdot e}}. \quad (5)$$

Полученное выражение в наиболее явном виде демонстрирует электрическую природу условий инерциального взрыва металлов. Этим подтверждаются многочисленные натурные экспериментальные исследования проведенных ранее в земных условиях с окружающими температурами  $T_{\text{окр}} \approx \pm 40$  °С и абсолютным атмосферным давлением  $P_{\text{атм}} = 1$  атм.

2. *Определение перегрузки  $G_{kp}$ , приводящей к инерциальному взрыву, для металлов и их сплавов по глубине внедрения в преграду в земных условиях.*

При использовании микроамперметра, согласно формуле (5), можно было бы комплексно исследовать все особенности высокоскоростного удара металлического penetrатора, фиксируя значение  $I_{kp}$ , соответствующее условиям возникновения инерциального взрыва разных металлов или их сплавов при разных скоростях и изменении других исходных данных. Однако пока подобные эксперименты трудно осуществимы и еще не были реализованы на практике, поэтому более доступен и распространен способ определения  $G_{kp}$  по глубине кратера (воронки, каверны)  $I_{kp}$ , создаваемому в материале преграды.

Согласно результатам многочисленных экспериментов с измеренными глубинами кратеров при высокоскоростном ударе свинцового ударника (пули, снаряда) по металлической высокопрочной преграде для свинца определено значение  $v_{kp} = 702$  м/с [9–11]. Будем считать этот случай с инерциальным взрывом референтным, имеющим начальную скорость внедрения  $v_{нач} = v_{kp}$  при  $I_{kp} = 0,035$  м для экспериментов со свинцовым ударником, описанных в [9–11]. В этом случае ударник тормозится до полной остановки penetrатора ( $v_{кон} = 0$  м/с), а перемещение равно длине каверны:  $l = I_{kp}$ . И тогда можно записать выражение для расчета перегрузки  $G$ , измеряемой в  $g$ :

Таблица 1. Физико-технические характеристики металлов и их сплавов, определяющие параметры высокоскоростного удара penetrатора при внедрении в грунт небесного тела

Table 1. Physical and technical characteristics of pure metals and their alloys that determine the parameters of the high-speed impact of the penetrator when the celestial body is embedded in the ground

№	Тип материала	Металл	Атомная масса A, а.е.м.	Энергия связи e, эВ/атом <sup>1</sup>	Критическая температура T <sub>c</sub> , К	Критическая скорость v <sub>кр'</sub> , м/с	Перегрузка при инерц. взрыве G <sub>кр</sub> в земных условиях, млн, g	Перегрузка при инерц. взрыве G <sub>кр</sub> в космосе, млн, g
1	Сплавы	Свинец/олово	*	*	*	526	0,395	0,26
2		Латунь	*	*	*	755	0,81	0,54
3		Бронза	*	*	*	1245	2,21	1,48
4		Нерж. сталь	*	*	*	1412	2,848	1,90
5		Д/алюминий	*	*	*	1865	4,97	3,31
6	Чистые металлы	Цезий	133	0,827	**	558	0,445	0,015
7		Свинец	207	2,04	7,2	702	0,704	0,023
8		Висмут	209	2,15	0,00053	717	0,734	0,024
9		Кадмий	112,4	1,16	0,5	718	0,736	0,025
10		Барий	137	1,86	**	823	0,968	0,032
11		Цинк	65,4	1,35	0,9	1006	1,446	0,048
12		Индий	115	2,6	4,3	1063	1,614	0,054
13		Уран	238	5,405	0,8	1066	1,623	0,054
14		Олово	119	3,12	3,7	1145	1,873	0,062
15		Тантал	181	8,089	4,5	1495	3,193	0,106
16		Вольфрам	183,8	8,66	0,015	1535	3,366	0,112
17		Медь	64	3,5	**	1660	3,937	0,131
18		Цирконий	91	6,32	0,55	1863	4,958	0,165
19		Молибден	96	6,81	0,92	1883	5,065	0,169
20		Никель	58,7	4,435	**	1944	5,399	0,180
21		Железо	55,8	4,29	**	1960	5,488	0,183
22		Ниобий	93	7,47	9,2	2004	5,737	0,191
23		Титан	48	4,855	0,4	2249	7,226	0,241
24		Алюминий	27	3,34	1,2	2487	8,836	0,295
25		Бериллий	9	3,33	0,03	4301	26,427	0,881

Примечание: \* — нет данных, \*\* — металл не становится сверхпроводником

$$G_{ин} = \frac{a_{кр}}{g} = \frac{v_{кр}^2}{2gl_{кр}} \approx \frac{v_{кр}^2}{0,7} \quad (6)$$

С учетом этого определены значения критической перегрузки G<sub>кр'</sub>, приводящей к инерциальному взрыву для многих металлов и их сплавов при коэффициенте эффективности удара f=0,25 [10], которые представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Как следует из [9–11], энергия связи для сплавов обычно меньше, чем у чистых металлов, поэтому можно допустить, что значение критической скорости сплава ~0,75v<sub>кр</sub> металла большей пропорции или 0,75 от металла с меньшим v<sub>кр</sub> для равных пропорций:

$$v_{спл} = 0,75v_{кр} \quad (7)$$

Сплав олово-свинец составляет основу самых распространенных в радиоэлектронике припоев оловянно-свинцовый (ПОС) с изменением пропорций в диапазоне от 10/90 до 90/10. Ориентируясь на припой ПОС 50 с равными (50/50) пропорциями олова и свинца с учетом условия (5), получаем v<sub>пос</sub> = 0,75v<sub>св</sub> = 0,75·702 = 526 м/с.



Рис. 1. Графики перегрузки металлов G<sub>кр'</sub>, приводящей к инерциальному взрыву для земных условий: для сплавов и чистых металлов  
Fig. 1. Graphs of tip overload resulting in an inertial explosion for Earth's temperatures for alloys and pure metals

Латунь и бронза являются самыми известными сплавами с участием меди с добавками цинка и олова (без учета других легирующих добавок), поэтому можем принять v<sub>лат</sub> = 0,75v<sub>цин</sub> = 0,75·1660 ≈ 1245 м/с и v<sub>бр</sub> = 0,75v<sub>мед</sub> = 0,75·1660 = 1245 м/с соответственно.

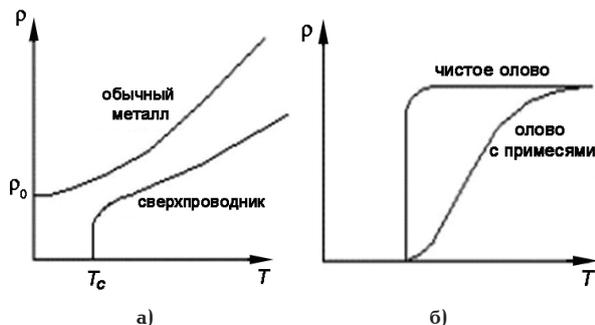


Рис. 2. Зависимости удельного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$  (взяты из [16]: для обычных металлов и сверхпроводников от температуры  $T$  вблизи критической температуры  $T_c$  (а), от наличия примесей в металле, на примере олова (б).  
Fig. 2. Dependences of the specific electric resistance  $\rho_{el}$  (taken from [16]: for ordinary metals and superconductors on the temperature  $T$  near the critical temperature  $T_c$  (a), from the presence of impurities in the metal, for example, pewter (b)

У нержавеющей стали и дюралюминия, наиболее часто используемых в ракетно-космической технике сплавов, основу составляют железо и алюминий, поэтому имеем  $v_{нж} = 0,75v_{ж\text{ел}} = 1412$  м/с и  $v_{гор} = 0,75v_{ал} = 1865$  м/с соответственно.

Первыми из состава чистых металлов в табл. 1 стоят цезий и свинец. Это лучший материал для экспериментального исследования взрыва снарядов, поскольку оба металла распадаются при скорости, доступной стрелковому оружию. Снаряды из обедненного урана требуют более высокой скорости, которую обеспечивают артиллерийские системы. Алюминий, и особенно бериллий, менее всего подвержен данному эффекту [10].

3. *Определение перегрузки  $G'_{кр}$ , приводящей к инерциальному взрыву, для металлов и их сплавов в космических условиях.*

Фактическая эксплуатация пенетратора перед ударным внедрением соответствует космическим условиям, как правило, близким к криогенным температурам и вакууму. Это обуславливает существенное уменьшение удельного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$  для обычных металлов (рис. 2а), приближая к возможности проявления эффекта сверхпроводимости для сверхпроводников (рис. 2а) или меняя зависимость  $\rho_{эл}(T)$  для сплавов или металлов с примесями, как показано на рис. 2б

на примере олова [16]. Из-за изменений удельного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$  также меняется и значение  $k_{эл}$ :  $k_{эл} \rightarrow k'_{эл}$ ; и, соответственно, с учетом принципа подобия можно записать выражение (5) в новом виде:

$$G'_{кр} = \frac{k'_{эл} \cdot I_{кр}}{g} \sqrt{\frac{f\varepsilon}{2m_p \cdot A \cdot e}}, \quad (8)$$

где  $k'_{эл}$  — коэффициент, учитывающий электрические и конструктивные особенности металла с учетом космических условий.

С учетом вышесказанного можно уверенно предполагать, что значения  $k_{эл}$  превышают  $k'_{эл}$ :  $k_{эл} > k'_{эл}$ . Учитывая это и связь между  $k_{эл} > k'_{эл}$  с удельными электрическими сопротивлениями  $\rho_{эл}$  и  $\rho'_{эл}$  для земных и космических температур соответственно, можно записать соотношение для выражений (5) и (8):

$$N = \frac{G_{кр}}{G'_{кр}} = \frac{k_{эл}}{k'_{эл}} \approx \frac{\rho_{эл}}{\rho'_{эл}}. \quad (9)$$

Физический смысл этой формулы в том, что она показывает повышение вероятности появления инерциального взрыва в космосе по сравнению с земными условиями, обусловленного снижением значений электрических параметров металла, а именно удельного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$ . Это может быть связано с ослаблением собственных сил кристаллической решетки металла при криогенных температурах, чтобы препятствовать вылету из нее электронов при ударном воздействии.

На рис. 3 [17] приведены графики зависимостей удельного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$  от температуры  $T$  для разных металлов (рис. 3а), их чистоты (на примере алюминия с изменением чистоты от 99,2 % до 99,999 %) (рис. 3б) и состава сплава (на примере нержавеющей стали 12Х18Н10Т, рис. 3в).

С помощью вышеупомянутых графиков можно оценить значения  $N$  при переходе от обычных земных температур к криогенным (для  $T < 10$  К). Как видно из вышеупомянутых графиков  $N$  может составлять как минимум от 30 до 5000 (рис. 3а, б), а для сложных сплавов —  $N_{снл} \approx 1,5$  (рис. 3в). С уче-

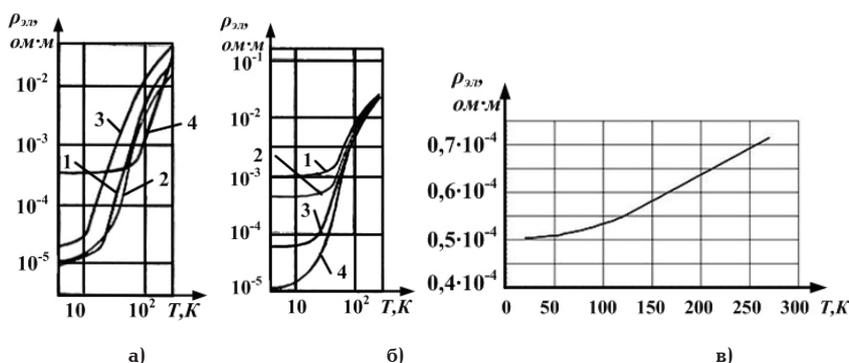


Рис. 3. Зависимости удельного объемного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$  от температуры  $T$ : для металлов 1 — медь, 2 — алюминий, 3 — магний, 4 — бериллий (а), для алюминия с чистотой: 1 — 99,2 %, 2 — 99,9 %, 3 — 99,99 %, 4 — 99,999 % (б), нержавеющей стали (12Х18Н10Т) (взяты из [17])

Fig. 3. Dependences of the specific electrical resistance  $\rho_{el}$  on temperature  $T$ : for different metals (a), for aluminum with different degrees of purity (b), stainless steel (12X18H10T) (taken from [17])

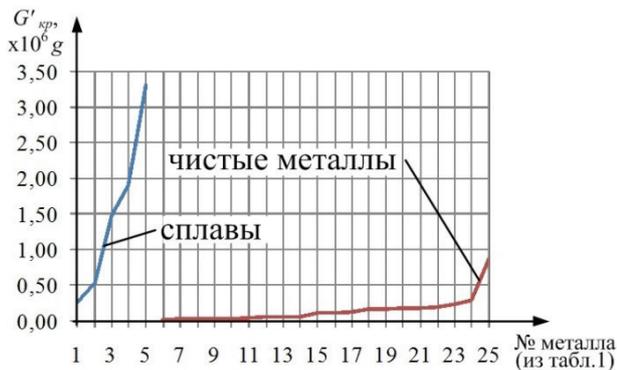


Рис. 4. Графики перегрузки наконечников, приводящей к инерциальному взрыву для космических условий для сплавов и чистых металлов

Fig. 4. Graphs of tip overload resulting in an inertial explosion for space temperatures for alloys and pure metals

том этого, для дальнейших расчетов можно условно принять, что как минимум для чистых материалов  $N_{чис} \approx 30$  (рис. 3б), а для сплавов —  $N_{спла} \approx 1,5$  (рис. 3в). Эти значения  $N$  использованы для определения значения  $G'_{кр}$ , расчетные значения которых приведены в табл. 1 и изображены на рис. 4. Сравнение зависимостей на рис. 1 и рис. 4 показывает, что космические условия с криогенными температурами почти в 8 раз ухудшают максимальные значения  $G'_{кр}$  и по сравнению с  $G_{кр}$ , а чистые металлы начинают уступать по этому параметру сплавам. Для сохранения высоких значений, как для  $G_{кр}$  (рис. 1), необходимо обеспечивать обогрев металлических частей пенетратора с помощью системы обеспечения терморегулирования. Но определение более точных значений  $N$  для разных металлов с более ясным пониманием всех нюансов предполагает проведение дополнительных экспериментальных научных исследований с термовакуумными испытаниями.

Другим косвенным параметром, позволяющим оценить вероятность инерциального взрыва в космических условиях и влияющим на выбор используемых металлов пенетратора, может быть значение критической температуры перехода металла в состояние сверхпроводника. Значения  $T_r$  для некоторых металлов приведены в табл. 1, и, в соответствии с ней, металлы можно разделить условно на три группы:

- 1) металлы, которые не становятся сверхпроводниками ( $\rho_{эл} \neq 0$ ): цезий, барий, медь, никель, железо;
- 2) металлы, становящиеся сверхпроводниками ( $\rho_{эл} \approx 0$ ) при  $T_c < 1$  К: висмут (0,00053 К), кадмий (0,5 К), цинк (0,9 К), уран (0,8 К), вольфрам (0,15 К), цирконий (0,55 К), молибден (0,92 К), титан (0,4 К), бериллий (0,03 К);
- 3) металлы, становящиеся сверхпроводниками ( $\rho_{эл} \approx 0$ ) при  $T_c > 1$  К: свинец (7,2 К), индий (4,3 К), олово (3,7 К), тантал (4,5 К), ниобий (9,2 К), алюминий (1,2 К).

Таким образом, с точки зрения для использования в пенетраторах, наиболее предпочтительны металлы 1-ой группы, в меньшей степени — 2-ой группы и наименее желательны металлы 3-ей группы.

#### 4. Ударостойкость научной аппаратуры и блоков их составляющих.

Имеющийся к настоящему времени научно-технический задел в области ударостойких приборов НА и блоков их составляющих позволяет положительно оценивать достигнутый уровень. Так, напри-

мер, согласно [18], для наиболее ответственного узла в виде генератора частоты на поверхностных акустических волнах и для микросхем ведущих западных стран в 2010 году значение  $G$  достигало 100 тыс. г и 100 тыс. г в течение 1 мс соответственно. Современные темпы прогресса в этом позволяют уверенно предполагать достижение значений максимальной перегрузкой до 300 тыс. г к настоящему времени.

Для отдельных элементов датчиков (пьезоселерометры, чувствительные элементы датчиков с проводами, но без «электронной начинки») уровень перегрузки уже к настоящему времени составил 1,5 млн г [19].

## Результаты экспериментов

Характер и особенности инерциального взрыва хорошо проявляются на примере высокоскоростного удара свинцового ударника в прочную преграду, представленного на видеокдрах (рис. 5), снятых при его экспериментальной видеорегистрации [11]. В процессе такого взрыва нарушаются металлические связи ударника, приводящие к прямому переходу свинца из твердого состояния в атомно-паровую смесь, обладающую свойствами газа с температурой, достигающей 22000 К. Время зарождения смеси составляет  $\approx 1$  мкс. Твердые осколки свинца размером 0,5–3 мм появляются на месте соударения через 100–140 мкс после касания ударником преграды.

Возникший атомно-паровой поток удаляется от преграды в воздухе при нормальных условиях со сверхзвуковой скоростью, соответствующей  $M \approx 2,4$ . Этот поток имеет две тепловые составляющие (высоко- и низкотемпературную), которые движутся с близкими скоростями.

## Обсуждение результатов

1. Конструкция пенетратора должна быть разработана с возможностью исключения инерциального взрыва, сопровождаемого выбросом значительной энергии, атомно-паровой смеси, высокой температурой и взрывной волной, обусловленный высокой перегрузкой  $G_{кр}$  при ударном внедрении в грунт небесного тела.

2. Для анализа вероятности возникновения инерциального взрыва при ударном внедрении металлического пенетратора в грунт небесного тела должна использоваться критическая перегрузка  $G_{кр}$ . Физическая основа этого взрыва имеет электрическую природу, связанную с выходом подвижных электронов из кристаллической решетки металла и ее последующим разрушением с выбросом значительной энергии. Удельное электрическое сопротивление металла  $\rho_{эл}$ , описывающее степень препятствования выхода электронов кристаллической решетки за ее пределы, может быть использовано для косвенной оценки критической перегрузки  $G_{кр}$ .

3. Космические условия эксплуатации пенетратора перед ударным внедрением связаны со значительным уменьшением температуры  $T$ , приводя к существенному падению удельного электрического сопротивления металла  $\rho_{эл}$  и снижением уровня критической перегрузки  $G_{кр}$ , которая может привести к инерциальному взрыву.

4. Для сплавов снижение удельного электрического сопротивления металла  $\rho_{эл}$  для космических температур, как правило, существенно меньше вы-



а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Видеокadres движения ударника (а), фронта свечения взрывной волны (б) и атомно-паровой смеси (в, г) (взяты из [11])

Fig. 5. Videoframes of the motion of the impactor (a), the front of the glow of the blast wave (b), and the atomic-vapor mixture (c, d) (taken from [11])

сокочистых металлов и они могут иметь преимущество для использования в пенетраторе.

5. Оловянно-свинцовые припои, традиционно используемые в радиоэлектронной аппаратуре, имеют низкое значение перегрузки в космических условиях —  $G'_{кр} \approx 260$  тыс. g.

6. Современный уровень развития радиоэлектроники позволяет предположить достижение максимальной перегрузки  $\approx 300$  тыс. g и 1,5 млн g для микросхем и отдельных элементов, например, для пьезоакселерометра (чувствительного элемента без «электронной начинки»).

#### Выводы и заключение

1. Изменения удельного электрического сопротивления  $\rho_{эл}$  при криогенных температурах оказывают существенное влияние на выбор металла пенетратора, в том числе его наконечника.

2. Исключение возможности инерциального взрыва металлического пенетратора от уменьшения удельного электрического сопротивления металла  $\rho_{эл}$  для космических температур предопределяет необходимость его нагрева перед ударным внедрением в грунт небесного тела примерно до земных температур ( $\approx 293$  K) за счет введения системы обеспечения терморегулирования.

3. Одним из вариантов существенного уменьшения возможности возникновения инерциального взрыва может быть использование в пенетраторе высокопрочных диэлектрических материалов, не проводящих электрический ток и не имеющих состояния сверхпроводника при криогенных температурах, например, лейкосапфир, стишовит и др.

4. Исключение возможности инерциального взрыва в научной аппаратуре может быть обеспечено за счет отказа от использования традиционных оловянно-свинцовых припоев с переходом на использование специальных припоев, выдерживающих более высокую перегрузку  $G'_{кр}$  и/или альтернативные способы соединения металлических элементов и проводов, например, скрутка и др.

#### Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена в инициативном порядке.

Авторы благодарят к.т.н., доцента кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, директора научно-образовательного центра «НИИРП ОмГТУ» С. А. Завьялова за советами по вопросам ударостойкости радиоэлектронных устройств.

#### Список источников

1. Skulinova M., Zheng W., Hu Y.-R. [et al.]. Micro-Penetrator for Canadian Planetary Exploration // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. Vol. 5. P. 366–373.
2. Gao Y., Ellery A., Jaddou M. [et al.]. A novel penetration system for in situ astrobio logical studies // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2005. Vol. 2. P. 281–286.
3. Пат. 2626792 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/00. Способ доставки полезного груза в грунт небесного тела, обеспечения исследований грунта и небесного тела и устройство его реализации (варианты) / Шалай В. В., Пичхадзе К. М., Багров А. В., Леун Е. В. [и др.]. № 2015154859; заявл. 16.05.16; опубл. 01.08.17, Бюл. № 22.

4. Gowen R. A., Smith A., Fortes A. D. [et al.]. Penetrators for in situ subsurface investigations of Europa // *Advances in Space Research*. 2010. Vol. 48 (4). P. 725–742. DOI: 10.1016/j.asr.2010.06.026.
5. Gowen R. A., Smith A., Griffiths A. [et al.]. Kinetic penetrators for Exploration of solar system bodies // 5th International Planetary Probes Workshop (IPPW-5). Bordeaux, France, 23–29 June 2007. URL: [http://www.mrc.uidaho.edu/~atkinson/IPPW5/Papers/s6\\_4gowen02.pdf](http://www.mrc.uidaho.edu/~atkinson/IPPW5/Papers/s6_4gowen02.pdf). (дата обращения: 11.12.2020).
6. Hopf T., Kumar S., Karl W. J. [et al.]. Shock protection of penetrator-based instrumentation via a sublimation approach // *Advances in Space Research*. 2010. Vol. 45. P. 460–467.
7. Collinson G. Planetary penetrators: the vanguard for the future exploration of the solar system // *Journal of the British Interplanetary Society*. 2008. Vol. 61. P. 198–202.
8. Cox R., Ong L. C. F., Arakawa M. [et al.]. Impact penetration of Europa's ice crust as a mechanism for formation of chaos terrain // *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. Vol. 43 (12). P. 2027–2048. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2008.tb00659.x.
9. Марахтанов М. К., Велданов В. А., Духопельников Д. В. [и др.]. Экспериментальное исследование энергетических характеристик высокоскоростного взаимодействия металлического ударника с преградой // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 9 (21). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-948.
10. Марахтанов М. К., Велданов В. А., Максимов М. А. [и др.]. Некоторые особенности взаимодействия металлического снаряда с металлической преградой // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2009. № 1 (59). С. 43–53.
11. Марахтанов М. К., Велданов В. А., Духопельников Д. В. [и др.]. Моделирование механизма разрушения космических аппаратов в результате инерциального взрыва их металлических узлов при столкновении // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24, № 1. С. 17–25.
12. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. Москва: Наука, 1978. 791 с.
13. Пат. 2260779 Российская Федерация, МПК G 01 L 5/14, F 42 B 12/02. Способ получения энергии из металлических материалов / Марахтанов М. К. № 2004114626/02; заявл. 14.05.04; опубл. 20.09.05, Бюл. № 26.
14. Федоров С. В., Федорова Н. А. Влияние импульса реактивной тяги на глубину проникания исследовательского зонда в грунт планеты // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-571.
15. Глушко В. П. Металл как взрывчатое вещество. Пионеры ракетной техники. Ветчинкин. Глушко. Королев. Тихомиров. Избранные труды (1929–1945 гг.). Москва: Наука, 1972. С. 89–110.
16. Сверхпроводимость. URL: <https://present5.com/sverhprovodimost-1-2-3-4-5-eksperimentalnye-fakty/> (дата обращения: 15.01.2021).
17. Электрические свойства материалов при криогенных температурах. URL: <https://cyberpedia.su/16xc4b7.html> (дата обращения: 15.01.2021).
18. Ляшук А. Н., Завьялов С. А., Лепетаев А. Н. Проектирование высокочастотного автогенератора для ударостойких применений // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2014. № 4. С. 43–46.
19. Велданов В. А., Марков В. А., Пусев В. И. [и др.]. Применение акселерометрии для исследования динамических механических свойств материалов в усложненных условиях проведения измерений // *Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана*. 2012. № 8. С. 35–56. DOI: 10.7463/0812.0428828.
- 
- ЛЕУН Евгений Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.  
SPIN-код: 6060-8056,  
AuthorID (РИНЦ): 367560  
AuthorID (SCOPUS): 57200722184
- ПОЛЯКОВ Алексей Александрович**, заместитель генерального конструктора АО «НПО Лавочкина», г. Химки.
- ЗАЩИРИНСКИЙ Сергей Александрович**, начальник комплекса АО «НПО Лавочкина», г. Химки.
- СЫСОЕВ Валентин Константинович**, доктор технических наук, начальник отдела научно-исследовательских работ и перспективных исследований АО «НПО Лавочкина», г. Химки.  
SPIN-код: 5673-6495,  
AuthorID (РИНЦ): 565837
- ПИЧХАДЗЕ Константин Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Системный анализ и управление» Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), г. Москва.  
AuthorID (РИНЦ): 499063
- ШАЛАЙ Виктор Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология», президент Омского государственного технического университета, г. Омск.  
SPIN-код: 2322-6820  
AuthorID (РИНЦ): 9913  
ORCID: 0000-0003-0635-4849  
AuthorID (SCOPUS): 35792469000  
AuthorID (SCOPUS): 56755298300  
AuthorID (SCOPUS): 57190972363  
ResearcherID: P-8233-2015  
Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

#### Для цитирования

Леун Е. В., Поляков А. А., Заширинский С. А., Сысоев В. К., Пичхадзе К. М., Шалай В. В. Некоторые особенности ударного внедрения пенетраторов в грунт небесных тел // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2021. Т. 5, № 1. С. 71–79. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-71-79

Статья поступила в редакцию 15.02.2021 г.

© Е. В. Леун, А. А. Поляков, С. А. Заширинский, В. К. Сысоев, К. М. Пичхадзе, В. В. Шалай

## SOME FEATURES OF IMPACT PENETRATION OF PENETRATORS INTO THE GROUND OF CELESTIAL BODIES

**E. V. Leun<sup>1</sup>, A. A. Poliakov<sup>1</sup>, S. A. Zashchirinsky<sup>1</sup>, V. K. Sysoev<sup>1</sup>,  
K. M. Pichkhadze<sup>2</sup>, V. V. Shalay<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Lavochkin Association,  
Russia, Khimki, Moscow region, Leningradskaya St. 24, 141402

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Russia, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4, 125993

<sup>3</sup>Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article discusses the features of the inertial explosion of metal products and the prevention of its occurrence during its impact introduction of a metal penetrator into the ground of celestial bodies. The possibility of an inertial explosion in metal penetrators is determined when calculating the critical overload of the  $G_{cr}$  that exceeds a certain threshold value for each metal. These values are determined for a number of alloys and high-purity metals widely used in rocket and space technology for Earth and space temperatures. The features of reducing the critical overload threshold of the  $G_{cr}$  for space conditions at cryogenic temperatures and ways to prevent an inertial explosion are discussed.

**Keywords:** space research, celestial body, penetrator, impact penetration, high-speed impact, overload, critical velocity, subsurface ground, inertial explosion.

### References

1. Skulinova M., Zheng W., Hu Y.-R. [et al.]. Micro-Penetrator for Canadian Planetary Exploration // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. Vol. 5. P. 366–373. (In Engl.).
2. Gao Y., Ellery A., Jaddou M. [et al.]. A novel penetration system for in situ astrobiological studies // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2005. Vol. 2. P. 281–286. (In Engl.).
3. Patent 2626792 Russian Federation, IPC B 64 G 1/00. Sposob dostavki poleznogo gruzha v grunt nebesnogo tela, obespecheniya issledovaniy grunta i nebesnogo tela i ustroystvo ego realizatsii (varianty) [Method of payload delivery to celestial body soil, provision for soil and celestial body exploration and device for its implementation (versions) // Shalay V. V., Pichkhadze K. M., Bagrov A. V., Leun E. V. [et al.]. No. 2015154859. (In Russ.).
4. Gowen R. A., Smith A., Fortes A. D. [et al.]. Penetrators for in situ subsurface investigations of Europa // Advances in Space Research. 2010. Vol. 48 (4). P. 725–742. DOI: 10.1016/j.asr.2010.06.026. (In Engl.).
5. Gowen R. A., Smith A., Griffiths A. [et al.]. Kinetic penetrators for Exploration of solar system bodies // 5th International Planetary Probes Workshop (IPPW-5). Bordeaux, France, 23–29 June 2007. URL: [http://www.mrc.uidaho.edu/~atkinson/IPPW5/Papers/s6\\_4gowen02.pdf](http://www.mrc.uidaho.edu/~atkinson/IPPW5/Papers/s6_4gowen02.pdf). (accessed: 11.12.2020). (In Engl.).
6. Hopf T., Kumar S., Karl W. J. [et al.]. Shock protection of penetrator-based instrumentation via a sublimation approach // Advances in Space Research. 2010. Vol. 45. P. 460–467. (In Engl.).
7. Collinson G. Planetary penetrators: the vanguard for the future exploration of the solar system // Journal of the British Interplanetary Society. 2008. Vol. 61. P. 198–202. (In Engl.).
8. Cox R., Ong L. C. F., Arakawa M. [et al.]. Impact penetration of Europa's ice crust as a mechanism for formation of chaos terrain // Meteoritics & Planetary Science. 2008. Vol. 43 (12). P. 2027–2048. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2008.tb00659.x. (In Engl.).

9. Marakhtanov M. K., Veldanov V. A., Dukhopel'nikov D. V. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye energeticheskikh kharakteristik vysokoskorostnogo vzaimodeystviya metallicheskogo udarnika s pregradoy [The experimental research of energy characteristics of high velocity interaction between a metal firing pin and a wall] // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. Vol. 9 (21). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-948. (In Russ.).
10. Marakhtanov M. K., Veldanov V. A., Maksimov M. A. [et al.]. Nekotoryye osobennosti vzaimodeystviya metallicheskogo snaryada s metallicheskoj pregradoy [Some features of the interaction of a metal projectile with a metal barrier] // Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Raketnykh i Artilleriyskikh Nauk*. 2009. No. 1 (59). P. 43–53. (In Russ.).
11. Marakhtanov M. K., Veldanov V. A., Dukhopel'nikov D. V. [et al.]. Modelirovaniye mekhanizma razrusheniya kosmicheskikh apparatov v rezul'tate inertsiyal'nogo vzryva ikh metallicheskih uzlov pri stolknovenii [Modeling a spacecraft fracture mechanism occurring as a result of its metal components inertial explosion at collision] // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. *Aerospace MAI Journal*. 2017. Vol. 24, no. 1. P. 17–25. (In Russ.).
12. Kittel' Ch. Vvedeniye v fiziku tverdogo tela [Introduction to Solid State Physics]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 791 p. (In Russ.).
13. Patent 2260779 Russian Federation, IPC 7 G 01 L 5/14, F 42 B 12/02. Sposob polucheniya energii iz metallicheskih materialov [Method for production of energy from metallic materials] / Marakhtanov M. K. No. 2004114626/02. (In Russ.).
14. Fedorov S. V., Fedorova N. A. Vliyaniye impul'sa reaktivnoy tyagi na glubinu pronikaniya issledovatel'skogo zonda v grunt planety [Influence of the jet thrust impulse on depth of the research probe penetration into planet soil] // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. *Engineering Journal: Science and*

*Innovation*. 2013. Vol. 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-571. (In Russ.).

15. Glushko V. P. Metall kak vzryvchatoye veshchestvo. Pionery raketnoy tekhniki. Vetchinkin. Glushko. Korolev. Tikhonravov. Izbrannyye trudy (1929—1945 gg.) [Metal as an explosive. Pioneers of rocketry. Vetchinkin. Glushko. Korolyov. Tikhonravov. Selected Works (1929—1945)]. *Moscow: Nauka Publ.*, 1972. P. 89—110. (In Russ.).

16. Sverkhprovodimost'. [Superconductivity]. URL: <https://present5.com/sverxprovodimost-1-2-3-4-5-eksperimentalnyefakty/> (accessed 15.01.2021). (In Russ.).

17. Elektricheskiye svoystva materialov pri kriogennykh temperaturakh [Electrical properties of materials at cryogenic temperatures]. URL: <https://cyberpedia.su/16xc4b7.html> (accessed 15.01.2021). (In Russ.).

18. Lyashuk A. N., Zavyalov S. A., Lepetaev A. N. Proyektirovaniye vysokochastotnogo avtogeneratora dlya udarostoykikh primeneniy [Design of high frequency oscillator for high shock applications] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2014. No. 4. P. 43—46.

19. Veldanov V. A., Markov V. A., Pusev V. I. [et al.]. Primeneniye akselerometrii dlya issledovaniya dinamicheskikh mekhanicheskikh svoystv materialov v uslozhnennykh usloviyakh provedeniyai zmereniy [Application of accelerometry for research of dynamic mechanical properties of materials in complicated environments of measuring] // *Nauka i obrazovaniye: nauchnoy eizdaniye MGTU im. N. E. Baumana. Science and Education of Bauman MSTU*. 2012. No. 8. P. 35—56. DOI: 10.7463/0812.0428828. (In Russ.).

---

**LEUN Evgeny Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer, Lavochkin Association, Khimki.

AuthorID (RSCI): 367560

AuthorID (SCOPUS): 57200722184

**POLIAKOV Alexey Alexandrovich**, Deputy General Designer, Lavochkin Association, Khimki.

**ZASHCHIRINSKY Sergey Aleksandrovich**, Head of Lavochkin Association Complex, Khimki.

**SYSOEV Valentin Konstantinovich**, Doctor of Technical Sciences, Head of Advanced Research Department, Lavochkin Association, Khimki.

**PICHKHADZE Konstantin Mikhailovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of System Analysis and Management Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow. AuthorID (RSCI): 499063

**SHALAY Viktor Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Transport, Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, President of Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 2322-6820

AuthorID (RSCI): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

Address for correspondence: stankin1999@mail.ru

#### For citations

Leun E. V., Polyakov A. A., Zashchirinsky S. A., Sysoev V. K., Pichkhadze K. M., Shalay V. V. Some features of impact penetration of penetrators into the ground of celestial bodies // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 71—79. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-71-79.

Received February 15, 2021.

© E. V. Leun, A. A. Poliakov, S. A. Zashchirinsky, V. K. Sysoev, K. M. Pichkhadze, V. V. Shalay