# 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 МРа 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  $5 \cdot 10^3 \, {
m s}^{-1}$ . 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

| 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 $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>             | 2.247     | 2.243     |
| Коэффициент преимущественной ориентации R                      | 1.05      | 1.03      |
| Степень трехмерной упорядоченности Р <sub>3</sub>              | 0.48      | 0.41      |
| Степень трехмерной упорядоченности $P_3^*$                     | 0.59      | 0.47      |
| Концентрации политипных дефектов деформационного типа $\alpha$ | 0.11      | 0.03      |
| Концентрации политипных дефектов ростового типа $\sigma$       | 0.19      | 0.10      |
| Концентрации турбостратных дефектов $\gamma$                   | 0.41      | 0.53      |

| Таблица | 1 | Определенные | в холе знациза | структурные | параметры | графитор | МПГ-8 1  | л И-З |
|---------|---|--------------|----------------|-------------|-----------|----------|----------|-------|
| гаолица |   | Определенные | в лоде анализа | структурные | параметры | трафитов | 101111-0 | 1 H-J |



Рис. 1. Микроструктуры графитов при увеличении 10×; *а* — 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 °С. 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 коксовнаполнителей. 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  $\rho_{sample}$  — плотность исследуемого образца,  $\rho_{theor}$  — теоретическая плотность материала. При расчете пористости была использована плотность беспористого графита  $\rho_0 = 2.265$  g/cm<sup>3</sup>.

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 CuK $\alpha$ , Niфильтр. Дифрактограммы фиксировались в диапазоне углов  $2\theta$  10° – 165° 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  $\rho$  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 с) и заметной концентрации турбостратных и политипных дефектов упаковки. Концентрации турбостратных дефектов ( $\gamma$ ), политипных дефектов ростового ( $\delta$ ) и деформационного ( $\alpha$ ) типов, как и степени трехмерной упорядоченности P<sub>3</sub> и P<sub>3</sub><sup>\*</sup> рассчитаны по формулам, приведенным в работе [14]. Степень трехмерной упорядоченности Р<sub>3</sub> 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× увеличении. Как видно на рис. 1, *a*,

| Характеристика графита                              | МПГ-8 | И-3     |  |
|---|-------|---------|--|
| Измеренная плотность $ ho_{00}$ , g/cm <sup>3</sup> | 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, µт                                    | 8-10  | 8-10    |  |
| Модуль упругости, GPa                               | 11    | 11      |  |
| Предел прочность при изгибе,<br>MPa, не менее       | 50    | 55-58   |  |
| Предел прочности при сжатии,<br>MPa, не менее       | 90    | 90      |  |

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

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 µт. 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  $20 \, \mu m$ . 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.

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 µm).

Ударно-волновое нагружение графитовых образцов проводилось на пневматической пушке ПП-50, с помощью которой медный (Cu) ударник толщиной 2 mm разгонялся до скоростей  $(230 \pm 10)$ ,  $(350 \pm 10)$ ,  $(440 \pm 10)$ и  $(520 \pm 10)$  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  $\sim 1$  ns и пространственное разрешение  $\sim 0.1$  mm.

# 2. Определение ударной сжимаемости исследуемых графитов

На рис. 2 представлены результаты регистрации профилей скорости свободной поверхности в ударноволновых 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  $\sigma_{HEL} = 196$  МРа, для И-3  $\sigma_{HEL} = 195$  МРа. 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  $V_0 = 1/\rho_0$  ( $\rho_0$  — плотность сплошного графита, равная 2.265 g/cm<sup>3</sup>), U<sub>S</sub> — скорость ударной волны в сплошном веществе,  $u_p$  — массовая скорость сплошного вещества. Давление Р 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  $U_S = 3.95 + 2.03 u_p$ . 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  $V_{00} = \frac{1}{\rho_{00}} (\rho_{00}$  — 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 ир 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,  $\Delta t$  — разница между выходом на свободную поверхность упругой волны и волны уплотнения, как это показано на рис. 2. Полученные значения максимальной скорости свободной поверхности и<sub>max</sub> и скорости волны уплотнения U<sub>S1</sub> 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].

| N₂    | $h_s$ , mm | V <sub>imp</sub> , m/s | <i>h</i> <sub><i>imp</i></sub> , mm / материал | $\Delta t$ , ns | U <sub>S1</sub> , km/s | $\Delta u_{fs}, \mathrm{m/s}$ | $\sigma_{sp}$ , MPa | <i>u</i> <sub>max</sub> , m/s | <i>u<sub>pl</sub></i> , m/s | $\sigma_{\rm max},{ m GPa}$ |
|-------|------------|------------------------|--|-----------------|------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 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                        |
| ΜΠΓ-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                        |

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

Примечание:  $h_s$  — толщина образца,  $V_{imp}$  — скорость ударника,  $h_{imp}$  — толщина ударника,  $\Delta t$  — разница времени между выходом упругой волны и волной уплотнения,  $U_{S1}$  — скорость волны уплотнения,  $\Delta u_{fs}$  — амплитуда откольного импульса,  $\sigma_{sp}$  — 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 скоро-

стями ударников, и построенные зеркально отраженные адиабаты сплошного графита, выходящие из экспериментально определенных значений максимальной скорости свободной поверхности итах. При пересечении зеркально отраженной адиабаты меди с 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 катериала. 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  $\Delta u_{fs}$  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]:

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

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  $\rho_0$  — плотность сплошного графита, равная 2.265 g/cm<sup>3</sup>,  $c_b = 3.95$  km/s — объемная скорость звука сплошного графита, взятая из аппроксимации данных для сплошного графита, показанная на рис. 4. Измеренные значения  $\Delta u_{fs}$  и определенные значения  $\sigma_{sp}$  суммированы в табл. 3. Как показал анализ полученных волновых профилей (рис. 2), для

графита МПГ-8 наблюдается тенденция роста значения  $\Delta u_{fs}$  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 напряжение 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 ударноволновых 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  $\sigma_{HEL}$ регистрируются при  $\sigma_{\rm max} \sim 0.5\,{\rm GPa}$  и составляют для графита МПГ-8 196 МРа для И-3 — 195 МРа. 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 МРа, в то время как графита И-3 практически не изменяется и находится в диапазоне 110-140 МРа.

#### Финансирование работы

Работа выполнена рамках контракта R N⁰ 17706413348210001380/22398/89 23 ОТ мая 2023 г. и Госзадания Минобрнауки России по программе "Комплексное исследование физикохимических свойств и процессов в веществе в условиях высокоэнергетических воздействий", регистрационный № 124020600049-8.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- 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. Бритун, 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 ударноволновому 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