

05

Откольная прочность и динамический предел упругости железо-никелевых сплавов метеоритного происхождения

© С.В. Разоренов,¹ А.С. Савиных,¹ Г.В. Гаркушин,¹ Р.Ф. Муфтахетдинова,² И.В. Хомская,³ Г.А. Яковлев,^{2,4} В.А. Хотинков,² В.И. Гроховский²

¹ Федеральное исследовательское учреждение проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, Россия

³ Институт физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева, 620108 Екатеринбург, Россия

⁴ Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620016 Екатеринбург, Россия
e-mail: razsv@ficp.ac.ru

Поступило в Редакцию 18 марта 2024 г.

В окончательной редакции 23 апреля 2024 г.

Принято к публикации 24 апреля 2024 г.

Представлены результаты измерений критических разрушающих напряжений (откольной прочности) и параметров упруго-пластического перехода образцов четырех железных метеоритов: Чинге, Сихотэ-Алинь, Сеймчан, Дронино при ударно-волновом нагружении. Эксперименты проведены на пневматической пушке при интенсивности ударного сжатия ~ 5.5 и ~ 11 ГПа и скорости деформирования перед откольным разрушением $\sim 10^5$ с⁻¹. Прочностные характеристики определялись из анализа полных волновых профилей, регистрируемых в процессе нагружения образцов с помощью лазерного интерферометра VISAR с высоким пространственно-временным разрешением. Установлено, что образцы метеорита Сихотэ-Алинь демонстрируют самый высокий динамический предел упругости из всех испытанных образцов, который составляет 1.6 ГПа. Наибольшее значение откольной прочности (3.92–4.03 ГПа) измерено на образцах атаксита Чинге. Проведен сравнительный анализ прочностных характеристик исследованных метеоритов с прочностными свойствами железо-никелевого сплава Н6, имеющего близкий к метеоритному состав, а также с рядом современных конструкционных сталей различного назначения. Сравнение показало, что прочностные характеристики железных метеоритов при данных условиях нагружения близки прочностным свойствам сталей и железо-никелевых сплавов земного происхождения.

Ключевые слова: железный метеорит, ударно-волновое нагружение, откольная прочность, динамический предел упругости, микроструктура.

DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58127.87-24

Введение

Исследование структуры и свойств вещества внеземного происхождения вызывает большой интерес не только у исследователей в области космохимии и минералогии, но и в области физики конденсированного состояния и материаловедения, поскольку большинство метеоритов имеют в своем составе сплавы на основе железа, относящиеся к материалам конструкционного и функционального назначения. Кроме того, вопросы защиты Земли от возможного столкновения с космическими телами значительного размера с катастрофическими последствиями остаются актуальными и открытыми на протяжении многих последних десятилетий. Изучение структуры и механических свойств материалов внеземного происхождения (метеориты и астероиды) в последнее время приобретает особую значимость в связи с осознанием реальной астероидно-кометной опасности для Земли и изысканием возможностей ее предотвращения. В настоящее время предлагается несколько

основных путей предотвращения таких столкновений, один из которых предполагает использование сильных взрывных воздействий на космическое тело, в частности, с помощью ядерного взрыва или большого заряда промышленного взрывчатого вещества (ВВ) с целью фрагментации тела метеороида на мелкие и неопасные для Земли осколки, либо отклонения его траектории [1–8]. До настоящего времени все эти методы находятся в стадии теоретических разработок, численных расчетов и лабораторных опытов, моделирующих импульсные воздействия на имитаторы космических тел. Исследования в этом направлении осложняются отсутствием достоверной информации о прочностных свойствах таких космических объектов, особенно при импульсных воздействиях. Такие измерения возможны лишь на найденных осколках метеоритов, достигших поверхности Земли, поскольку только они в настоящее время являются доступными для лабораторных исследований астероидного вещества. Таким образом, вещество метеоритов — единственный материал, имеющийся на

Земле, для оценки физических и механических свойств метеороидов [9]. Сохранившиеся индивидуальные фрагменты метеоритов при прохождении ими атмосферы Земли подвергаются абляции, большому силовому воздействию и сильному нагреву поверхностных слоев, вызывая термическое воздействие на исходную структуру вещества метеорита [1,5,10]. Однако, как показали многочисленные измерения, глубина такого воздействия небольшая и зависит от теплофизических характеристик вещества. Видимая зона термического влияния и связанных с ним внутренних напряжений на структуру и свойства метеоритов выявляется металлографическими методами, и, например, для железных метеоритов она составляет 0.1–10 mm [11–13]. Таким образом, внутренние объемы сохранившегося вещества достигших Земли метеоритов остаются практически неизменными по структуре и свойствам, а информация, полученная при их испытаниях, может являться основой для прогностических расчетов эффективности дробления крупных тел при взрывном или ином импульсном воздействии. Несомненно, характер разрушения при соударении тел в космическом пространстве и разрушение метеорных тел в земной атмосфере или при ударе о поверхность Земли определяется, прежде всего, их прочностными характеристиками [14]. Однако к настоящему моменту в научной литературе данные о механических свойствах метеоритов весьма ограничены [9], а исследований по влиянию химического состава и структуры метеоритного вещества на его деформационные и прочностные характеристики при ударно-волновых воздействиях практически не проводилось.

Целью настоящей работы были измерения особенностей упруго-пластического перехода и критических разрушающих напряжений (откольной прочности) при коротких импульсных нагрузках большой амплитуды для образцов железных метеоритов, найденных в разное время на территории России метеоритной экспедицией УрФУ.

1. Материалы и методы исследования

Материалами исследования были фрагменты четырех железных метеоритов: Чинге, Сихотэ-Алинь, Сеймчан и Дронино. На рис. 1 представлена микроструктура исследованных метеоритов. Первые образцы метеорита Чинге были обнаружены в районе хребта Танну-Ола (сейчас Республика Тыва) в 1911 г. Фрагменты этого метеорита, исследуемые в настоящей работе, были собраны в 1986 г. метеоритной экспедицией УрФУ. Содержание Ni в образцах варьируется от 15.5 до 18.0 wt.%. Микроструктура образцов метеорита Чинге в основном представляет собой субмикроскопическую двухфазную смесь α -фазы (камасита) Fe(Ni) и γ -фазы (тэнита) Fe(Ni) — с редкими зародышами α -фазы (камасита) и кристаллами добреелита FeCr₂S₄, троилита FeS, шрейберзита (Fe,Ni)₃P (рис. 1, a) [15].

Метеорит Сеймчан относится к типу железокаменных метеоритов, хотя его первый экземпляр весом около 300 kg был найден в 1967 г. на притоке реки Ясачная в Магаданской области и состоял только из металла [16]. К настоящему времени собрано несколько тонн железных и железокаменных фрагментов этого метеорита. Для настоящей работы был выбран образец метеорита Сеймчан из коллекции УрФУ, основная часть которого представляет собой железо-никелевый сплав с 9.1% Ni. Микроструктура образца состоит из видманштеттовых „балок“ α -фазы (камасита) Fe(Ni), γ -фазы (Fe,Ni-тэнит) и участков с двухфазной смесью $\alpha + \gamma$ -фаз (плессит) Fe(Ni) (рис. 1, b).

Железный метеорит Сихотэ-Алинь является одним из немногих метеоритов, чье падение 12 февраля 1947 г. наблюдалось многочисленными очевидцами. Болид пронесся по небу над Приморьем и выпал обильным метеоритным дождем, а также образовал несколько ударных кратеров. Содержание Ni в исследуемых фрагментах из коллекции УрФУ составляет 5–7 wt.%. По структуре образец метеорита Сихотэ-Алинь состоит из α -фазы (камасита) Fe(Ni) и стержневидных выделений рабдита (Fe,Ni)₃P (рис. 1, c) [17,18].

Фрагменты метеоритного дождя, названного „Дронино“, были найдены в 2003 г. в Касимовском районе Рязанской области. В песчаном грунте на глубине до 3 m было обнаружено более трех тонн метеоритного вещества. Древнее падение во влажную среду привело к значительному окислению мелких фрагментов, но в массивных образцах сохранилась неокисленная металлическая основа. Исследуемые образцы метеорита Дронино представляют собой сплав железа с 9.3 wt.% Ni и 0.47 wt.% Co. Структура метеорита состоит из дисперсной смеси α -фазы (камасита) Fe(Ni) и γ -фазы (Fe,Ni-тэнита) с крупными включениями сульфидов FeS (рис. 1, d) [19].

Структуру всех метеоритов изучали на шлифах, изготовленных по стандартным методикам, после травления в 2–4 vol.% растворе HNO₃ в этиловом спирте. Микроструктурные исследования проводили на сертифицированном оборудовании научно-образовательного центра „Нанотехнологий и наноматериалов“ Уральского федерального университета: инвертированном микроскопе отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40MAT.

Образцы для ударно-волновых экспериментов в виде плоскопараллельных пластин толщиной ~ 2 mm с линейными размерами ~ 12 × 12 mm вырезались на электроискровом станке из внутренних частей фрагментов железных метеоритов с микроструктурами, описанными выше (рис. 1). Обе плоскости образцов шлифовались на мелкой шлифовальной бумаге до необходимой чистоты. Тыльная поверхность образцов после дополнительной тонкой шлифовки обеспечивала хорошее диффузное отражение зондирующего лазерного излучения интерферометрического измерителя скорости, необходимое для регистрации полных волновых профилей время

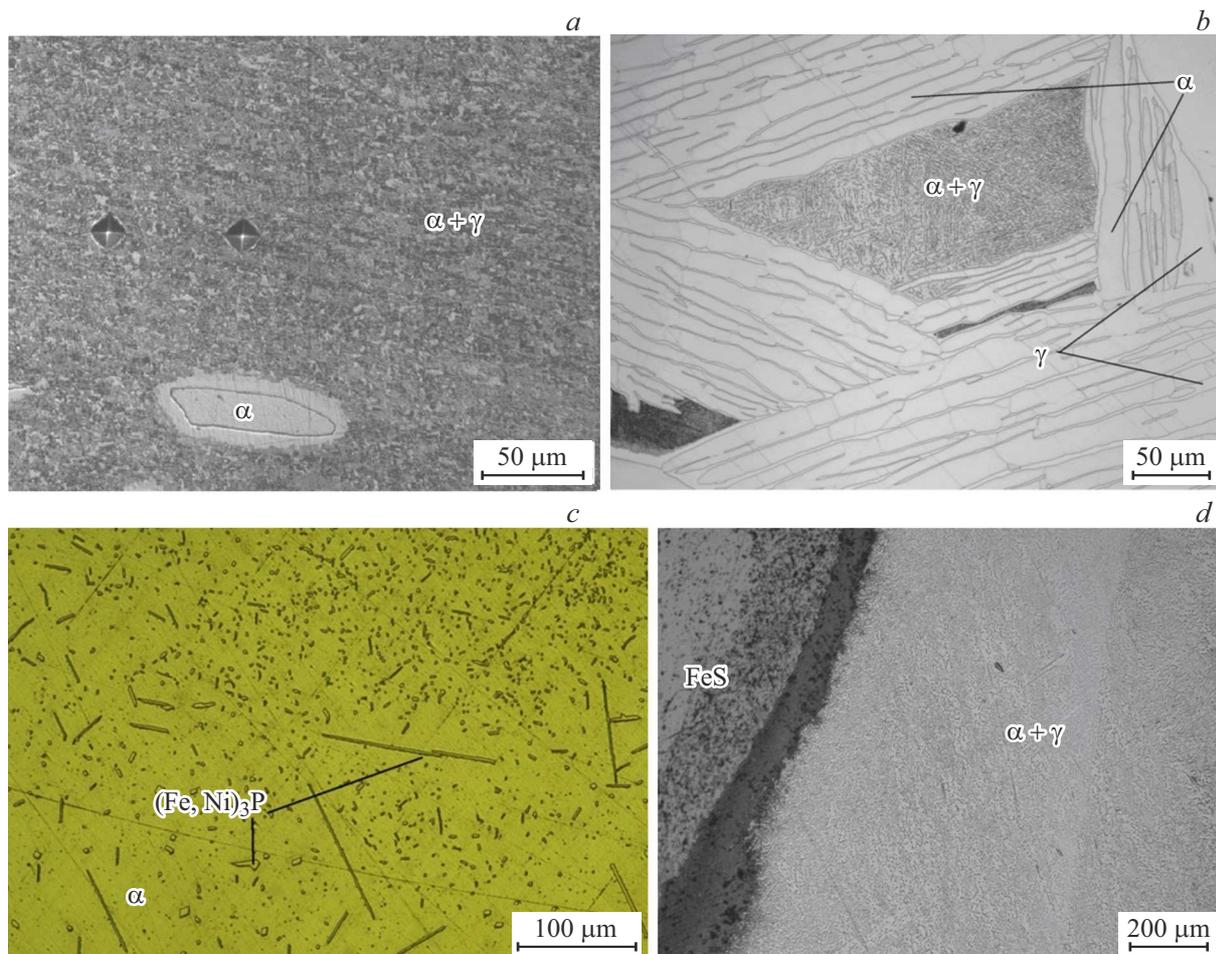


Рис. 1. Структура исходных образцов железных метеоритов: *a* — Чинге [15], *b* — Сеймчан [16], *c* — Сихотэ-Алинь [17,18], *d* — Дронино [19]; α -фазы (камасит) Fe(Ni), γ -фазы (тэнит) Fe(Ni) γ -фаза (Fe,Ni-тетратэнит), $\alpha + \gamma$ (плессит) Fe(Ni); FeS — (троилит); (Fe,Ni)₃P — (рабдит и/или шрейбезит).

после выхода на нее ударной волны. Методом гидростатического взвешивания была измерена плотность ρ_0 всех образцов с помощью аналитических весов ME204T („Mettler Toledo“) в автоматическом режиме, их продольная скорость звука — с помощью прибора для измерения скорости распространения акустических волн (МГНИВП „Акустика“). Так как образцы метеоритов имели толщину около 2 mm, ошибка измерений скорости звука ультразвуковым методом составляла ± 10 m/s.

Механические характеристики метеоритов, измеренные при статических нагрузках, а также их плотность и продольная скорость звука приведены в табл. 1. Статические испытания на растяжения проводились при комнатной температуре на универсальной машине INSTRON 3382 на плоских образцах длиной 75 mm, толщиной 2 mm и шириной 15 mm, вырезанных из метеоритов Чинге и Сеймчан. Испытания на ударную вязкость выполняли на стандартных призматических образцах Менаже, на инструментированном маятниковом копре Tinius Olsen IT542. Микротвердость по Викерсу

измеряли на приборе ПМТ-3М при нагрузке 0.49 N, погрешность определяли по 15 измерениям.

Для сравнения были проведены аналогичные эксперименты на литом железо-никелевом сплаве Н6. Химический состав, структура и свойства сплава после специальных термических обработок близки к характеристикам образцов исследуемых метеоритов. Образцы сплава Н6 для ударно-волновых экспериментов были подготовлены аналогичным образом. Исследованный сплав содержал (wt.%): 0.01 C; 5.8 Ni; 0.2 Si; 0.1 Mn; 0.02 Ti; остальное Fe. Микроструктурное исследование выполняли на микроскопе Neophot-32. Шлифы изготавливали по стандартной методике с последующим травлением 4 vol.% раствором HNO₃ в этиловом спирте.

На рис. 2 представлена ферритная структура сплава Н6, полученная за счет рекристаллизации в α -состоянии при 630°C в течение $21.6 \cdot 10^3$ s (рис. 2, *a*), а также двухфазные ферритно-мартенситные структуры, сформированные в результате медленного ($6.7 \cdot 10^{-3}$ degree/s) и быстрого ($13 \cdot 10^{-2}$ degree/s) нагрева в ($\alpha + \gamma$) область до температуры 735°C, вы-

Таблица 1. Характеристики железных метеоритов

№	Метеорит	Средняя/измеренная плотность, g/cm ³	Ударная вязкость (КСУ), kJ/m ² [20]	Микротвердость HV ₅₀ , МПа	Продольная скорость звука C _l , m/s
1	Чинге	7.9/7.95	1486	2550–2650	5872
2	Сеймчан	7.7/7.85	670	1500–1600	5715
3	Сихотэ-Алинь	7.5/7.58	103	1500–1600	5770
4	Дронино	7.6/7.59	1500	1600–1700	5350

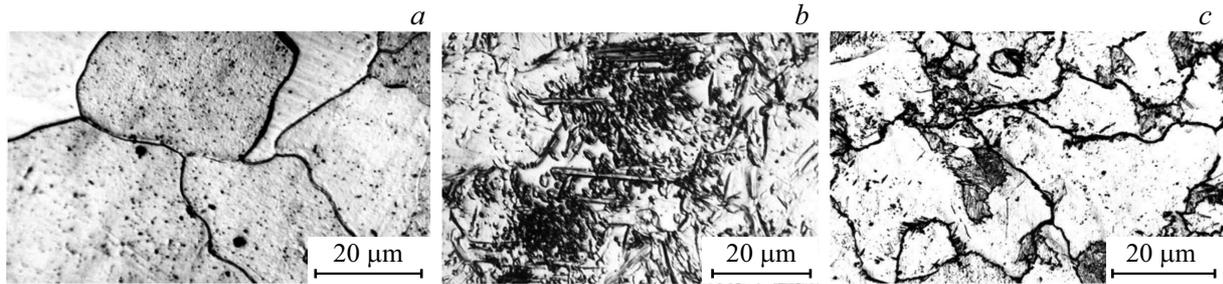


Рис. 2. Микроструктура сплава Н6 в исходном α-состоянии (a) и после нагрева в двухфазную (α → γ) область до 735°С со скоростями: V_Н = 6.7 · 10⁻³ (b) и 13 · 10⁻² deg/s (c).

держки 1.8 · 10³ s и последующей закалки (рис. 2, b, c). Таким образом, изменение скорости нагрева в (α + γ) область на порядок приводит к формированию в сплаве двух морфологических типов феррито-мартенситных структур: пластинчатой или видманштеттовой (рис. 2, b) и глобулярной (рис. 2, c).

Механические свойства исследованного сплава с различными микроструктурами, измеренные при статических нагрузках, представлены в табл. 2 [21]. Как и ожидалось, прочностные свойства и микротвердость сплава с глобулярной феррито-мартенситной структурой в 1.6–1.7 раза выше, а ударная вязкость в 3 раза ниже, чем у сплава с ферритной структурой. Сплав с видманштеттовой феррито-мартенситной структурой также имеет в сравнении со сплавом с ферритной структурой более высокие значения микротвердости и характеристики прочности при сохранении удовлетворительных значений ударной вязкости.

Измеренная плотность образцов сплава Н6 составляет ~ 7.84 g/cm³, продольная C_l и сдвиговая C_s скорости звука соответственно равны 5507 и 3098 m/s. Объемная скорость звука C_b = 4190 m/s, используемая при определении критических разрушающих напряжений, рассчитывалась по формуле

$$C_b = \sqrt{C_l^2 - \frac{4}{3} C_s^2}.$$

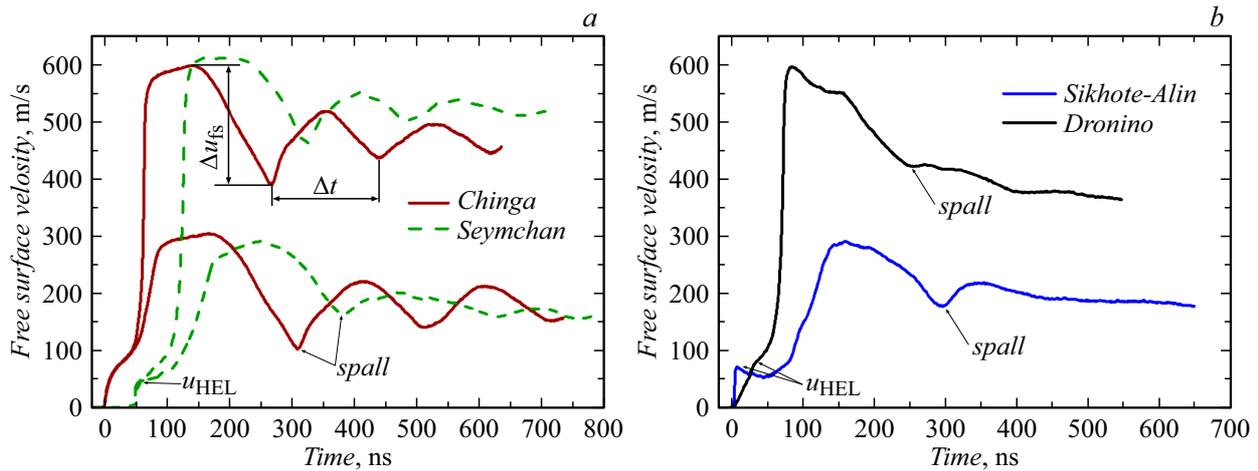
Эксперименты по ударно-волновому нагружению образцов железных метеоритов и железо-никелевого сплава Н6 проводились на пневматической пушке ПП150 калибром 50 mm. Медный ударник толщиной 0.47 mm

разгонялся до скорости 335 ± 10 m/s или 660 ± 10 m/s перед соударением с образцом. Скорость метания определялась давлением рабочего газа, в качестве которого в этих экспериментах использовался сжатый до 80 atm воздух или до 150 atm гелий. Плоские медные ударники располагались на торце пустотелого алюминиевого или магниевого цилиндра длиной 100 mm, который ускорялся в стволе пушки сжатым воздухом или гелием, обеспечивая плоское соударение с расположенным в приемной камере образцом. В каждом опыте проводилось измерение скорости ударника и его перекоса двумя парами электроконтактных датчиков. Все эксперименты проводились при комнатной температуре. Ствол пушки и приемная камера, в которой располагался образец, перед опытом вакуумировались. Во всех экспериментах проводилась регистрация скорости поверхности исследуемых образцов (полные волновые профили u_{fs}(t)) с помощью лазерного доплеровского интерферометрического измерителя скорости VISAR [22], имеющим временное разрешение ~ 1 ns и пространственное разрешение ~ 0.1 mm².

Исследования механических свойств материалов при динамических воздействиях в субмикросекундном диапазоне длительностей воздействия при скоростях деформирования > 10⁴ s⁻¹ проводятся в условиях ударно-волнового нагружения испытываемых образцов. Измерения основываются на том факте, что структура волн и динамика волновых взаимодействий определяются, помимо термодинамического уравнения состояния вещества, процессами упругопластического деформирования и разрушения в материале. Анализ эволюции (формоизменения) ударной волны сжатия при ее прохождении

Таблица 2. Характеристики сплава №6 со структурами, полученными после нагрева с различными скоростями (V_H) в межкритический интервал температур

№ образцов	V_H , degr/s	Типы структур, полученные после закалки из двухфазной ($\alpha + \gamma$) области	Микротвердость, HV, МПа	Ударная вязкость (KCU), kJ/m ²	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа
1	—	исходная ферритная	1620	2500	550	350
2	$6.7 \cdot 10^{-3}$	пластинчатая ферритно-мартенситная	1750	1300	900	550
3	$13 \cdot 10^{-2}$	глобулярная ферритно-мартенситная	2520	800	950	600

**Рис. 3.** Профили скорости свободной поверхности образцов железных метеоритов при различной скорости удара.

дении по образцу дает качественную информацию о характере процессов деформирования и разрушения, а также возможность получить количественные данные о прочностных свойствах материала [23].

2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 3 представлены профили скорости свободной поверхности образцов всех исследованных метеоритов при давлении ударного сжатия ~ 5.5 GPa (скорость соударения 335 ± 10 m/s) и ~ 11 GPa (скорость соударения 660 ± 10 m/s). На профилях регистрируется выход на поверхность упругого предвестника (упругой волны сжатия), пластической ударной волны и следующей за ней части волны разгрузки до момента откольного разрушения. Скорость распространения упругого предвестника в этих экспериментах практически равна измеренной продольной скорости звука c_l , скорость пластической ударной волны определяется объемной сжимаемостью материала и соответственно при умеренных амплитудах волны сжатия должна быть близка к объемной скорости звука C_b [24].

Для образцов метеоритов Сихотэ-Алинь и Дронино не удалось провести эксперименты при разных давлениях ударного сжатия. Вероятно, это связано с наличием в

образцах даже визуально заметных крупных механических дефектов в виде микро- и макронесплошностей. После прохождения ударной волны по образцу и выхода ее на свободную поверхность последняя резко теряла отражающую способность, и регистрация ее скорости лазерным интерферометром была невозможной.

Амплитуда упругого предвестника определяется динамическим пределом упругости материала HEL (Hugoniot Elastic Limit), который рассчитывается по измеренному ее значению u_{HEL} (рис. 3) как

$$\sigma_{HEL} = 0.5 u_{HEL} \rho_0 c_l.$$

Динамический предел упругости при одномерном деформировании связан с пределом текучести материала Y соотношением

$$Y = \frac{3}{2} \sigma_{HEL} (1 - C_b^2/C_l^2).$$

При взаимодействии волны разрежения, приходящей от тыльной стороны ударника, с волной разрежения, отраженной от свободной поверхности образца, внутри него генерируются растягивающие напряжения, и в случае, когда они превосходят критическую для данного материала величину, в образце инициируется разрушение — откол. При этом происходит релаксация растягивающих напряжений и формируется волна сжатия (откольный импульс), выход которой на поверхность

образца обычно вызывает второй подъем ее скорости — волну сжатия, так называемый „откольный импульс“. Декремент скорости поверхности Δu_{fs} (рис. 3) при ее спаде от максимума до значения перед фронтом откольного импульса пропорционален величине разрушающего напряжения — откольной прочности материала в данных условиях нагружения. В акустическом приближении откольная прочность материала рассчитывается с использованием соотношения

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{2} \rho_0 C_b (\Delta u_{fs} + \delta),$$

где δ — поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скоростей фронта откольного импульса и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним [23,25].

По времени одной осцилляции откольного импульса Δt в откольной пластине можно определить ее толщину как $h_{sp} = C_l \Delta t / 2$.

Максимальная амплитуда пластической волны сжатия определяется как $P_{max} = \rho_0 U_s u_{fs}$, где ρ_0 — плотность образцов, U_s — скорость ударной волны, u_{fs} — массовая скорость, определяемая из профилей скорости. При обработке экспериментальных данных использовалась ударная адиабата в виде $U_s = C_0 + s u_p$ [km/s], где U_s — скорость ударной волны, u_p — массовая скорость за фронтом ударной волны, C_0 принимает значение объемной скорости звука C_b , s — наклон ударной адиабаты. Коэффициент s для метеоритных образцов и близкому к ним по составу железо-никелевому сплаву Н6 принимался равным 1.14 [26–28].

Под скоростью деформирования здесь подразумевается расширение вещества в волне разрежения перед отколом, которая определяется как

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = -\frac{\dot{u}_{fsr}}{2C_b},$$

где \dot{u}_{fsr} — измеренная скорость спада скорости свободной поверхности испытываемого образца в разгрузочной части импульса ударного сжатия, V_0 — удельный объем, \dot{V} — градиент скорости в разгрузочной части импульса сжатия.

Из сравнения волновых профилей, полученных для метеоритных образцов, видно, что эволюция ударных волн для образцов метеоритов Чинге и Сеймчан типична для металлов и сплавов. Уруго-пластический переход протекает плавно с упрочнением материала, а процесс откольного разрушения характерен для металлических материалов [22,25]. Профили, полученные для образцов метеоритов Дронино и Сихотэ-Алинь, несколько отличаются от предыдущих. Для образца метеорита Сихотэ-Алинь уругий предвестник представляет собой так называемый „зуб текучести“ с быстрой релаксацией напряжения за уругой волной сжатия, что связано с быстрым размножением дислокаций в уругой волне. После формирования откольного импульса осцилляции

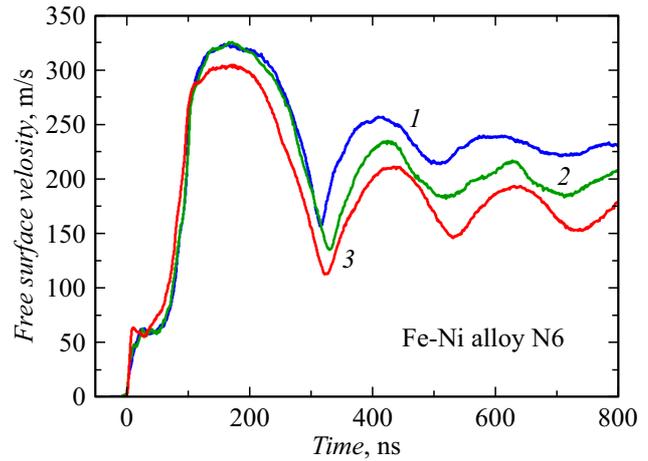


Рис. 4. Профили скорости свободной поверхности образцов железо-никелевого сплава Н6 в разных структурных состояниях.

скорости свободной поверхности не регистрируются, а наблюдается ее быстрое затухание вследствие более медленного процесса разрушения и формирования сильно развитой поверхности откола.

Измерения динамического уругого предвестника показали, что его максимальное значение ~ 1.6 ГПа демонстрирует образец метеорита Сихотэ-Алинь, несколько более низкие значения HEL (~ 1.5 ГПа) получены на образце метеорита Дронино. Минимальные значения динамического предела уругости ~ 0.9 ГПа измерены на образцах метеорита Чинге. Точные значения динамического предела уругости для всех железных метеоритов представлены в табл. 3.

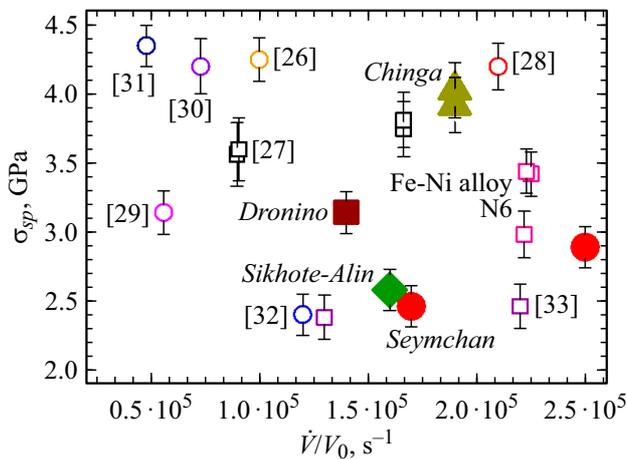
На рис. 4 представлены профили скорости свободной поверхности образцов сплава Н6 с исходной ферритной структурой (профиль 1) и с двумя морфологическими типами феррито-мартенситных структур: видманштеттовой (профиль 2) и глобулярной (профиль 3). Видно, что измеренные волновые профили отражают все описанные выше особенности высокоскоростного деформирования и разрушения подобных сплавов в условиях откола. То есть изменение микроструктуры сплава при термообработках практически не повлияло на эволюцию ударной волны при ее прохождении по образцу и не изменила динамический предел уругости и динамический предел текучести этого сплава. Откольная прочность сплава с двухфазной ферритно-мартенситной структурой различной морфологии (рис. 2, b, c) увеличилась примерно на 13% по сравнению с откольной прочностью сплава с исходной ферритной структурой (рис. 2, a).

Результаты обработки волновых профилей, полученных на образцах метеоритов, представлены на рис. 5 в виде зависимостей откольной прочности исследуемых образцов от скорости деформирования перед отколом и в табл. 3.

На рис. 5 показаны результаты измерений откольной прочности исследованных образцов метеоритов и желе-

Таблица 3. Условия экспериментов и результаты измерений динамического предела упругости и откольной прочности образцов метеоритов и сплава Н6

Метеорит, сплав	P_{max} , GPa	v_{HEL} , m/s	σ_{HEL} , GPa	Y , GPa	Δu_{fs} , m/s	σ_{sp} , GPa	Ск. деф, $\times 10^5 \text{ s}^{-1}$	Δt , ns	h_{sp} , mm
Чинге	5.51	52	1.21	0.79	201	3.92	1.9	205	0.59
	11.30	54	1.26	0.83	207	4.03	1.9	176	0.50
Сеймчан	5.22	41	0.92	0.56	128	2.46	1.7	190	0.53
	11.40	39	0.87	0.53	151	2.89	2.5	173	0.48
Сихотэ-Алинь	5.24	74	1.62	1.02	139	2.58	1.6	165	0.47
Дронино	11.30	73	1.48	0.72	175	3.14	1.4	160	0.42
Н6 (1)	5.55	63	1.36	0.86	164	2.98	2.2	200	0.53
Н6 (2)	5.60	61	1.32	0.83	189	3.42	2.3	193	0.52
Н6 (3)	5.20	64	1.38	0.87	190	3.44	2.2	205	0.55

**Рис. 5.** Откольная прочность метеоритов и конструкционных сталей при близких условиях ударно-волнового нагружения. [26] — сталь 45; [27] — сталь 15Х2НМФА; [28] — сталь 09Г2Са-А; [29] — высоколегированная TRIP сталь; [30] — сталь 40Х; [31] — сталь 35ХЗНМ; [32] — чистое железо; [33] — нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

зоникелевого сплава Н6, а также для сравнения полученные ранее данные по откольной прочности различных конструкционных сталей и чистого железа [26–33]. Как видно из рисунка, все образцы метеоритного железа демонстрируют близкую к представленным сталям откольную прочность при аналогичных условиях нагружения.

Сравнительный анализ полученных данных по откольной прочности показал, что разрушение вещества метеоритов происходит в довольно широком диапазоне критических разрушающих нагружений от ~ 4 до ~ 2.5 GPa, что связано как с их исходной структурой, так и с количеством наведенных дефектов внутри образца. Однако их прочность, как видно из рис. 5, b, остается близкой к прочности конструкционных сталей различного назначе-

ния, лишь незначительно уступая самым высокопрочным из них.

Заключение

Таким образом, впервые проведены измерения откольной прочности и параметров упруго-пластического перехода образцов метеоритов, известных как Чинге, Сеймчан, Сихотэ-Алинь и Дронино, найденных в разных районах на территории России в XX веке. Измерения выполнены при ударном нагружении интенсивностью ~ 5.5 и ~ 11 GPa и средней скорости деформирования материала перед откольным разрушением 10^5 s^{-1} . Образцы всех исследованных железных метеоритов демонстрируют характерное для большинства конструкционных сплавов и сталей упругопластическое поведение при высокоскоростном деформировании при ударном сжатии. Максимальное значение динамического предела упругости ~ 1.6 GPa измерено на образце метеорита Сихотэ-Алинь, его минимальное значение ~ 0.9 GPa демонстрируют образцы метеорита Сеймчан. Путем сравнительного анализа показано, что откольная прочность всех исследованных метеоритов при данных условиях нагружения близка к прочности железо-никелевого сплава Н6, имеющего близкий элементный химический состав, и сталей и сплавов различного назначения, включая чистое железо. Результаты сделанных в работе измерений косвенно подтверждают полученные ранее данные и выводы, что метеоритное вещество сохраняет практически неизменными свои прочностные свойства в объеме оставшихся целыми фрагментов после прохождения земной атмосферы и соударения с ее поверхностью. Полученные экспериментальные данные о характере откольного разрушения и оценка влияния дефектности структуры железо-никелевых сплавов внеземного происхождения на их сопротивление деформированию и разрушению при субмикросекундных

длительностях нагрузки позволит расширить существующие представления об их прочностных свойствах при сильных динамических воздействиях и стать надежной основой для адекватных модельных расчетов реакции реальных космических тел, представляющих серьезную опасность при их возможном соударении с Землей, при реализации предлагаемых взрывных методов защиты.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзадания по программе „Комплексное исследование физико-химических свойств и процессов в веществе в условиях высокоэнергетических воздействий“, № темы FFSG-2024-0001, регистрационный номер 124020600049-8. Ударно-волновые эксперименты проведены с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования Российской академии наук. Исследование частично выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой „Приоритет-2030“ и по проекту № FEUZ-2023-0014.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.В. Рыхлова, Б.М. Шустов. В сб.: *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра*, под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой (Физматлит, М., 2010), с. 384.
- [2] А.В. Волков, В.А. Острейковский. *Вестник кибернетики*, **4** (36), 17 (2019).
- [3] Б.М. Шустов. В сб.: *Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия*, под ред. В.А. Пучкова (ВНИИ ГОЧС (ФЦ), М., 2015), с. 272.
- [4] C.D. Hall, I.M. Ross. *Adv. Astronautical Sci., Astrodynamics*, **97** (1), 613 (1997).
- [5] Б.М. Шустов. *УФН*, **181**, 1104 (2011). [B.M. Shustov. *Phys. Uspekhi*, **54** (10), 1068 (2011). DOI: 10.3367/UFNe.0181.201110e.1104]
- [6] Д.В. Петров. В сб.: *Астероидная опасность с точки зрения физиков-оружейников*, под ред. Д.В. Петрова, О.Н. Шубина, В.Н. Ногина, В.А. Симоненко (Изд-во РФЯЦ — ВНИИТФ, Снежинск, 2023), с. 488.
- [7] В.С. Сазонов, М.В. Яковлев. *Астрономический вестник*, **40** (1), 77 (2006). [V.S. Sazonov, M.V. Yakovlev. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, **79**, 476 (2006). DOI: 10.1007/s10891-006-0124-z]
- [8] В.С. Сазонов. *Космонавтика и ракетостроение*, **2** (51), 68 (2008).
- [9] J.J. Petrovic. *J. Mater. Sci.*, **36**, 1579 (2001). DOI: 10.1023/A:1017546429094
- [10] A. Schmalen, R. Luther, N. Artemieva. *Meteorit. Planet. Sci.*, **57** (8), 1496 (2022). DOI: 10.1111/maps.13832
- [11] V.F. Buchwald. *Handbook of Iron Meteorites* (Berkeley University of California Press, 1975)
- [12] H.J. Axon, E. Smith, F. Knowles. *Meteoritics*, **17** (2), 49 (1982).
- [13] V.I. Grokhovsky, M.I. Oshtrakh, K.A. Uymina, M.V. Goryunov, V.A. Semionkin. *Meteorit. Planet. Sci.*, **46** (S1), 5308 (2011).
- [14] В.В. Адушкина. *Катастрофические воздействия космических тел* (ИКЦ Академкнига, М., 2005)
- [15] К.А. Скрипко. *Жизнь Земли*, **39** (2), 201 (2017).
- [16] D. Neikerk, R.C. Greenwood. *Meteorit. Planet. Sci.*, **42** (SI), A154 (2007).
- [17] Л.Г. Кваша. *Метеоритика*, **34**, 15 (1975).
- [18] М.И. Дьяконова. *Метеоритика*, **16**, 42 (1958).
- [19] V.I. Grokhovsky, V.F. Ustyugov, D.D. Badyukov, M.A. Nazarov. In: 36th LPSC, abstract 1692 (2005).
- [20] А.А. Пятков, В.И. Гроховский, С.В. Гладковский. В сб. *Минералы: строение, свойства, методы исследования*, под ред. С.М. Лебедевой, Л.М. Осиповой, М.А. Крыловой. (ИМин УрО РАН, Миасс, 2011), с. 253–255.
- [21] И.В. Хомская. *Физика металлов и материаловедение*, **110** (2), 197 (2010). [I.V. Khomskaia *Phys. Met. Metallogr.*, **110**, 197 (2010).]
- [22] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, **43**, 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986
- [23] M.A. Meyers, C.T. Aimeone. *Progr. Mater. Sci.*, **28**, 1 (1983).
- [24] Г.И. Канель. *Ударные волны в физике твердого тела* (Физматлит, М., 2018) [G.I. Kanel. *Shock Waves in Solid State Physics* (CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, NY., 2019)]
- [25] G.I. Kanel. *Int. J. Fracture*, **163**, 173 (2010). DOI: 10.1007/s10704-009-9438-0
- [26] С.В. Разоренов, Г.И. Канель, В.Г. Ануфриев, В.Ф. Лоскутов. *Проблемы прочности*, **3**, 42 (1992). [S.V. Razorenov, G.I. Kanel, V.G. Anufriev, V.F. Loskutov. *Strength Mater.*, **24**, 270 (1992). DOI: 10.1007/BF00778389]
- [27] Г.И. Канель, Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, С.В. Разоренов, С.А. Атрошенко. *ЖТФ*, **90** (3), 441 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.03.48929.295-19 [G.I. Kanel, G.V. Garkushin, A.S. Savinykh, S.V. Razorenov, S.A. Atroshenko. *Tech. Phys.*, **65** (3), 420 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220030111]
- [28] Г.И. Канель, Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, С.В. Разоренов, С.А. Атрошенко. *ЖТФ*, **91** (11), 1698 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51531.116-21 [G.I. Kanel, G.V. Garkushin, A.S. Savinykh, S.V. Razorenov, S.A. Atroshenko. *Tech. Phys.*, **67** (14), 2221 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.14.55222.116-21]
- [29] А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов, S. Wolf, L. Krüger. *Физика горения и взрыва*, **51** (1), 143 (2015). [A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov, S. Wolf, L. Krüger. *Combustion and Explosion and Shock Waves*, **51** (1), 124 (2015). DOI: 10.1134/S001050821501013X]
- [30] С.В. Разоренов, А.А. Богач, Г.И. Канель. *Физика металлов и материаловедение*, **83** (1), 147 (1997). [S.V. Razorenov, A.A. Bogach, G.I. Kanel. *Phys. Metals Metallography*, **83** (1), 100 (1997).]
- [31] В.Д. Глузман, Г.И. Канель, В.Ф. Лоскутов, В.Е. Фортов, И.Е. Хорев. *Проблемы прочности*, **17** (8), 1093 (1985). [V.D. Gluzman, G.I. Kanel, V.F. Loskutov, V.E. Fortov, I.E. Khorev. *Strength Mater.*, **17** (8), 1093 (1985). DOI: 10.1007/bf01533790]
- [32] E.V. Zaretsky, G.I. Kanel. *J. Appl. Phys.*, **117**, 195901 (2015). DOI: 10.1063/1.4921356
- [33] Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.С. Савиных. *Механика твердого тела*, **52** (4), 69 (2017). [G.V. Garkushin, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.S. Savinykh. *Mechan. Solids*, **52** (4), 407 (2017). DOI: 10.3103/S0025654417040070]