06

Откольная прочность графитов МПГ-8 и И-3 при ударном нагружении до 2 GPa

© А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов, А.Н. Жуков

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: savas@ficp.ac.ru

Поступило в Редакцию 7 ноября 2024 г.
В окончательной редакции 28 декабря 2024 г.
Принято к публикации 9 января 2024 г.

Проведены измерения откольной прочности мелкозернистого прессованного графита МПГ-8 и высокопрочного изотропного графита И-3 при ударно-волновом нагружении амплитудой, не превышающей 2 GPa. С помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR в экспериментах регистрировалась структура волн сжатия и разрежения в графите. Найдено, что с ростом максимального напряжения сжатия откольная прочность графита МПГ-8 существенно растет, а графита И-3 — не изменяется. Измерена величина динамического предела упругости исследованных графитов при 0.5 GPa и показана сильная зависимость скорости волны уплотнения от максимального напряжения сжатия.

Ключевые слова: графит, ударные волны, деформация, откольная прочность, ударная адиабата.

DOI: 10.61011/JTF.2025.04.60012.411-24

Введение

Графит широко используется как конструкционный материал во многих областях промышленности и обычно представляет собой поликристаллический материал, в котором, наряду с границами зерен и дефектами упаковки в виде двойников, имеется значительное количество одиночных дефектов. В ядерной энергетике с самого начала ее развития графит применяется как хороший замедлитель с малым сечением захвата нейтронов и как конструкционный материал для оболочек и матриц твэлов, противоосколочных покрытий сферических частиц топлива в высокотемпературных газовых реакторах, трубопроводах и т.д. [1–5]. Из графитов различных марок изготавливаются некоторые детали тепловыделяющих сборок реакторов, его используют как матричный и оболочечный материал в высокотемпературных реакторах. Таким образом, с учетом критических условий эксплуатации в установках ядерной энергетики графит обладает уникальными физико-химическими свойствами — высокой механической прочностью, изотропностью, хорошей эрозионной, коррозионной и химической стойкостью при радиационном облучении, содержат малое количество примесей. Кроме того, технологиями изготовления графитов обеспечивается низкое значение коэффициента температурного расширения, а также высокая тепло- и электропроводность материала в условиях воздействия радиации.

Одной из самых важных характеристик графитовых материалов является его прочность, которая может значительно изменяться в зависимости от способов их изготовления, поэтому графиты с одинаковой плотностью, но разных марок, отличаясь структурой, могут иметь различную прочность. Общим правилом является то, что более тонко структурированный графитовый композит обладает, как правило, большей прочностью и большим временем жизни. Прочность разного вида графитов при статических нагрузках может варьироваться в пределах от 10 до 100 и более MPa в зависимости от технологии изготовления и условий нагружения. В экстремальных условиях эксплуатации конструкции изделия из графита могут подвергаться в том числе и динамическим (ударным) нагрузкам различной интенсивности, однако данных о прочностном поведении графитов при импульсных воздействиях крайне мало. В работе [6] было проведено испытание на откол графита для изучения его динамического поведения при растяжении с помощью стержней Гопкинсона при скорости деформирования $5 \cdot 10^3\,\mathrm{s}^{-1}$. Проводились исследования фрагментации графитовых образцов при их соударении с компактным ударником при скоростях до 5 km/s [7]. В основном измерения критических растягивающих напряжений в условиях откола проводились при мощном лазерном воздействии наносекундной длительности [8–11], когда в процессе нагружения регистрировались волновые профили, и была сделана оценка откольной прочности графита, равная в этих условиях ~ 135 MPa. Рассчитанная в [9] откольная прочность графита при максимальной реализованной скорости деформирования $1.4 \cdot 10^7\,\mathrm{s}^{-1}$ достигала 2.1 GPa, что составляет 64 % от теоретического предела прочности графита.

В настоящей работе проведены измерения откольной прочности, динамического предела упругости и скорости волны уплотнения графитов марок МПГ-8 и И-3, необходимые для прогнозирования их прочностного поведения

Таблица 1. Определенные в ходе анализа структурные параметры графитов МПГ-8 и И-3

Структурный параметр графита	МПГ-8	И-3
Параметр кристаллической решетки a, Å	2.4635(2)	2.4634(2)
Параметр кристаллической решетки c, Å	6.754(1)	6.768(1)
Рентгеновская плотность ρ, g/cm^3	2.247	2.243
Коэффициент преимущественной ориентации R	1.05	1.03
Степень трехмерной упорядоченности P_3	0.48	0.41
Степень трехмерной упорядоченности P_3^*	0.59	0.47
Концентрации политипных дефектов деформационного типа α	0.11	0.03
Концентрации политипных дефектов ростового типа σ	0.19	0.10
Концентрации турбостратных дефектов γ	0.41	0.53

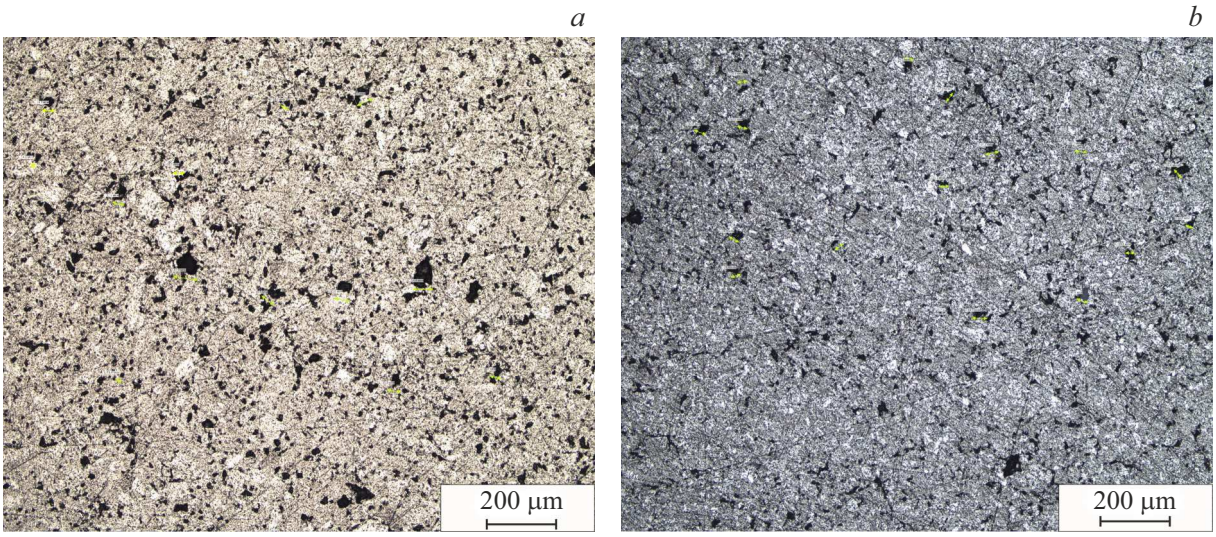


Рис. 1. Микроструктуры графитов при увеличении 10×; a — МПГ-8, b — И-3.

при интенсивных импульсных воздействиях техногенного, природного или террористического характера.

1. Исследуемые материалы и экспериментальные методы

Исследовались два вида графитовых образцов. Графит марки МПГ-8 — высокопрочная разновидность искусственного графита, получаемая в результате холодной прессовки графитового порошка из малозольного нефтяного кокса, — имеет высокую механическую прочность в силу своей мелкозернистой структуры. Сохраняет свои механические и термодинамические свойства до температур более 2000 °C. Графит марки И-3 представляет собой изотропный, высокопрочный мелкозернистый конструкционный графит, полученный путем изостатического прессования, свойства заготовок и изделий из них не зависят от направления нагрузок, обладает высокой износостойкостью и теплопроводностью.

Характерной особенностью искусственных графитов является наличие в них развитой пористости, что связано с технологией их изготовления и свойствами коксов-наполнителей. Пористая структура и размер пор во многом определяют эксплуатационные свойства и поведение графитовых материалов в различных условиях. Общая пористость исследуемых в настоящей работе образцов была определена по формуле

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_{sample}}{\rho_{theor}}\right) \cdot 100\,\%$$

где ρ_{sample} — плотность исследуемого образца, ρ_{theor} — теоретическая плотность материала. При расчете пористости была использована плотность беспористого графита $\rho_0 = 2.265\,\mathrm{g/cm^3}$.

В процессе подготовки образцов были измерены значения продольной c_l и сдвиговой c_s скоростей звука с помощью прибора для измерения скорости распространения акустических волн (МГНИВП „Акустика“). Плотность исследуемых образцов ρ_{00} определяли методом гидростатического взвешивания с помощью аналитических весов ME204T („Mettler Toledo“) в автоматическом режиме.

Образцы графитов были подробно исследованы методами порошковой рентгеновской дифракции. Съемка рентгенограмм проводилась на дифрактометре ДРОН-4 в геометрии Брегга-Брентано. Поверхность образцов, подвергавшаяся воздействию рентгеновских лучей, была предварительно выровнена и очищена обработкой на токарном станке. Использовалось излучение CuKα, Ni-фильтр. Дифрактограммы фиксировались в диапазоне углов 2θ $10^\circ - 165^\circ$ пошагово. Величина шага 0.05°, время регистрации на каждом шаге 4 s. Рентгенограммы анализировались различными методами. Коэффициент преимущественной ориентации R (модель March Dollase), параметры кристаллической решетки a, c и рассчитываемая на их основе рентгеновская плотность ρ определялись с помощью программного пакета GSAS [12]. Уширение пиков на рентгенограммах и его возможные причины исследовались с помощью построения диаграмм Вильямсона-Холла [13]. Исследование позволяет говорить о достаточно большом размере областей когерентного рассеяния (размере кристаллитов), как по оси a, так и c (как минимум более 50 nm), низком уровне искажения графитовых сеток, но существенных микроискажениях в перпендикулярном к ним направлении (вдоль оси c) и заметной концентрации турбостратных и политипных дефектов упаковки. Концентрации турбостратных дефектов (γ), политипных дефектов ростового (δ) и деформационного (α) типов, как и степени трехмерной упорядоченности P_3 и P_3^* рассчитаны по формулам, приведенным в работе [14]. Степень трехмерной упорядоченности P_3 рассчитывалась из параметра решетки c, а P_3^* определялась по уширению линии 112. Рассчитанные в ходе рентгеновского исследования структурные параметры графитов МПГ-8 и И-3 приведены в табл. 1.

Обращает на себя внимание коэффициент преимущественной ориентации R, близкий к единице, что соответствует весьма слабо текстурированным графитам. Коэффициент, равный единице, свидетельствует об отсутствии текстуры [12]. Проведенный анализ позволяет заключить, что образцы МПГ-8 и И-3 представляют собой умерено закристаллизованные гексагональные графиты с заметной концентрацией турбостратных и политипных дефектов с весьма низким, в особенности для графита И-3, уровнем текстурированности.

Предварительно была исследована структура исследуемых образцов графитов на инверторном металлургическом микроскопе OLYMPUS GX53. На рис. 1 представлены фотографии структуры поверхности исследуемых графитов при $10\times$ увеличении. Как видно на рис. 1, *a*, мелкозернистый графит МПГ 8 имеет достаточно однородную структуру, в которой присутствует значительное количество пор преимущественно круглого и овального сечения. Основной размер пор — до 25 μm, встречаются поры размерами от 25 до 40 μm, и в достаточно малом количестве присутствуют поры размером от 40 до 60 μm. Мелкозернистый изостатический графит И-3 (ISEM-3) имеет достаточно однородную структуру. На рис. 1, *b* видно, что геометрия пор отличается от пор мелкозернистого графита МПГ-8. Поры имеют меньшие размеры, их форма — преимущественно вытянутая, продолговатая, длиной от 30 до 90 μm. Основная часть относительно круглых пор имеет размер не более 20 μm. Достаточно редко встречаются поры размером от 20 до 40 μm, и очень мало крупных пор до 50 μm. Таким образом, микроскопические исследования структуры графитов показали, что макроскопическая пористость образцов прямо зависит от размеров пор. В табл. 2 представлены механические свойства исследованных в настоящей работе конструкционных графитов.

Таблица 2. Механические свойства графитов МПГ-8 и И-3

Характеристика графита	МПГ-8	И-3
Измеренная плотность ρ_{00}, g/cm^3	1.89	1.91
Измеренная пористость, %	17	16
Продольная скорость звука c_l, m/s	2797	2627
Сдвиговая скорость звука c_s, m/s	1559	1586
Зольность, %, не более	0.005	0.00005
Размер зерна, μm	8–10	8–10
Модуль упругости, GPa	11	11
Предел прочность при изгибе, MPa, не менее	50	55–58
Предел прочности при сжатии, MPa, не менее	90	90

Исходные заготовки графитов представляли собой пластины толщиной 5 mm. Для ударно-волновых экспериментов из графитовых пластин вырезались на электроискровом станке АРТА 120 плоскопараллельные прямоугольные образцы размером 30×30 mm. Такое соотношение толщины и линейных размеров образцов позволяло сохранять одномерность процесса деформирования при плоском соударении в течение времени, необходимого для регистрации полных волновых профилей. Поверхности плоских графитовых образцов предварительно шлифовались на шлифовальной бумаге с зернистостью 2500 со спиртом до зеркального блеска с сохранением плоскопараллельности. Для обеспечения отражения зондирующего лазерного излучения при регистрации скорости поверхности лазерным интерферо-

метром на одну из поверхностей напылялся с помощью вакуумной установки ВУП-2 слой алюминия ($1-2\,\mu$m).

Ударно-волновое нагружение графитовых образцов проводилось на пневматической пушке ПП-50, с помощью которой медный (Cu) ударник толщиной 2 mm разгонялся до скоростей (230 ± 10), (350 ± 10), (440 ± 10) и (520 ± 10) m/s перед соударением с образцом. Плоские ударники располагались на торце пустотелого алюминиевого снаряда, который ускорялся в стволе пушки сжатым воздухом или гелием, обеспечивая плоское соударение с образцом. В каждом опыте проводилось измерение скорости ударника и его перекоса двумя парами электроконтактных датчиков. Ствол пушки и приемная камера, в которой располагался образец, перед опытом вакуумировались. Все эксперименты проводились при комнатной температуре. Во всех экспериментах проводилась регистрация скорости свободной поверхности исследуемых образцов (полные волновые профили $u_{fs}(t)$) с помощью лазерного допплеровского интерферометрического измерителя скорости VISAR [15], имеющего временное разрешение ~ 1 ns и пространственное разрешение ~ 0.1 mm.

2. Определение ударной сжимаемости исследуемых графитов

На рис. 2 представлены результаты регистрации профилей скорости свободной поверхности в ударно-волновых экспериментах с образцами исследуемых графитов — мелкозернистого прессованного (МПГ-8) и изостатического И-3, полученных при скоростях ударника 230, 350, 440 и 520 m/s. На всех волновых профилях фиксируется последовательно выход на поверхность упругой волны, амплитуда которой уменьшается с ростом максимального напряжения сжатия. Далее следует волна уплотнения и следующая за ней область постоянства параметров, за которой, в свою очередь, на поверхность выходит волна разрежения, связанная с динамическим растяжением материала и его последующим разрушением. Длительность области постоянства параметров определяется временем реверберации волн в ударнике.

На рис. 3 показаны фронтальные части волн сжатия исследованных графитов при ударе медным ударником толщиной 2 mm со скоростью 230 m/s. На профилях регистрируется выход упругой волны и последующий выход волны уплотнения. Форма упругой волны зависит от общего объема пор, их размеров и конфигураций, равномерности распределения пор по объему для каждого исследованного графита. Графит И-3 демонстрирует плавное нарастание скорости свободной поверхности от нуля до выхода волны уплотнения с тем отличием, что нарастание скорости свободной поверхности в волне уплотнения круче, чем у графита МПГ-8. Измерение скорости распространения первой волны сжатия с помощью электроконтактных датчиков показало, что

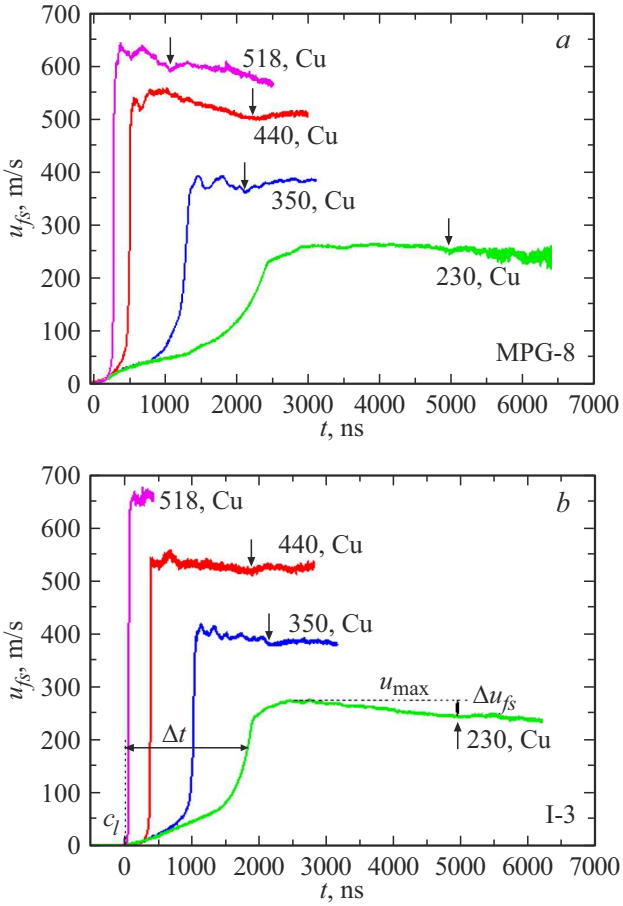


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности образцов графитов МПГ-8 и И-3 толщиной 5 mm. У профилей указаны скорость (m/s) и материал ударника, стрелками показаны моменты времени откольного разрушения.

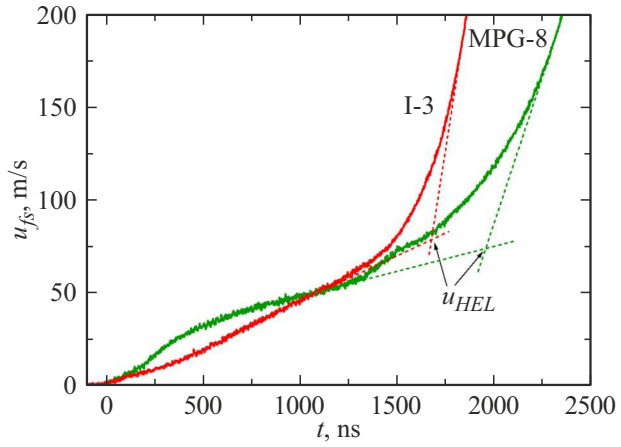


Рис. 3. Фронтальные части волн сжатия графитов МПГ-8 и И-3 толщиной 5 mm при ударе медной пластиной толщиной 2 mm, разогнанной до скорости 230 m/s.

первая волна сжатия распространяется с продольной скоростью звука. На рис. 3 показано, как определялись

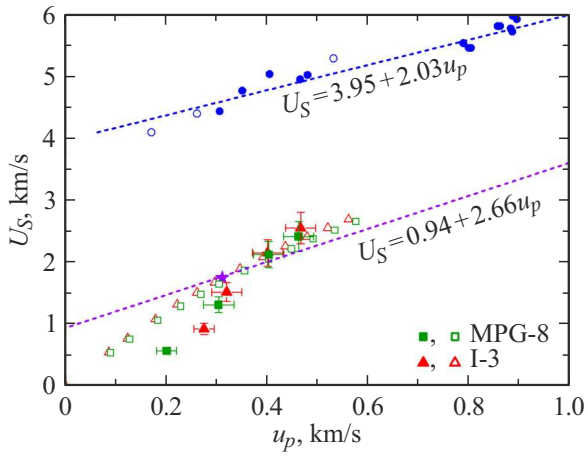


Рис. 4. Ударные адиабаты пористого и сплошного графитов в координатах массовая скорость-скорость ударной волны. Пустой квадрат и треугольник — расчет, полный квадрат и треугольник — эксперимент, полный круг — пиролитический графит [17], пустой круг — пиролитический графит [18], звезда пористый реакторный графит [18].

скорости свободной поверхности u_{HEL} исследованных графитов, при которых заканчивается упругое сжатие исследуемого материала, и начинает формироваться волна компактирования или уплотнения. По измеренной скорости свободной поверхности u_{HEL} с помощью соотношения $\sigma_{HEL} = 1/2\rho_{00}c_l u_{HEL}$ была сделана оценка напряжения сжатия, соответствующего динамическому пределу упругости исследуемого материала. Таким образом, для графита МПГ-8 $\sigma_{HEL} = 196$ MPa, для И-3 $\sigma_{HEL} = 195$ MPa. Полученные значения динамического предела упругости для каждого графита в два раза превышают предел прочности при сжатии, измеренный в статических условиях нагружения (табл. 2).

Ударное сжатие пористого вещества приводит к его тепловому разогреву [16]. Так как в настоящей работе максимальные давления сжатия не превышают 2 GPa, для расчета скорости ударной волны и массовой скорости пористого графита было сделано предположение, что при ударном сжатии пористого вещества все поры „закрываются“, и исследуемое вещество становится беспористым. В слабых ударных волнах разогрев пористого вещества незначителен. Для расчета удельного объема ударно сжатого сплошного вещества воспользуемся соотношением $V = V_0\frac{(U_s)-u_p}{U_s}$, где V_0 — удельный объем сплошного вещества $V_0 = 1/\rho_0$ (ρ_0 — плотность сплошного графита, равная 2.265 g/cm^3), U_S — скорость ударной волны в сплошном веществе, u_p — массовая скорость сплошного вещества. Давление P в сплошном веществе рассчитывается с помощью соотношения $P = \rho_0 U_S u_p$. Зависимость U_S от массовой скорости u_p сплошного графита была получена путем аппроксимации экспериментальных данных [17,18] до давлений фазового превращения, как это показано на рис. 4, соотношением $U_S = 3.95 + 2.03u_p$. Для оценки скорости ударной волны U_{S1} и массовой скорости u_{p1} пористого графита воспользуемся соотношениями $U_{S1} = \sqrt{p\frac{V_{00}^2}{V_{00}-V}}$ и $u_{p1} = \frac{P}{\rho_{00}U_{S1}}$, где $V_{00} = \frac{1}{\rho_{00}}$ (ρ_{00} — измеренная плотность пористого графита). Оценка производилась следующим образом. Так как при ударном нагружении пористое вещество становится беспористым или имеет незначительную пористость, и нагрев пористого вещества при ударном сжатии не учитывается, удельный объем V и давление P рассчитываются в сплошном веществе во всем диапазоне массовых скоростей up сплошного вещества. Затем рассчитываются скорости ударных волн U_{S1} и массовые скорости u_{p1}, реализуемые в пористом веществе при давлении P и удельном объеме V.

На рис. 4 показаны рассчитанные зависимости скорости ударной волны от массовой скорости для исследованных пористых графитов. Рассчитанные зависимости пористых графитов в координатах $U_S - u_p$ существенно нелинейны и лежат ниже, чем зависимость для сплошного (пиролитического) графита [17,18]. Там же представлены данные для реакторного пористого графита [18]. На рис. 4 нанесены экспериментальные данные о зависимости скорости волны уплотнения от массовой скорости, полученные в настоящей работе для исследованных графитов. Расчет массовой скорости u_{p1} схематично показан на рис. 5. С помощью электроконтактных датчиков было экспериментально определено, что выход первой волны на свободную поверхность происходит с продольной скоростью звука cl; для расчета скорости волны уплотнения воспользуемся соотношением $U_{S1} = c_l\frac{h_s/c_l-\Delta t/2}{h_s/c_l+\Delta t/2}$, где h_s — толщина образца, Δt — разница между выходом на свободную поверхность упругой волны и волны уплотнения, как это показано на рис. 2. Полученные значения максимальной скорости свободной поверхности $u_{\max}$ и скорости волны уплотнения U_{S1} для исследованных графитов также

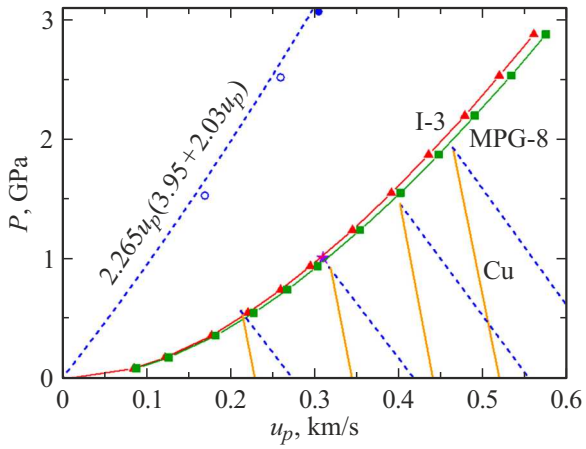


Рис. 5. Ударные адиабаты пористого и сплошного графитов в координатах массовая скорость-давление. Квадрат и треугольник — расчет, полный круг — пиролитический графит [17], пустой круг — пиролитический графит [18], звезда — реакторный графит [18].

Таблица 3. Постановка и результаты экспериментов с графитами И-3 и МПГ-8

№	h_s, mm	V_{imp}, m/s	h_{imp}, mm / материал	Δt, ns	U_{S1}, km/s	Δu_{fs}, m/s	σ_{sp}, MPa	$u_{\max}$, m/s	u_{pl}, m/s	$\sigma_{\max}$, GPa
И-3										
1	4.981	520	1.996 / Cu	62	2.54	–	–	662	465	2.22
2	4.953	440	1.969 / Cu	383	2.14	30	134	553	400	1.65
3	4.975	350	1.983 / Cu	1023	1.51	32	143	418	319	0.99
4	4.958	230	1.983 / Cu	1819	0.92	30	134	274	212	0.51
МПГ-8										
5	4.950	520	1.980 / Cu	268	2.40	44	196	634	461	2.10
6	4.927	440	1.983 / Cu	490	2.12	52	233	551	402	1.64
7	4.948	350	1.988 / Cu	1286	1.31	23	103	389	303	0.84
8	4.936	230	1.990 / Cu	2344	0.57	10	45	259	213	0.39

Примечание: h_s — толщина образца, V_{imp} — скорость ударника, h_{imp} — толщина ударника, Δt — разница времени между выходом упругой волны и волной уплотнения, U_{S1} — скорость волны уплотнения, Δu_{fs} — амплитуда откольного импульса, σ_{sp} — откольная прочность, $u_{\max}$ — максимальное значение скорости свободной поверхности, u_{pl} — массовая скорость, $\sigma_{\max}$ — максимальное напряжение сжатия.

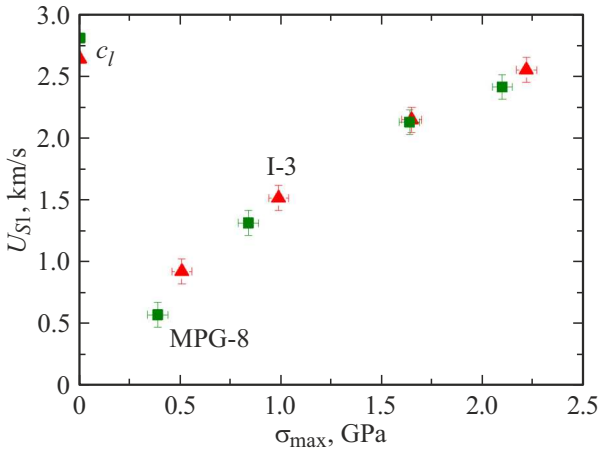


Рис. 6. Зависимости скорости волны уплотнения от максимального напряжения сжатия графитов И-3 и МПГ-8. Приведены измеренные значения продольной скорости звука.

представлены в табл. 3. Из рисунка видно удовлетворительное согласие рассчитанных зависимостей массовой скорости от скорости ударной волны в сравнении с экспериментально полученными данными.

С использованием расчетных значений массовой скорости u_{p1} для пористого вещества и соответствующих им давлений для сплошного вещества были построены ударные адиабаты пористого вещества в координатах давление-массовая скорость, показанные на рис. 5. Как в координатах $U_S - u_p$, так и в координатах $P - u_p$ расчетные ударные адиабаты для пористых графитов лежат ниже, чем для сплошного. На рис. 5 также показаны зеркально отраженные адиабаты меди, построенные из значений скоростей, совпадающих со скоростями ударников, и построенные зеркально отраженные адиабаты сплошного графита, выходящие из экспериментально определенных значений максимальной скорости свободной поверхности umax. При пересечении зеркально отраженной адиабаты меди с зеркально отраженной адиабатой сплошного графита определялась массовая скорость u_{pl} в графите, так как разгрузка уплотненного графита происходит по адиабате сплошного материала. Расчет максимальных напряжений сжатия в каждом эксперименте проводился с использованием соотношения $\sigma_{\max} = \sigma_{HEL} + \rho_{el} U_s (u_{pl} - u_{HEL}/2)$ [19], где $\rho_{el} = \rho_0 c_l/(c_l - u_{HEL}/2)$ — плотность после упругого сжатия. Определенные таким образом значения массовой скорости u_{pl} и максимального напряжения сжатия $\sigma_{\max}$ суммированы в табл. 3.

На рис. 6 показаны рассчитанные из измеренных профилей скорости волн уплотнения U_{S1} в зависимости от максимального напряжения сжатия $\sigma_{\max}$ исследованных графитов. Видно, что с ростом максимального напряжения сжатия регистрируемые скорости волны уплотнения растут единообразно с сохранением двухволновой структуры на профиле скорости свободной поверхности. Двухволновая структура на профилях $u_{fs}(t)$ исследуемых графитов будет сохраняться до достижения скоростью волны уплотнения значения продольной скорости звука.

3. Результаты измерений откольной прочности графитов МПГ-8 и И-3

Динамическая прочность материалов в области предельно малых длительностей нагрузки исследуется путем анализа так называемых „откольных“ явлений при отражении импульсов сжатия от свободных поверхностей тела [20]. Высокоскоростное разрушение при

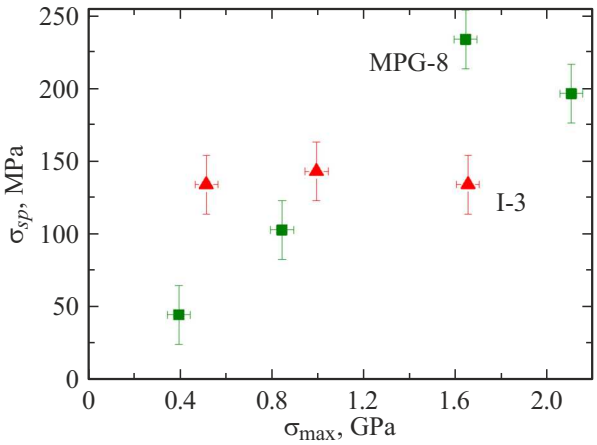


Рис. 7. Зависимости откольной прочности от максимального напряжения сжатия графитов МПГ-8 и И-3.

отколе представляет собой кинетический процесс зарождения, роста и слияния многочисленных несплошностей. При взаимодействии волны разрежения, приходящей от тыльной стороны ударника, с волной разрежения, приходящей от свободной поверхности образца, генерируются растягивающие напряжения, в результате чего 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. Декремент скорости поверхности Δu_{fs} 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 [21]:

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{2}\rho_0 c_b \Delta u_{fs}. \qquad (1)$$

Разрушение такого типа материалов, как графиты, происходит по объему образца и границам кристаллов и их конгломератов. Уменьшение их размеров приводит к более сложному и трудному распространению трещин в силу большего количества препятствий и тем самым определяет высокую прочность мелкозернистых образцов графита МПГ-8 и И-3.

Откольное разрушение, зафиксированное на профилях скорости свободной поверхности и показанное стрелками на рис. 2, происходило уже в уплотненном графите. Расчет откольной прочности проводился с помощью соотношения (1), где ρ_0 — плотность сплошного графита, равная 2.265 g/cm^3, $c_b = 3.95$ km/s — объемная скорость звука сплошного графита, взятая из аппроксимации данных для сплошного графита, показанная на рис. 4. Измеренные значения Δu_{fs} и определенные значения σ_{sp} суммированы в табл. 3. Как показал анализ полученных волновых профилей (рис. 2), для графита МПГ-8 наблюдается тенденция роста значения Δu_{fs} с ростом давления ударного сжатия. На рис. 7 показаны зависимости откольной прочности от максимального напряжения сжатия. С ростом максимального напряжения сжатия регистрируется значительный рост откольной прочности у графита МПГ-8. У графита И-3 с ростом максимального напряжения сжатия прочность на растяжение остается на одном уровне. Эксперименты показали значительный разброс прочности исследованных графитов. В этих графитах прочностные свойства предопределяются его дисперсностью, надмолекулярной и кристаллической структурами, которые, как показали выполненные эксперименты, малочувствительны к интенсивности сжатия в этом диапазоне давлений.

Заключение

С помощью лазерного доплеровского интерферометра VISAR проведены измерения волновых профилей образцов реакторного графита марок МПГ-8 и И-3 при ударно-волновом нагружении до 2 GPa. Определены максимальные напряжения сжатия, реализуемые в ударно-волновых экспериментах. Исследованные графиты демонстрируют обратную зависимость амплитуды упругой волны от максимального напряжения сжатия. Показано, что скорость упругой волны распространяется с продольной скоростью звука. Наблюдается сильная зависимость скорости волны уплотнения от максимального напряжения сжатия до значений скорости, не превышающей значения продольной скорости звука. Определены величины динамического предела упругости образцов графита толщиной 5 mm. Наибольшие значения σ_{HEL} регистрируются при $\sigma_{max} \sim 0.5$ GPa и составляют для графита МПГ-8 196 MPa для И-3 — 195 MPa. Из анализа волновых профилей определены значения откольной прочности исследуемых графитов в диапазоне скоростей деформирования перед разрушением $\sim 10^3 - 10^4$ s^{-1}. С ростом максимального напряжения сжатия до 2 GPa откольная прочность графита МПГ-8 растет с 50 до 230 MPa, в то время как графита И-3 практически не изменяется и находится в диапазоне 110–140 MPa.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках контракта № 1770641334821000138O/22398/89 от 23 мая 2023 г. и Госзадания Минобрнауки России по программе „Комплексное исследование физико-химических свойств и процессов в веществе в условиях высокоэнергетических воздействий“, регистрационный № 124020600049-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] С.Е. Вяткин, А.Н. Деев, В.Г. Нагорный, В.С. Островский, А.М. Сигареев, Т.А. Соккер. *Ядерный графит* (Атомиздат, М., 1967)

[2] Е.И. Жмуриков, И.А. Бубненков, В.В. Дремов, С.И. Самарин, А.С. Покровский, Д.В. Харьков. *Графит в науке и ядерной технике* (Новосибирск, 2013)

[3] Ю.С. Виргильев, А.Н. Селезнев, А.А. Свиридов, И.П. Калягина. Российский химический журнал, **50** (1), 4 (2006).

[4] А.В. Бушуев, А.Ф. Кожин, Е.В. Петрова, В.Н. Зубарев, Т.Б. Алеева, Н.А. Гирке. *Радиоактивный реакторный графит* (НИЯУ МИФИ, М., 2015)

[5] *Graphite properties and characteristics for industrial applications* (Entegris Poco Materials, Texas, 2015)

[6] L. Peroni, M. Scapin, F. Carra, N. Mariani. Key Eng. Mater., **569–570**, 103 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.569-570.103

[7] D. Hébert, G. Seisson, J.-L. Ruller, I. Bertron, L. Hallo, J.-M. Chevalier, C. Thessieux, F. Guillet, M. Boustie, L. Berthe. Philos. Trans. R Soc. London, Ser. A, **375**, 2085 (2017).

[8] G. Seisson, G. Prudhomme, P.-A. Frugier, D. Hébert, E. Lescoute, A. Sollier, L. Videau, P. Mercier, M. Boustie, L. Berthe. Int. J. Impact. Eng., **91**, 68 (2016). DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.012

[9] Р.С. Беликов, И.К. Красюк, Т. Ринеккер, А.Ю. Семенов, О.Н. Розмей, И.А. Стучебрюхов, М. Томут, К.В. Хищенко, А. Шенляйн. Квант. электрон., **45** (5), 421 (2015). [R.S. Belikov, I.K. Krasyuk, T. Rienecker, A.Yu. Semenov, O.N. Rosmej, I.A. Stuchebryukhov, M. Tomut, K.V. Khishchenko, A. Schoenle. Quant. Electron., **45** (5), 421 (2015). DOI: 10.1070/QE2015v045n05ABEH015759]

[10] A. Morena, L. Peroni. Materials, **14**, 7079 (2021). DOI: 10.3390/ma14227079

[11] G. Seisson, D. Hébert, I. Bertron, L. Videau, P. Combis, L. Berthe, M. Boustie. J. Phys. Conf. Ser., **500**, 112057 (2014). DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112057

[12] A.C. Larson, R.B. Von Dreele. *General structure analysis system* (GSAS) (Los Alamos National Laboratory Report, LAUR 86–748, 2004)

[13] С.В. Цыбуля, С.В. Черепанова. *Введение в структурный анализ нанокристаллов*. учебное пособие (НГУ, Новосибирск, 2008)

[14] А.В. Курдюмов, В.Ф. Британ, Н.К. Боримчук, В.В. Ярош. *Мартенситные и диффузионные превращения в углероде и нитриде бора при ударном сжатии* (Куприянова О.О., Киев, 2005)

[15] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. J. Appl. Phys., **43**, 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986

[16] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Физматлит, М., 2008)

[17] N.L. Coleburn. J. Chem. Phys., **40**, 71 (1964). DOI: 10.1063/1.1724896

[18] Р.Ф. Трунин, Л.Ф. Гударенко, М.В. Жерноклетов, Г.В. Симаков. *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ* (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2006)

[19] E.B. Zaretsky, G.I. Kanel. J. Appl. Phys., **117**, 195901 (2015). DOI: 10.1063/1.4921356

[20] T. Antoun, L. Seaman, D.R. Curran, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin. *Spall Fracture* (Springer, 2003)

[21] G.I. Kanel. Intern. J. Fracture, **163** (1–2), 173 (2010). DOI: 10.1007/s10704-009-9438-0