

Received: 31.10.2023

Revised: 25.12.2023

Accepted: 29.12.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.145-158

BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF THE Fe–17%Ni ALLOY OF EXTRATERRESTRIAL ORIGIN (THE CHINGA METEORITE) UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING

V. I. Grokhovsky^{1, a)}, S. V. Gladkovsky^{2, b)}, K. A. Badekha^{1, 3, c)}, and V. E. Veselova^{2, d), *}

¹Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia

²Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia

³Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119991, Russia

a)  <https://orcid.org/0000-0001-5504-1019>  grokh47@mail.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0002-3542-6242>  gsv@imach.uran.ru;

c)  <https://orcid.org/0000-0002-6993-6988>  ksenia_uimina@mail.ru;

d)  <https://orcid.org/0000-0002-4955-6435>  veselova@imach.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: veselova@imach.uran.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (343) 374-1853; fax: (343) 347-5330

The values of conditional yield strength, impact strength, and the parameters of static and dynamic crack resistance of the Chinga meteorite substance (the Fe–17%Ni alloy) are determined by mechanical testing for uniaxial tension and static bending and instrumented impact testing of V-notched prismatic samples at temperatures ranging between 20 and –196 °C. It is shown that the dynamic nature of material loading according to the three-point bending scheme contributes to a noticeable decrease in impact strength (KCV) and crack propagation energy (KCT) during low-temperature tests (–196 °C) and the appearance of brittle quasi-cleavage sites on the fracture surface. On the contrary, as the test temperatures decrease from room temperature to the temperature of liquid nitrogen during the static tests of the Chinga meteorite samples with induced cracks, the parameter of static crack resistance K_C (K_{1C}) increases and the fracture surface of the samples after low-temperature testing is characterized by predominantly viscous dimpled topography.

Keywords: meteoritic material, low-temperature tests, impact strength, crack initiation and propagation energy, static and dynamic crack resistance, fracture surface, dimpled and quasi-cleavage topography

Acknowledgment

We appreciate the assistance of Dr. Vichuzhanin and Dr. Kamantsev, senior researchers at the IES UB RAS, in performing tensile and static crack resistance tests. The work was performed under the agreement with the Russian Ministry of Science and Higher Education, theme FEUZ-2023-0014, No. 075-03-2023-006, and under a state assignment from the MSHE, No. AAAA-A18-118020790147-4. The equipment of the Plastometriya shared research facilities, IES UB RAS, was used for the research. We also appreciate the support from the Russian Ministry of Science and Higher Education under the Program for the Development of UrFU according to the Priority 2030 program.

References

1. Nemchinov, I.V., Svetsov, V.V., and Shuvalov, V.V. *Katastroficheskie vozdeystviya kosmicheskikh tel* [Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies]. IKTs “Akademkniga” Publ., Moscow, 2005, 310 p. (In Russian).
2. Petrovic, J.J. Review Mechanical properties of meteorites and their constituents. *Journal of Material Science*, 2001, 36, 1579–1583. DOI: 10.1023/A:1017546429094.
3. Slyuta, E.N. Physical and mechanical properties of stony meteorites. *Solar System Research*, 2017, 51, 64–85. DOI: 10.1134/S0038094617010051.
4. Remo, J.L. and Johnson, A.A. A preliminary study of the ductile-brittle transition under impact conditions in material from an octahedrite. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80 (26), 3744–3748.
5. Johnson, A.A., Remo, J.L., and Davis, R.B. The Low temperature impact properties of the meteorite Hoba. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84 (B4), 1683–1688. DOI: 10.1029/JB084iB04p01683.
6. Grokhovsky, V.I. and Gladkovsky, S.V. The impact mechanical tests of meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 2010, 45, A69–A69.
7. Grokhovsky, V.I. and Gladkovsky, S.V. The impact mechanical tests of Seymchan and Chinga meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 2018, 53, 6276–6276.
8. Botvina, L.R. *Razrushenie: kinetika, mekhanizmy, obshchie zakonomernosti* [Destruction: Kinetics, Mechanisms, General Patterns]. Nauka Publ., Moscow, 2008, 334 p. (In Russian).
9. Pestrikov, V.M. and Morozov, E.M. *Mekhanika razrusheniya* [Fracture Mechanics: Course of Lectures]. Professiya Publ., SPb., 2012, 550 p. (In Russian).
10. Gladkovsky, S.V. Instrumented Impact Tests in Material Science, Ch. 6. In: *Perspektivnye materialy: uchebnoe posobie* [Perspective Materials: Textbook, ed. by D.L. Merson]. Izd-vo TGU Publ., Tolyatti, 2021, 336 p. (In Russian).
11. Grokhovsky, V.I. and Gladkovsky, S.V. Brittle fracture resistance of Chinga and Seymchan meteorites under static and impact loading. *Meteoritics and Planetary Science*, 2019, 54, 6429.
12. Buchner, E., Schmieder, M., Kurat, G., Brandstätter, F., Kramar, U., Ntaflou, T., and Kröcher, J. Buddha from space – an ancient object of art made of a Chinga iron meteorite fragment. *Meteoritics and Planetary Science*, 2012, 47 (9), 1491–1501. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2012.01409.x.
13. GOST 9454–78. (In Russian).
14. GOST 25.506-85. (In Russian).
15. RD 50-344-82. (In Russian).
16. GOST 22848-77. (In Russian).
17. Botvina, L.R. *Osnovy fraktodiagnostiki* [Fundamentals of Fractodiagnosics]. Tekhnosfera Publ., Moscow, 2022, 394 p.
18. Lebedev, D.V. *Konstruktivnaya prochnost kriogennykh staley* [Structural Strength of Cryogenic Steels]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1971, 264 p.
19. Brown, W., Srawley, J. Ispytaniya vysokoprochnykh metallicheskih materialov na vyazkost razrusheniya pri ploskoy deformatsii [Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials]. Mir Publ., Moscow, 1972, 245 p.
20. *Mekhanicheskie svoystva konstrukcionnykh materialov pri nizkikh temperaturakh: sb. nauch. trudov* [Mechanical Properties of Structural Materials at Low Temperatures, ed by I.N. Fridlaynder]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1983, 432 p.
21. Brusnitsyna, E.V., Badekha, K.A., Grokhovsky, V.I., Muftakhetdinova, R.F. Martensite morphology in different types of meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*, 2018, 53, 6290–6290.

Подана в журнал: 31.10.2023
УДК 523.681.5, 620.178.746.22, 620.172.2, 620.178.3, 620.186
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.145-158

СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СПЛАВА Fe–17%Ni ВНЕЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ (МЕТЕОРИТ ЧИНГЕ) ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В. И. Гроховский^{1, а)}, С. В. Гладковский^{2, б)}, К. А. Бадеха^{1, 3, в)}, В. Е. Веселова^{2, г)}, *

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции
Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук,
ул. Косыгина, 19, г. Москва, 119991, Россия

а)  <https://orcid.org/0000-0001-5504-1019>  grokh47@mail.ru;

б)  <https://orcid.org/0000-0002-3542-6242>  gsv@imach.uran.ru;

в)  <https://orcid.org/0000-0002-6993-6988>  ksenia_uimina@mail.ru;

г)  <https://orcid.org/0000-0002-4955-6435>  veselova@imach.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: veselova@imach.uran.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: (343) 374–18–53; факс: (343) 347-53-30

Методами механических испытаний на одноосное растяжение и статический изгиб и инструментированных ударных испытаний призматических образцов с V-образным надрезом в интервале температур 20...–196 °С определены значения условного предела текучести, ударной вязкости и параметров статической и динамической трещиностойкости вещества метеорита Чинге (сплава Fe–17%Ni). Показано, что динамический характер нагружения материала по схеме трехточечного изгиба способствует заметному снижению ударной вязкости (KCV) и работы распространения трещины (KCT) при низкотемпературных испытаниях (–196 °С) и появлению в изломе хрупких участков квазискольного разрушения. Напротив, при статических испытаниях образцов метеорита Чинге с наведенными трещинами показатель статической трещиностойкости K_C (K_{IC}) повышается с понижением температур испытаний от комнатной до температуры жидкого азота, а излом образцов после низкотемпературных испытаний характеризуется преимущественно вязким ямочным рельефом.

Ключевые слова: метеорит, низкотемпературные испытания, ударная вязкость, работа зарождения и распространения трещины, статическая и динамическая трещиностойкость, поверхность разрушения, ямочный и квазискольный рельеф

1. Введение

Проблема исследования структуры и свойств материалов внеземного происхождения (метеориты и астероиды) в последнее время принимает особое значение в связи с осознанием кометно-астероидной опасности для Земли и изысканием возможностей ее предотвращения. Известно, что характер разрушения при соударении тел в космическом пространстве, метеорных тел в земной атмосфере или при ударе о поверхность Земли определяется, прежде всего, его прочностными характеристиками [1]. Однако к настоящему моменту данные о механических свойствах железных метеоритов весьма ограничены [2, 3]. Ударные испытания

вещества железного метеорита Henbury ПАВ [4] при комнатной и пониженной температурах ($T = 300$ К и $T = 195$ К) позволили определить значения ударной вязкости на образцах с U-образным надрезом ($KCU_{300K} = 339$ кДж/м² и $KCU_{195K} = 84,8$ кДж/м²) и приблизительно оценить температуру хрупко-вязкого перехода, соответствующую $T_{50} = 200$ К. Метеорит Henbury при $T = 195$ К продемонстрировал полностью хрупкое разрушение. Испытания двух образцов вещества железного атаксита Ноба IVB [5] показали, что $T_{50} = 150$ К, что существенно ниже, чем у железного метеорита Henbury. При температуре $T = 195$ К образец атаксита Ноба показал абсолютно вязкий характер разрушения, и значение ударной вязкости составило $KCV = 864,5$ кДж/м², а второй образец атаксита Ноба при температуре $T = 77$ К разрушился абсолютно хрупко с пониженным уровнем ударной вязкости $KCV = 88,1$ кДж/м². Сравнительная оценка ударной вязкости метеоритного материала на примере метеоритов Сихотэ-Алинь ПАВ, Дронино ung, Чинге IVB, Царев L5 и Сеймчан PMG проведена нами ранее в работах [6, 7].

Вместе с тем известно, что наиболее полная информация о сопротивлении металлических материалов разрушению при статическом и динамическом нагружении может быть получена по результатам испытаний образцов с предельно острыми концентраторами напряжений в виде наведенных усталостных трещин методами экспериментальной механики разрушения [8, 9]. Благодаря таким испытаниям даже на малоразмерных образцах метеоритного вещества при выполнении условий плоской деформации можно сформировать представление о характере поведения при ударах и разрушении более крупных космических тел, представляющих локальную, региональную или глобальную опасность для Земли. Новые возможности оценки сопротивления вещества метеоритов открывают инструментированные ударные испытания с использованием копров маятникового и ротационного типа, а также копров вертикального удара [10]. Важно, чтобы технические возможности этих копров обеспечивали запись и обработку данных динамического нагружения и построение качественных диаграмм ударных испытаний в координатах « $P - t$ » («нагрузка (усилие) – время») или « $P - f$ » («нагрузка (усилие) – прогиб (перемещение)»). Однако, в отличие от характеристик ударной вязкости, показатели трещиностойкости (вязкости разрушения) метеоритного материала при статическом и динамическом нагружении, за исключением отдельных работ [11], подробно не изучены. В связи с этим задачей настоящего исследования являлось на примере вещества метеорита Чинге (сплава Fe–17%Ni) провести в температурном диапазоне 20...–196 °С сравнительную оценку характеристик ударной вязкости и полученных различными методами показателей статической и динамической трещиностойкости, а также определить механизмы разрушения сплава внеземного происхождения.

2. Материал и методика

Для проведения испытаний были использованы образцы, изготовленные из метеорита Чинге, который является железным атакситом IVB. Атаксит Чинге впервые был обнаружен в 1912 г. на территории Республики Тыва, хотя скульптура Будды, изготовленная из вещества этого метеорита, известна с древних времен [12]. Исследуемый материал является сплавом на основе железа с 17,0 вес. % Ni. Основная часть шлифов метеорита Чинге при исследовании с помощью оптического микроскопа Zeiss Axiovert 40 MAT демонстрирует практически неразличимую однородную микроструктуру, образованную субмикроскопической смесью фаз α -Fe(Ni) и γ -Fe(Ni). Очень редко встречаются зародыши видманштеттовой α -Fe(Ni) фазы с каймой γ -Fe(Ni) фазы (рис. 1). В массивных фрагментах метеорита Чинге могут быть включения добреелита $FeCr_2S_4$, шрейберзита $(Fe,Ni)_3P$ и троилита FeS.

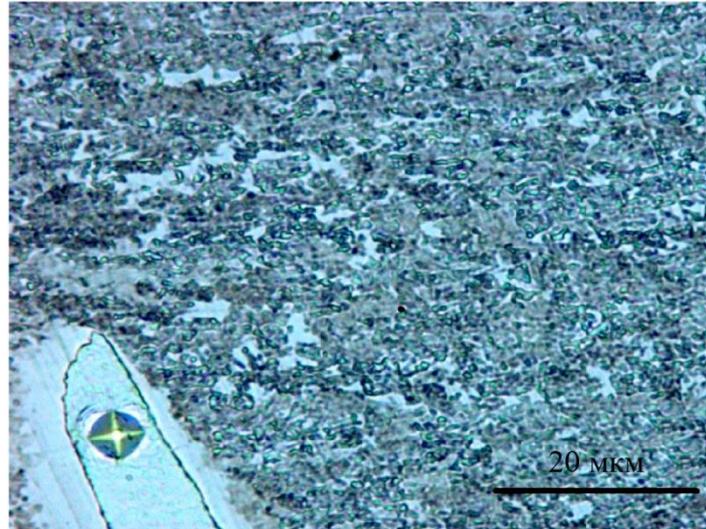


Рис. 1. Оптическое изображение микроструктуры метеорита Чинге: матрица – смесь субмикроскопических фаз α -Fe(Ni) и γ -Fe(Ni); зародыш α -Fe(Ni) с отпечатком пирамиды от измерения микротвердости

Индивидуальный фрагмент метеорита Чинге (рис. 2) был дисковой фрезой разрезан на пластины, из которых были изготовлены образцы размером $10 \times 10 \times 55$ мм для проведения испытаний на ударную вязкость, статическую и динамическую трещиностойкость, а также образцы для испытаний на одноосное растяжение с диаметром рабочей части 5 мм. Для испытаний на ударную вязкость по ГОСТ 9454-78 [13], а также на статическую и динамическую трещиностойкость по ГОСТ 25.506-85 [14] и РД 50-344-82 [15] соответственно использовались стандартные призматические образцы толщиной 10 мм с концентраторами напряжений двух типов: с нанесенным на электроэрозионном станке V-образным надрезом глубиной 2 мм с радиусом в вершине 0,25 мм (тип 11 по ГОСТ 9454-78) и с дополнительно наведенной из вершины надреза при циклическом изгибе усталостной трещиной длиной ≈ 3 мм. Испытания на растяжение, создание усталостных трещин и испытания на статическую трещиностойкость осуществлялись с использованием сервогидравлической испытательной машины Instron-8801. Динамические испытания на ударный изгиб образцов с V-образным надрезом и усталостной трещиной проводились в интервале температур $20 \dots -196$ °C на инструментированном маятниковом копре Tinius Olsen IT542 с записью диаграммы ударного нагружения в координатах «Усилие – перемещение».



Рис. 2. Индивидуальный фрагмент метеорита Чинге, разрезанный на пластины

Охлаждение и выдержка образцов при заданной температуре (15 минут) осуществлялась в специальной криокамере в жидком азоте или в смеси жидкого азота и бензина Калоша. Разделение общей работы разрушения (A) при ударных испытаниях на составляющие ударной вязкости (работу зарождения A_3 и работу распространения трещины A_p) было выполнено на основе изучения экспериментальных диаграмм ударного нагружения в соответствии с рекомендациями ГОСТ 22848-77 [16] (рис. 3).

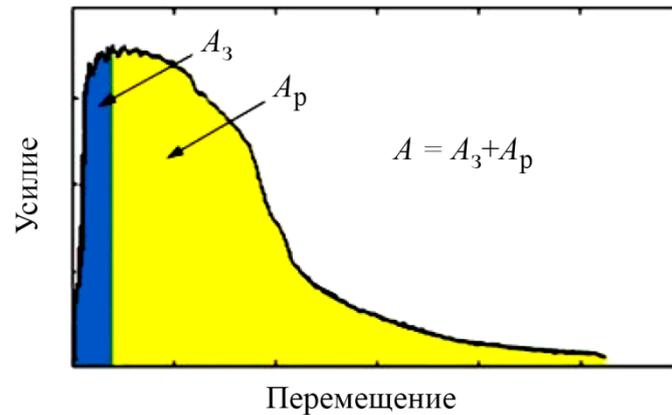


Рис. 3. Схема разделения общей энергии разрушения на составляющие

Показатель динамической трещиностойкости (J_{id}) рассчитывался в соответствии с методикой, описанной в работе [17], на основании результатов испытаний ударных образцов с V-образным надрезом:

$$J_{id} = \frac{2A_3}{B \times (W - a)}, \quad (1)$$

где A_3 – работа зарождения трещины; B – ширина образца; W – высота образца; a – длина концентратора напряжений (надреза или усталостной трещины).

Значения условного предела текучести, показателей статической и динамической трещиностойкости усреднялись по результатам испытаний не менее 2 образцов. Разброс экспериментальных данных не превышал $\pm 2,5\%$.

Фрактографический анализ поверхности разрушения образцов метеоритного материала после статических и динамических испытаний на трещиностойкость и ударную вязкость был выполнен на растровом электронном микроскопе Tescan Vega II XMU.

3. Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 4 $a-d$, нагрузка (усилие) на диаграммах ударного нагружения после достижения максимума вплоть до температур испытаний $-40\text{ }^\circ\text{C}$ меняется плавно, что указывает на вязкий характер распространения трещины из вершины надреза. При дальнейшем понижении температуры испытаний до $-80\text{ }^\circ\text{C}$ и далее до $-196\text{ }^\circ\text{C}$ на диаграммах наблюдается резкое падение нагрузки («хрупкий скачок трещины»). Кроме того, с понижением температуры испытаний до $-80\text{ }^\circ\text{C}$ и ниже существенно снижается величина достигнутого к моменту разрушения перемещения ударного ножа при соприкосновении с образцом.

Температурные зависимости общей работы разрушения (A), работы на зарождение трещины (A_3) и ударной вязкости KCV, приведенные на рис. 5, 6, указывают на монотонный характер снижения указанных характеристик с понижением температуры испытаний без выраженного порога хладноломкости.

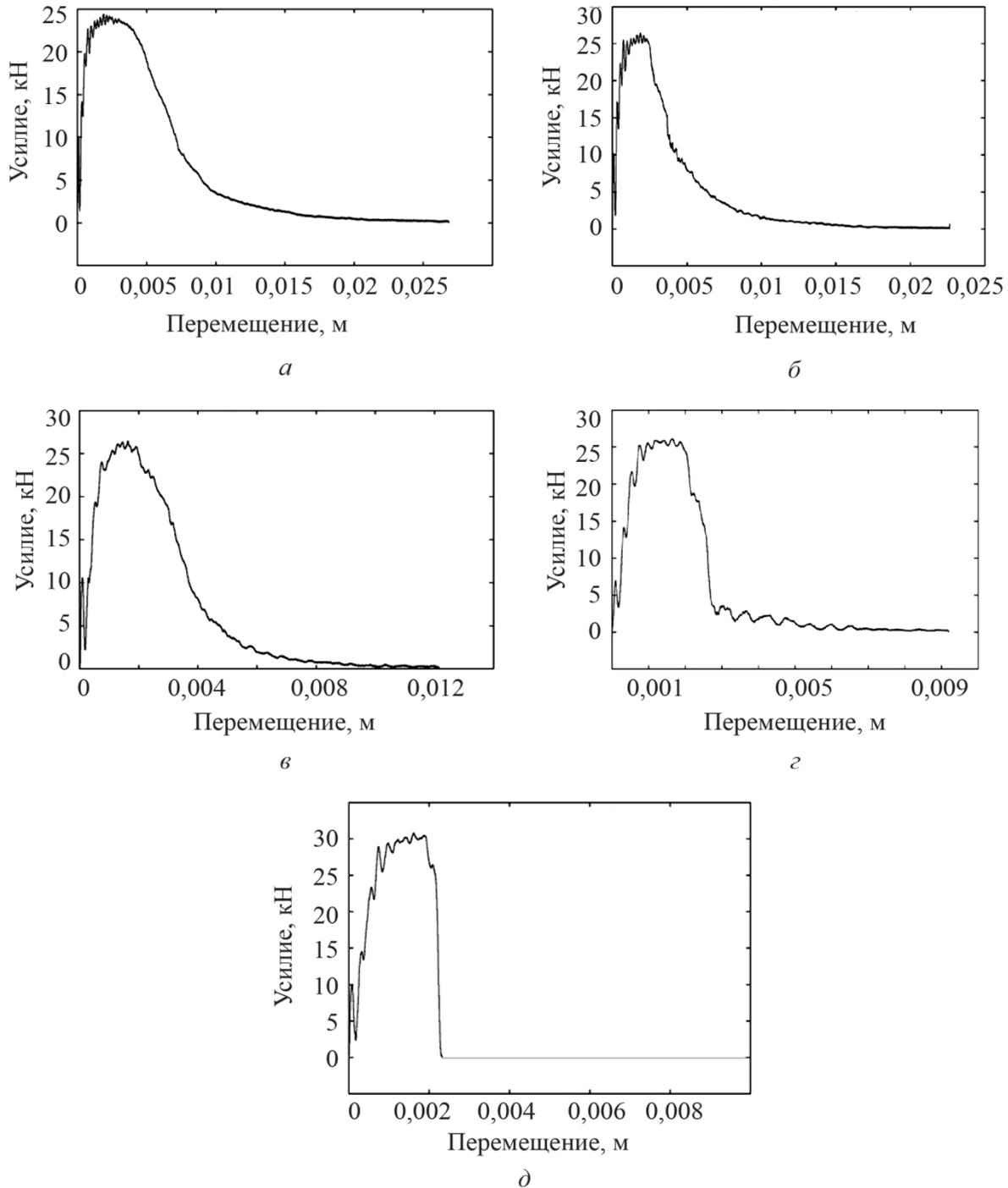


Рис. 4. Диаграммы ударного нагружения образцов метеоритного материала:
 $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а); $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б); $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в); $T = -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (г); $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (д)

Следует отметить, что значения A , A_3 и KCV с понижением температуры испытаний наиболее интенсивно снижаются в интервале температур $20\text{...}-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Работа на зарождение трещины A_3 и рассчитанная по ней динамическая трещиностойкость J_{id} (1) до температуры $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижаются незначительно, а при температуре ниже $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, напротив, заметно увеличиваются за счет роста прочностных свойств сплавов системы Fe–Ni с понижением температуры испытаний [18].

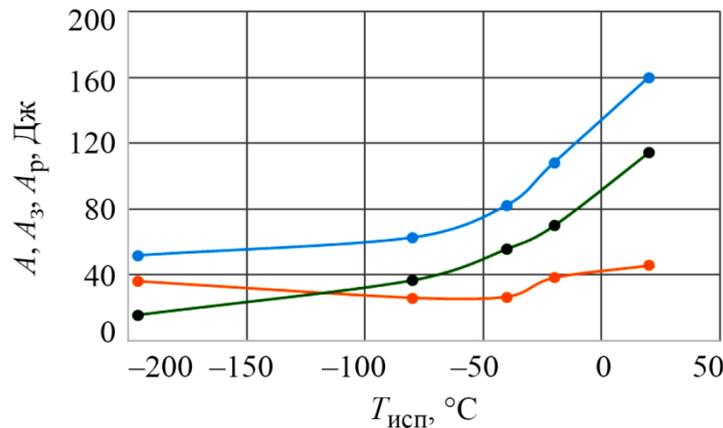


Рис. 5. Температурные зависимости общей работы разрушения A и ее составляющих A_3 (работа на зарождение трещины) и A_p (работа на распространение трещины) образцов из метеорита Чинге: ● – A ; ● – A_3 ; ● – A_p

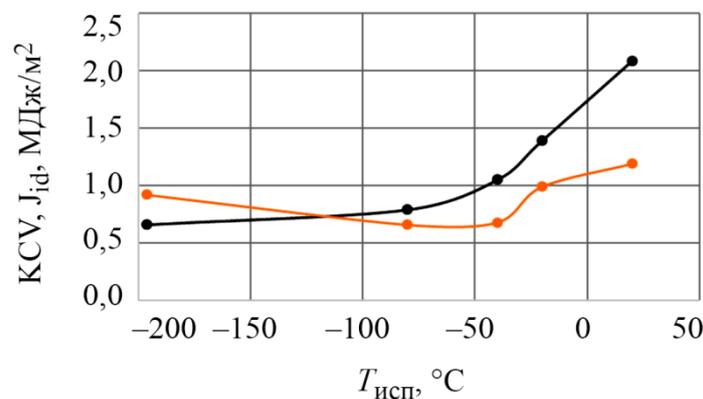


Рис. 6. Температурные зависимости ударной вязкости KCV и динамической трещиностойкости J_{id} образцов из метеорита Чинге: ● – KCV ; ● – J_{id}

С понижением температуры испытаний от комнатной до жидкого азота наблюдается тенденция к увеличению доли работы зарождения трещины в общей работе разрушения (рис. 7).

Фрактографический анализ полученных при различных температурах изломов ударных образцов с V-образным надрезом (рис. 8) показал, что с понижением температуры испытаний от комнатной до жидкого азота механизм разрушения материала атаксита Чинге меняется от вязкого ямочного до смешанного с преобладанием хрупкого квазискольного, и это хорошо согласуется с наблюдаемым снижением значений ударных характеристик и изменением вида диаграмм ударного нагружения.

Из рис. 8 а–в видно, что изломы образцов, испытанных при температурах 20...–40 °С, характеризуются типичным ямочным строением. В то же время на поверхности разрушения образцов после испытаний при температурах –80 и –196 °С наблюдаются только отдельные мелкие ямки на фоне преобладающего квазискольного рельефа поверхности разрушения (рис. 8 г, д).

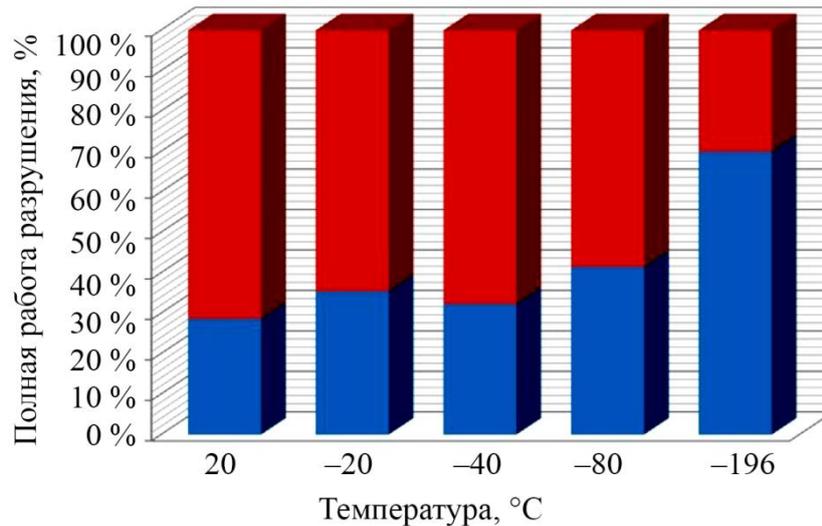


Рис. 7. Соотношение работ зарождения и распространения трещины при ударных испытаниях образцов из метеорита Чинге: ● – A_3 ; ● – A_p

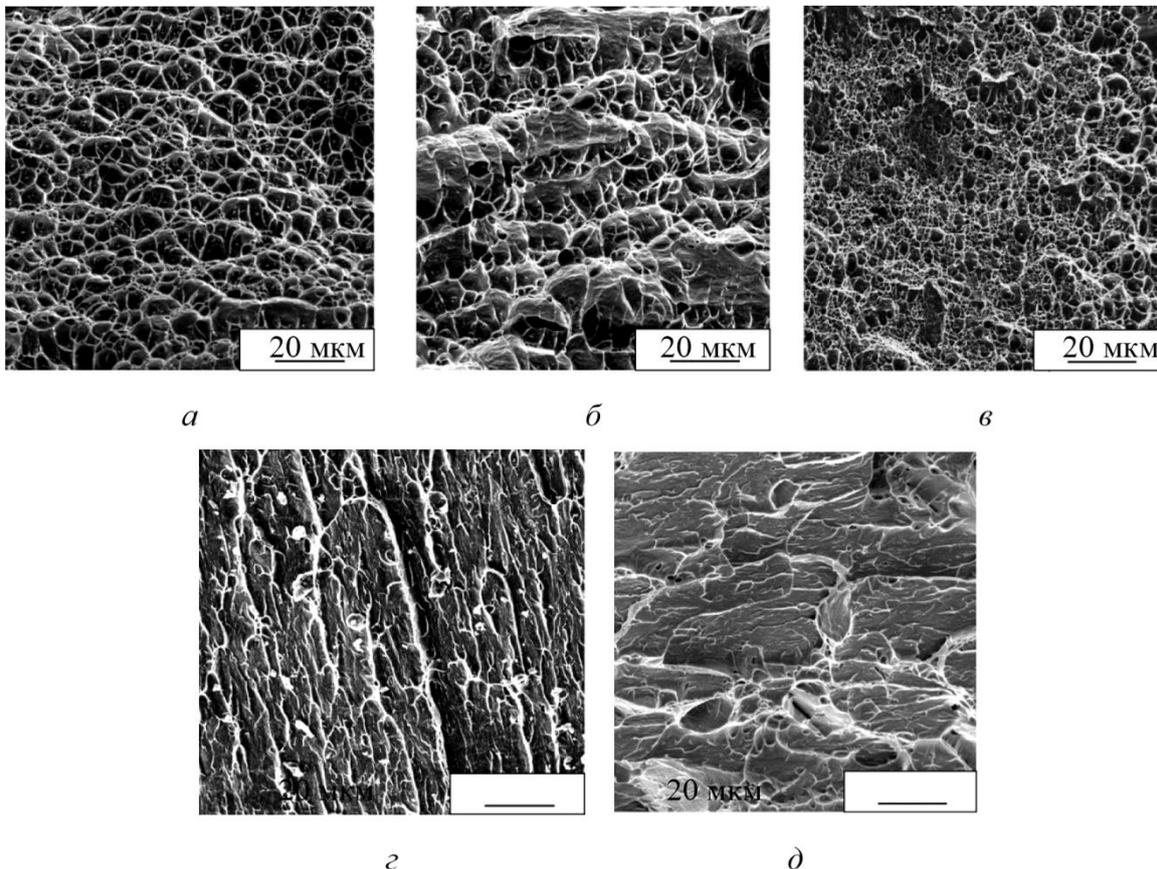


Рис. 8. Микростроение изломов ударных образцов метеорита Чинге с V-образным надрезом после испытаний при различных температурах: $T = 20\text{ °C}$ (а); $T = -20\text{ °C}$ (б); $T = -40\text{ °C}$ (в); $T = -80\text{ °C}$ (г); $T = -196\text{ °C}$ (д)

Результаты испытаний метеоритного материала на статическую трещиностойкость выявили существенное различие диаграмм нагружения в координатах «нагрузка – прогиб (раскрытие трещины)» образцов с наведенными усталостными трещинами при различных

температурах: 20 и -196 °С. Если в процессе испытаний при комнатной температуре страгивание трещины происходит в области малых пластических деформаций, а полное разрушение происходит при значительном перемещении (прогибе) образца, то в испытаниях при температуре жидкого азота страгивание трещины при ее первом скачке соответствует линейной области нагружения (рис. 9 а, б).

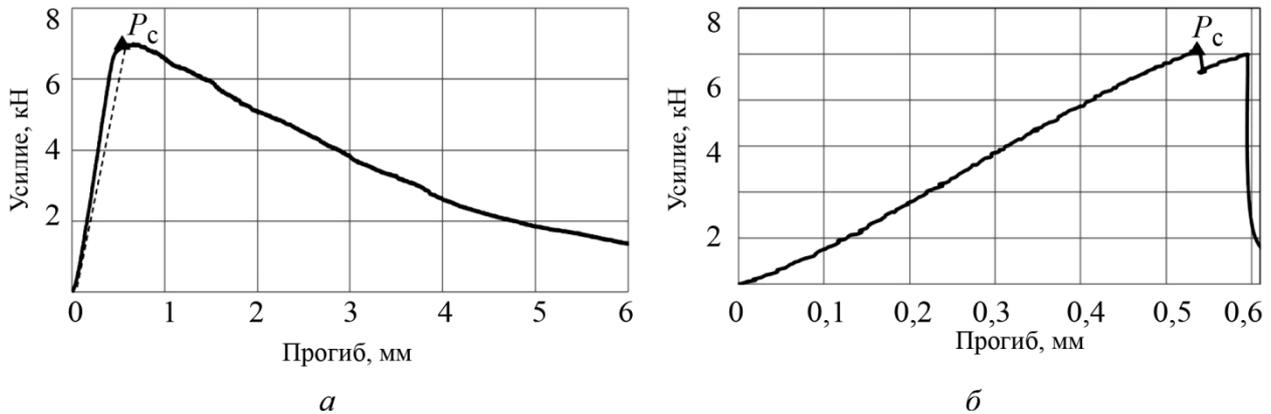


Рис. 9. Диаграммы нагружения образцов метеорита Чинге при испытаниях на статическую трещиностойкость в координатах «усилие – прогиб»: $T = 20$ °С (а); $T = -196$ °С (б)

Нагрузка страгивания трещины P_c определялась по ГОСТ 25.506-85 для образцов, испытанных при комнатной температуре, для соответствующих диаграмм нагружения типа IV, а для образцов, испытанных при -196 °С, принималась за нагрузку первого скачка трещины. В соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.506-85 [14] первичные (кажущиеся) значения статической трещиностойкости K_Q рассчитывали по формуле

$$K_Q = \frac{P_Q \times L}{t \times \sqrt{b^3}} \times Y_4, \quad (2)$$

где P_c (P_Q) – критическая нагрузка страгивания трещины; L – расстояние между опорами образца; t – толщина образца; b – высота образца; Y_4 – безразмерный коэффициент, зависящий от длины трещины.

Проверка экспериментально определенных (кажущихся) значений трещиностойкости на выполнение условий плоской деформации по критерию Брауна – Сроули (3) [19]

$$t \geq 2,5 \times (K_Q / \sigma_{0,2})^2, \quad (3)$$

где t – толщина образца, мм; K_Q – кажущаяся трещиностойкость; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, показала, что для комнатной температуры испытаний минимальная толщина образцов для обеспечения условий составляет примерно 25 мм, а для испытаний при температуре жидкого азота соответствует 9,86 мм. Таким образом, для толщины исследуемых образцов метеоритного материала 10 мм условие плоской деформации выполняется только при температуре испытаний -196 °С. В этом случае полученное значение трещиностойкости соответствует показателю K_{1C} . На образцах, испытанных при комнатной температуре, статическая трещиностойкость была определена в условиях плоского напряженного состояния и соответствовала показателю K_C . Поэтому экспериментальные значения статической трещиностойкости вещества метеорита Чинге в таблице были представлены как K_C и K_{1C} для условий плоского напряженного состояния и плоской деформации соответственно.

Таблица

Механические характеристики метеорита Чинге при статическом и динамическом нагружении

$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	КCV, МДж/м ²	КСТ, МДж/м ²	$K_{1C} (K_C), \text{МПа}\times\text{м}^{1/2}$	$J_{\text{id}}, \text{МДж/м}^2$	$K_{1d}, \text{МПа}\times\text{м}^{1/2}$
20	825	2,08	0,70	81,1 (K_C)	1,19	123,9
-196	1480	0,66	0,09	91,1	0,92	104,5

Следует отметить, что полученные в работе значения параметров статической трещиностойкости $K_{1C} (K_C) = 91,1 (81,1) \text{ МПа}\times\text{м}^{1/2}$ существенно ниже по сравнению показателями сопротивления хрупкому разрушению криогенных железо-никелевых сталей с содержанием никеля 9–12 %, определенными в условиях плоского напряженного состояния в интервале температур от 20 до $-196 ^\circ\text{C}$, $K_C = 144\dots 188 \text{ МПа}\times\text{м}^{1/2}$ [20].

Наличие более острого концентратора в виде усталостной трещины длиной $\approx 5 \text{ мм}$, по сравнению с V-образным надрезом, резко меняет вид диаграмм ударного нагружения (рис. 4, 10). На начальной стадии диаграммы ударного нагружения образца, испытанного при комнатной температуре, имеются множественные осцилляции нагрузки, а на конечной стадии роста трещины диаграмма приобретает пилообразный вид. Диаграмма удара образцов, испытанных при $-196 ^\circ\text{C}$, состоит из двух острых пиков. Наблюдаемые особенности диаграмм ударного нагружения, вероятно, связаны с тем, что пластическая составляющая в общей работе разрушения в случае более острого концентратора напряжения (усталостная трещина) значительно меньше, чем при испытании образцов с V-образным надрезом. В соответствии с рекомендациями [15] для расчета значений K_{1d} использовали формулу (2) для определения статической трещиностойкости, но в качестве значения P_C подставлялась максимальная достигнутая нагрузка при испытаниях на ударный изгиб.

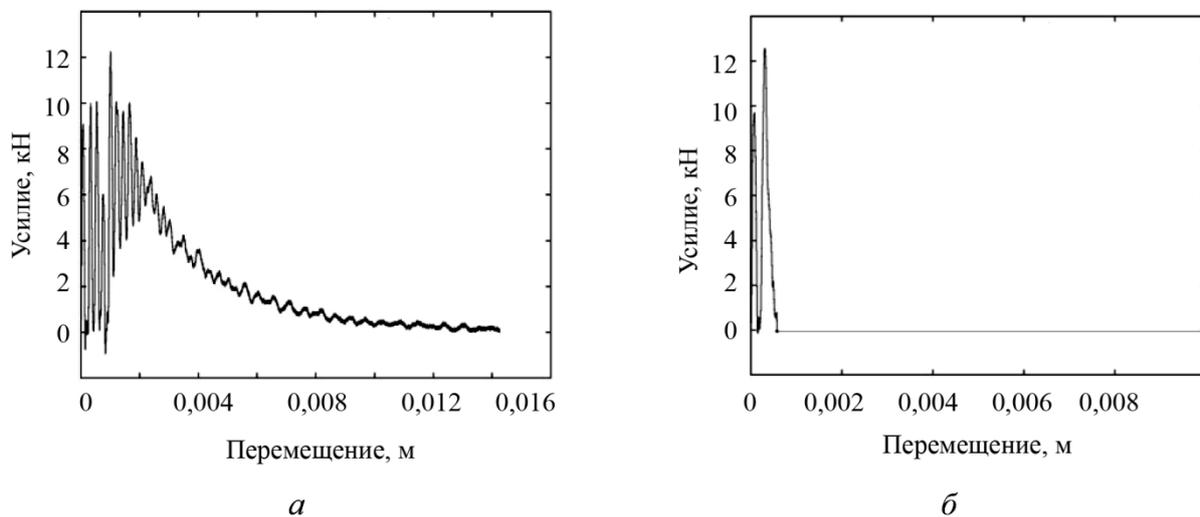


Рис. 10. Диаграммы ударного нагружения образцов из метеорита Чинге с концентратором в виде усталостной трещины в координатах «усилие – перемещение»: $T = 20 ^\circ\text{C}$ (а); $T = -196 ^\circ\text{C}$ (б)

Сравнительные значения ударной вязкости для образцов с V-образным надрезом и дополнительно наведенной из него усталостной трещиной (КCV и КСТ), а также статической и динамической трещиностойкости, приведенные в таблице, указывают на то, что с понижением температуры испытаний от 20 до $-196 ^\circ\text{C}$ наиболее резко уменьшается ударная вязкость КСТ (в 7 раз) и в меньшей степени – ударная вязкость образцов с надрезом (в 3 ра-

за). При этом показатели динамической трещиностойкости J_{id} и K_{Id} , определяемые по работе зарождения и нагрузке страгивания трещины соответственно, с понижением температуры испытания от комнатной до точки жидкого азота снижаются в значительно меньшей степени (в 1,2–1,3 раза). Статическая трещиностойкость метеоритного материала, напротив, с понижением температуры испытаний от комнатной до жидкого азота заметно увеличивается, что может быть связано с повышением разрушающей нагрузки и ростом сопротивления пластической деформации ($\sigma_{0,2}$) при понижении температуры испытаний (см. табл.).

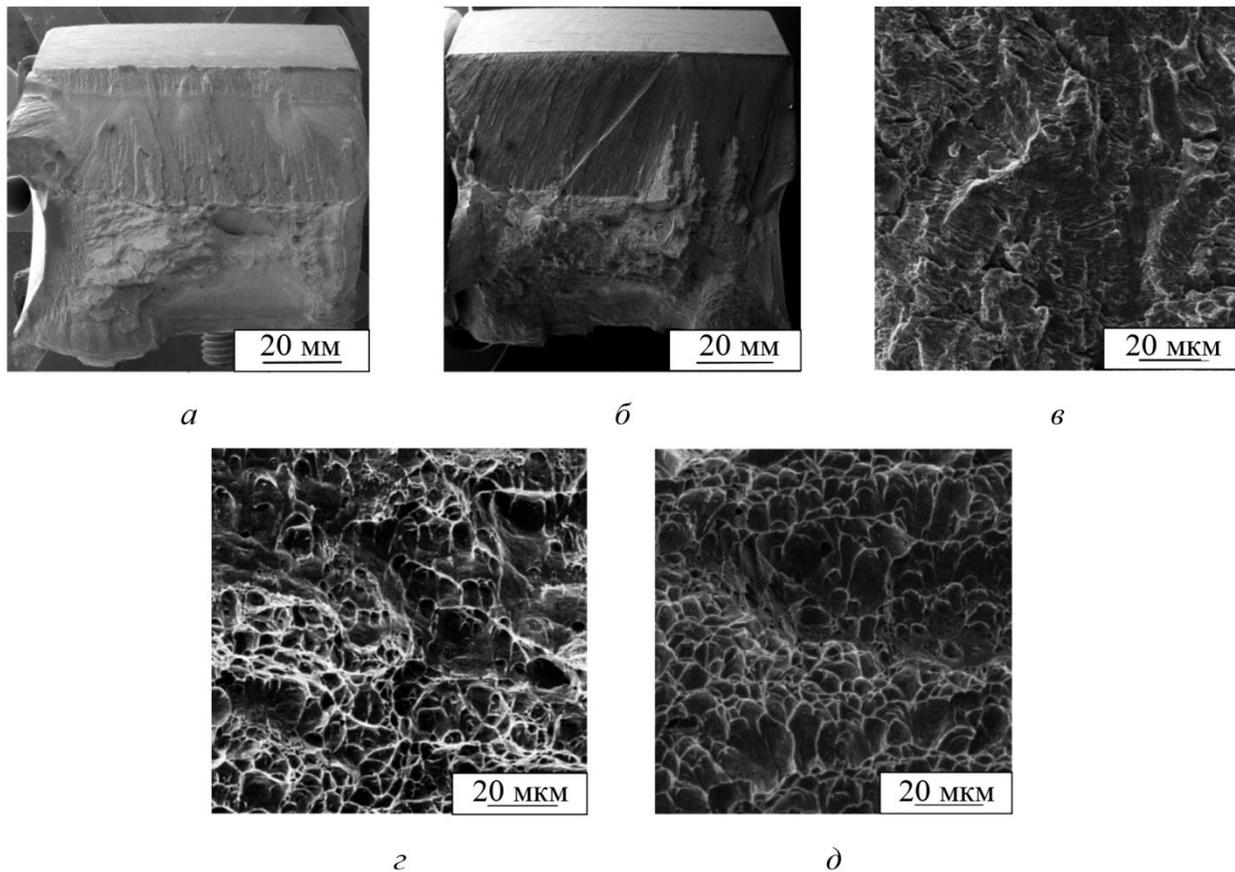


Рис. 11. Поверхности разрушения ударных образцов из метеорита Чинге после испытаний на статическую трещиностойкость при 20 °С (а, в, з) и –196 °С (б, д): общий вид излома (а, б); микростроение зоны роста усталостной трещины (в); микростроение зоны долома (з, д)

Изучение поверхности разрушения образцов из метеорита Чинге с наведенной усталостной трещиной после испытаний на статическую трещиностойкость не выявило на макроскопическом уровне существенного отличия в морфологии изломов, полученных при температурах 20 и –196 °С (рис. 11 а, б). Зона долома этих образцов имеет вязкий, волокнистый рельеф с характерными боковыми утяжками («губами среза»), свидетельствующими о существенном вкладе пластической деформации в работу разрушения при ударном изгибе.

По данным фрактографического анализа, на поверхности циклического роста трещины, наведенной из вершины V-образного надреза при комнатной температуре, присутствуют элементы гребенчатого рельефа, вторичные трещины и характерные усталостные бороздки (рис. 11 в). Микростроение зон долома образцов, испытанных при комнатной температуре, характеризуется наличием глубоких вязких ямок различного размера, а изломы образцов после низкотемпературных испытаний при –196 °С содержат менее глубокие низкоэнергетические ямки и вытянутые плоские фасетки квазискола (рис. 11 з, д).

Высокий уровень значений трещиностойкости для сплава Fe–17%Ni внеземного происхождения обусловлен, прежде всего, смесью дисперсных фаз, сформировавшихся при весьма медленном охлаждении с реализацией фазовых превращений $\gamma\text{-Fe(Ni)} \rightarrow \alpha_2\text{-Fe(Ni)} + \gamma\text{-Fe(Ni)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(Ni)} + \gamma\text{-Fe(Ni)}$ [21]. Такой механизм формирования структуры аналогичен бейнитному превращению в сталях.

4. Заключение

При отсутствии выраженного порога хладноломкости ударная вязкость (KCV) и работа распространения трещины (A_p) метеоритного вещества Чинге наиболее заметно снижается в интервале температур 20...–60 °С, а затем уменьшается более плавно, оставаясь на достаточно высоком уровне и при температуре кипения жидкого азота.

Определенная на образцах с V-образным надрезом работа зарождения трещины (A_3) и динамическая трещиностойкость (J_{id}) с понижением температуры испытаний меняются по кривой с минимумом, соответствующим температуре –80 °С. Понижение температуры испытаний способствует повышению работы зарождения трещины в общей работе разрушения ударного образца.

Понижение температуры динамических (ударных) испытаний от 20 до –196 °С приводит к смене механизма разрушения от вязкого ямочного к хрупкому квазискольному. При этом в наибольшей степени снижаются характеристики ударной вязкости КСТ (в 7 раз) и KCV (в 3 раза).

Показатели динамической трещиностойкости J_{id} и K_{1d} , определенные по величине работы разрушения и нагрузке страгивания трещины для образцов с усталостной трещиной и острым надрезом соответственно, с понижением температуры испытания от комнатной до точки кипения жидкого азота снижаются в значительно меньшей степени (в 1,2–1,3 раза).

Понижение температуры испытаний от 20 до –196 °С, обеспечивающее выполнение условий плоской деформации, позволило определить корректные значения показателя статической трещиностойкости материала метеорита Чинге ($K_{1C} = 91,1 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$), что на 12 % превышает значение $K_C = 81,1 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$.

Наблюдаемый рост силового показателя статической трещиностойкости при понижении температуры испытаний до –196 °С связан с ростом нагрузки страгивания трещины в условиях возрастания низкотемпературных прочностных свойств сплавов системы Fe–Ni.

Высокий уровень значений K_{1C} (K_C) при температурах 20 и –196 °С хорошо согласуется с данными фрактографического анализа, свидетельствующими о сохранении преобладающего вязкого ямочного рельефа поверхности разрушения в изломе всех образцов, испытанных на статическую трещиностойкость.

Благодарность

Авторы выражают благодарность старшим научным сотрудникам Института машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН к.т.н. Вичужанину Д. И. и к.т.н. Каманцеву И. С. за помощь в проведении испытаний на растяжение и статическую трещиностойкость. Работа выполнена в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-03-2023-006 (тема FEUZ-2023-0014) и госзадания Минобрнауки № АААА-А18-118020790147-4. Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП «Плассометрия» ИМАШ УрО РАН. Авторы благодарят за поддержку Министерство науки и высшего образования РФ в рамках Программы развития УрФУ в соответствии с программой «Приоритет-2030».

Литература

1. Адушкин В. В., Немчинов И. В., Светцов В. В. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2005. – 310 с.
2. Petrovic J. J. Review Mechanical properties of meteorites and their constituents // *Journal of material science*. – 2001. – Vol. 36. – P. 1579–1583. – DOI: 10.1023/A:1017546429094.
3. Slyuta E. N. Physical and mechanical properties of stony meteorites // *Solar System Research*. – 2017. – Vol. 51. – P. 64–85. – DOI: 10.1134/S0038094617010051.
4. Remo J. L., Johnson A. A. A preliminary study of the ductile-brittle transition under impact conditions in material from an octahedrite // *Journal of Geophysical Research*. – 1975. – Vol. 80, iss. 26. – P. 3744–3748.
5. Johnson A. A., Remo J. L., Davis R. B. The Low temperature impact properties of the meteorite Hoba // *Journal of Geophysical research*. – 1979. – Vol. 84, iss. B4. – DOI: 10.1029/JB084iB04p01683.
6. Grokhovsky V. I., Gladkovsky S. V. The impact mechanical tests of meteorites // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2010. – Vol. 45. – P. A69–A69.
7. Grokhovsky V. I., Gladkovsky S. V. The impact mechanical tests of Seymchan and Chinga meteorites // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2018. – Vol. 53. – P. 6276–6276.
8. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М. : Наука, 2008. – 334 с.
9. Пестриков В. М., Морозов Е. М. Механика разрушения : курс лекций. – СПб. : Профессия, 2012. – 552 с.
10. Gladkovskiy S. V. Инструментированные ударные испытания в материаловедении // Перспективные материалы : учебное пособие. Глава 6 / под ред. Д. Л. Мерсона. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2021. – 336 с.
11. Grokhovsky V. I., Gladkovsky S. V. Brittle fracture resistance of Chinga and Seymchan meteorites under static and impact loading // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2019 – Vol. 54. – P. 6429.
12. Buddha from space – an ancient object of art made of a Chinga iron meteorite fragment / E. Buchner, M. Schmieder, G. Kurat, F. Brandstätter, U. Kramar, T. Ntaflos, J. Kröcher // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2012. – Vol. 47 (9). – P. 1491–1501.
13. ГОСТ 9454–78.
14. ГОСТ 25.506-85.
15. РД 50-344-82.
16. ГОСТ 22848-77.
17. Ботвина Л. Р. Основы фрактодиагностики. – М. : Техносфера, 2022. – 394 с.
18. Лебедев Д. В. Конструктивная прочность криогенных сталей. – М. : Metallurgia, 1971. – 264 с.
19. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. – М. : Мир, 1972. – 245 с.
20. Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах : сб. науч. трудов / пер. с англ. под ред. И. Н. Фридляндера. – М. : Metallurgia, 1983. – 432 с.
21. Martensite morphology in different types of meteorites / E. V. Brusnitsyna, K. A. Badekha, V. I. Grokhovsky, R. F. Muftakhedinova // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2018. – Vol. 53. – P. 6290–6290.