

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНОГО ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СИНТАКТНУЮ ПЕНУ С ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВОЙ ИЗ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОГО КАУЧУКА

© Д. Н. Садовничий¹, Ю. М. Милехин¹, Ю. Г. Калинин^{2,3}, Е. Д. Казаков^{2,3},
К. Ю. Шереметьев¹, М. Б. Марков³, Н. В. Перцев¹, Д. И. Крутиков²

¹ Федеральный центр двойных технологий «Союз»,
140090, Московская обл., г. Дзержинский, ул. Академика Жукова, д. 42

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

³ Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН»,
125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4
E-mail: soyuz@fcdt.ru

Поступила в Редакцию 3 февраля 2021 г.

После доработки 12 августа 2021 г.

Принята к публикации 8 сентября 2021 г.

С использованием методов электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и электронно-оптической хронографии с наносекундным временным разрешением исследованы закономерности воздействия пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» на синтактную пену, образованную стеклянными микросферами, распределенными в эластичной полимерной матрице из отвержденного бутадиен-нитрильного каучука, усиленной волокнами хризотил-асбеста. Установлено, что при воздействии импульсного (~100 нс) электронного пучка мощностью 6.2–7.55 ГВт и энергией электронов до 310 кэВ на поверхности синтакта образуется кратер с характерными оплавленными вкраплениями, а начальная скорость разлета газоплазменных образований достигает 19 км·с⁻¹. Продукты абляции содержат кластеры из фрагментов стеклосфер, коротких волокон хризотил-асбеста и полимерного связующего. Показано, что в результате действия высоких температур и давлений от воздействия пучка релятивистских электронов происходит разрушение стеклосфер, а также изменение фазового состава синтакта.

Ключевые слова: синтактная пена; стеклосферы; пучок релятивистских электронов; фазовые переходы; пиролиз; радиационная стойкость

DOI: 10.31857/S0044461821080132

Синтактные пены (сферопластики) благодаря низким значениям плотности, диэлектрической проницаемости и теплопроводности находят широкое применение в технике [1–3]. Недавно проведенные эксперименты показали, что воздействие пучка

релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» (Институт атомной энергии им. Курчатова) [4] или ударной волны от заряда взрывчатого вещества [5] на синтактные пены с полимерной основой из блок-сополимера полифенилсилесквioxсана с по-

лидиметилсилоксаном может сопровождаться не только разрушением микросфер и уносом облучаемой поверхности образца, но и формированием на поверхности разрушенных микросфер нитевидных структур (вискеров) диаметром от 500 до 30 нм. Квазистатические и ударные нагрузки с длительностью фазы сжатия ~ 1 мс вызывают разрушения микросфер в синтактной пене, но не приводят к образованию нитевидных структур [6].

Пиролиз полифенилсилесквиоксановых каучуков сопровождается образованием термостойких оксидов, карбидов, оксикарбидов кремния [7, 8], которые способны конденсироваться на стенках разрушенных ударной волной микросфер. Очевидно, что химическая природа применяемого каучука во многом определяет особенности изменения механических и реологических свойств синтактной пены при повышении температуры и величины поглощенной дозы, а также ее теплозащитные свойства.

В свете сказанного представляет интерес изучение воздействия пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» на синтактные пены на основе стеклянных микросфер и полимерного связующего из каучука, не содержащего конденсированных продуктов пиролиза. Бутадиен-нитрильные каучуки склонны к термовулканизации за счет образования системы сопряженных связей, что затрудняет их текучесть при поглощении энергии релятивистских электронов; кроме того, при их пиролизе практически не образуются конденсированные продукты [9, 10]. Проведение экспериментов с синтактной пеной на основе бутадиен-нитрильного эластомера позволит проверить гипотезу о решающей роли состава продуктов пиролиза полимерного связующего при коллапсе микросферы как необходимой стадии для образования нитевидных структур.

Цель работы — изучение кинетики уноса и изменения фазового состава синтактной пены на основе бутадиен-нитрильного каучука, стеклянных микросфер и хризотил-асбестовых волокон, вызванных однократным воздействием пучком релятивистских электронов мощностью до 7.5 ГВт.

Экспериментальная часть

В экспериментах использовали образцы синтактной пены с полимерной основой из отвержденно-го низкомолекулярного бутадиен-нитрильного каучука СКН-10КТР (ФГУП «НИИСК»), усиленной термостойким хризотил-асбестовым волокном (АО «Оренбургские минералы») (8 мас%); стеклянные микросферы МС-А9 (ООО «ЕЗИМ») имели диаметр 30–

130 мкм. В качестве системы отверждения использовали эпоксидную смолу ЭД-20 (НПК «Синтек») и хиноловый эфир ЭХ-1 (х.ч., ООО «Ангара-реактив»). Толщина стеклянной стенки микросфер 2–2.5 мкм. Массовая доля стеклосфер составляла 23%. Плотность синтактной пены — $830 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Образцы синтактной пены изготавливали по традиционной для многих резиновых смесей безвальцовой (в данном случае заливочной) технологии [11]. Для исключения воздушной пористости неотвержденную массу в пресс-форме вакуумировали. Отверждение проводили в условиях постоянного объема при температуре в пресс-форме 373 К в течение 7 ч и 433 К в течение 6 ч. Качество изготовленных образцов контролировали методами растровой электронной микроскопии.

Образцы синтактной пены размером 35×35 мм и толщиной (h) 6.5 мм облучали в вакуумируемой камере-ускорителе «Кальмар» одиночным воздействием пучка релятивистских электронов. Температура облучения комнатная. Образцы устанавливали на подложке из органического стекла (толщиной 4 мм), закрепленной в аноде из стали 12Х18Н10Т. Анод имел боковую щель для наблюдения кинетики абляции. Пучок релятивистских электронов длительностью на полувысоте около 100 нс формировался в диоде ускорителя (остаточное давление не хуже 10^{-2} Па); использовались катоды из латуни ЛС59-1. Зазор между катодом и поверхностью мишени составлял 8–10 мм [12]. Особенности проведения экспериментов на ускорителе «Кальмар» и техника измерений параметров пучка подробно изложены в работе [13].

Радиальное распределение энерговклада от пучка релятивистских электронов по площади мишени определялось по рентгеновским фотографиям, полученным с помощью рентгеновской камеры обскуры, расположенной за образцом. Типичная форма распределения энерговклада в экспериментах близка к гауссовой с плоским участком вблизи оси пучка (рис. 1, вставка б, кривая 3).

Распространение катодной и анодной плазмы вдоль оси диода ускорителя «Кальмар» исследовали методом теневого лазерного зондирования на длине волны 540 нм. Регистрация теневых изображений проводилась методом электронно-оптической хронографии с помощью камеры СФЭР-6 (ФГУП «НИИ Импульсной техники»). Применение такой диагностики позволило регистрировать перемещение границ плазменных образований концентрацией порядка 10^{18} см^{-3} , а также визуализировать продольные градиенты электронной плотности.

Образцы синтактной пены до и после воздействия пучка релятивистских электронов взвешивали на аналитических весах ВЛР-20 (НПП «Госметр») с абсолютной погрешностью $7.5 \cdot 10^{-5}$ г.

Эксперименты по определению фазового состава синтактной пены до и после воздействия пучка релятивистских электронов проводили в кварцевой кювете методом рентгеновской дифракции на дифрактометре D2 PHASER (Bruker) в излучении $\text{CuK}\alpha$ с длиной волны 0.154 нм. Регистрацию дифрактограмм проводили в интервале углов $2\theta = 0.05^\circ$ и выдержкой в точке 1 с. Рабочее напряжение 30 кВ, ток 10 мА. Обработку дифрактограмм выполняли с помощью программного обеспечения DIFFRAC.EVA (Bruker) и базы данных ICCD PDF-2 (2012).

Морфологические исследования поверхности разрушения образцов синтактной пены после воздействия пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» выполнены с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6490 (JEOL Ltd). Специальное антистатическое напыление на образцы синтактов не наносили.

Осциллограммы напряжения и тока пучка релятивистских электронов, реализованных в экспериментах режимов работы ускорителя, характеризуют соответственно распределения во времени энергии ускоренных электронов и их количество в текущий момент времени (рис. 1). Мощность пучка релятивистских электронов для каждого момента времени t рассчитывалась как произведение мгновенных значений ускоряющего напряжения $U(t)$ и величины тока $I(t)$ (табл. 1). До начала абляции лазерное излучение проходит через диод беспрепятственно (рис. 1, левая часть вставки *a*), а в дальнейшем разлетающаяся плазма начинает полностью или частично перекрывать зондируемую область между катодом (К) и образцом (А) (рис. 1, правая часть вставки *a*). Поле наблюдения не захватывает двухмиллиметровую область вблизи образца.

После одиночного воздействия пучка релятивистских электронов в образцах изучаемого синтакта формировался кратер глубиной 1.2–1.25 мм.

Разлет газоплазменных образований (абляция) начинается не позднее чем через 50 нс после начала формирования тока в диоде ускорителя (рис. 1,

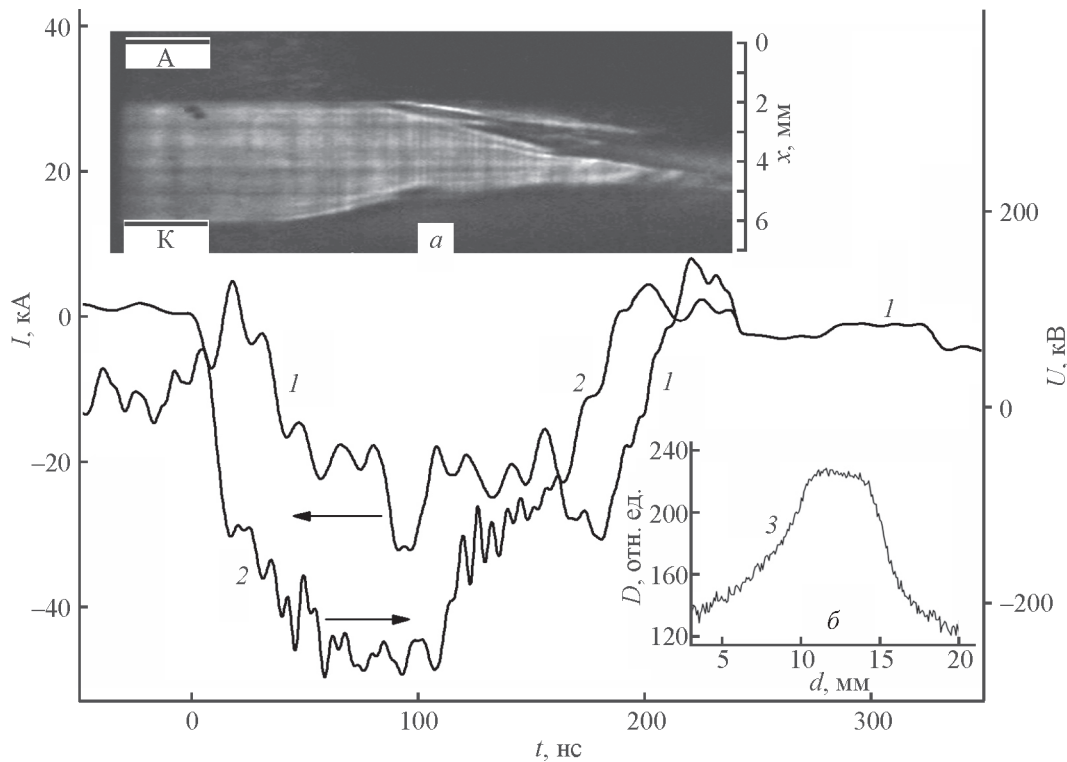


Рис. 1. Осциллограммы тока (I) и напряжения (U) на диоде ускорителя «Кальмар», синхронизированная с током электронно-оптическая хронография теневого лазерного зондирования пространства между катодом (К) и анодом (А) (вставка *a*).

Вставка *b* — радиальное распределение плотности пучка электронов (D) по диаметру пучка (d) по данным камеры обскуры.

Таблица 1

Параметры экспериментов на ускорителе «Кальмар», толщина и унос массы синтактной пены после воздействия пучка релятивистских электронов

Опыт	Плотность потока энергии электронов на всей площади облучаемой поверхности, Дж·см ⁻²	Максимальная мощность пучка электронов, ГВт	Площадь облучения на участке почти равномерного тока пучка электронов (в пределах 15%) S_{eq} , см ²	Амплитуда тока пучка электронов, соответствующая площади S_{eq} , кА	Средняя энергия электронов, кэВ	Длительность облучения на полувывоте амплитудного значения тока τ_0 , нс	Уносимая масса, г
ОР_4	210	7.55	0.13	28.0	250	114	0.1473
ОР_5	190	6.45	0.28	23.0	257	134	0.1488
ОР_6	190	6.26	0.30	22.4	232	137	0.1376

вставка *a*). Средняя скорость абляции с поверхности образца составляет $19 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. Вблизи поверхности синтакта наблюдаются осцилляции образования плазмы с характерным временем несколько наносекунд (рис. 1, вставка *a*). Наиболее возможной причиной наблюдаемой неравномерности плазмы следует считать изменение состава продуктов абляции изучаемой синтактной пены.

На поверхности кратеров, образованных пучком релятивистских электронов, не обнаружены стеклосферы или их осколки, однако имеются оплавленные образования неправильной формы (рис. 2, *a*), а также фрагменты пучков хризотил-асбестовых волокон (рис. 2, *b*).

Неожиданным оказался факт оседания на катоде кластеров продуктов абляции синтактной пены, состоящих из полимерной основы, осколков стеклосфер и хризотил-асбестовых волокон (рис. 3). Ранее в экспериментах по воздействию наносекундных потоков лазерного излучения показано, что при абля-

ции полимерных материалов за фронтом ударной волны фиксируется разлет твердых частиц малого размера [14–17]. Отметим, что в работе [4], где пучок релятивистских электронов воздействовал на синтактную пену на основе кремнийорганического полимерного связующего, подобных особенностей не обнаружено.

Микрофотографии объема синтактной пены получены методами растровой электронной микроскопии по изготовленным разломам или разрезам, проходящим через центральную область облучения. На микрофотографиях видны разрушения стеклосфер на множество частей, однако образования вискеро-в на внутренней поверхности стеклосфер не обнаружено (рис. 4). Как и в [4], на внутренней поверхности некоторых стеклосфер встречаются бугристые структуры, похожие на застывшие капли, которые свидетельствуют о реализации достаточно высокой температуры при коллапсе стеклосферы. На глубине 1 мм в области центра кратера разрушения стекло-

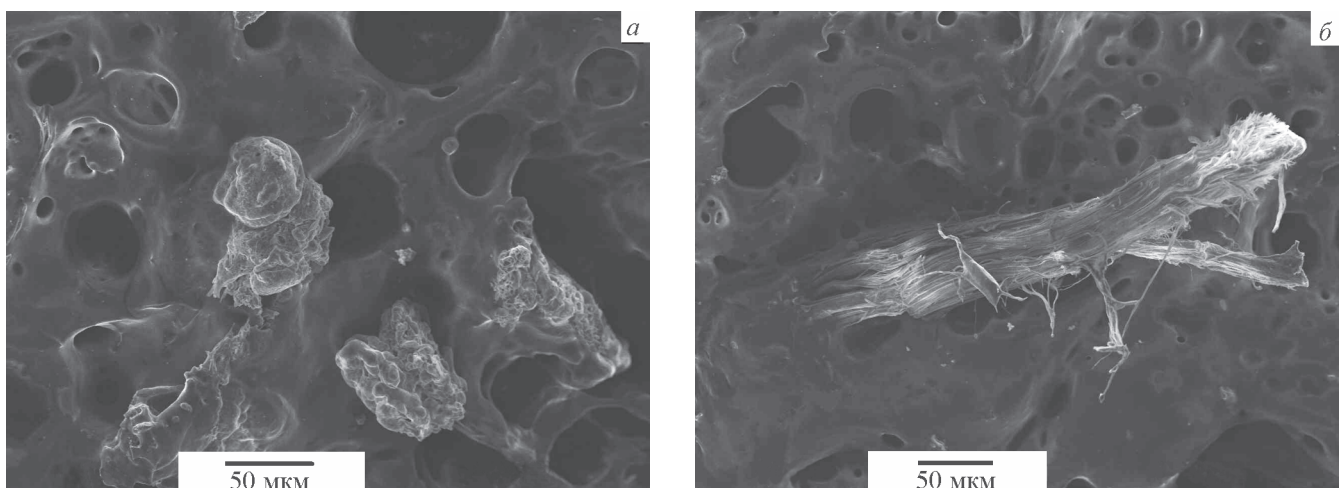


Рис. 2. Микрофотографии поверхности образца в области кратера после воздействия пучка релятивистских электронов.

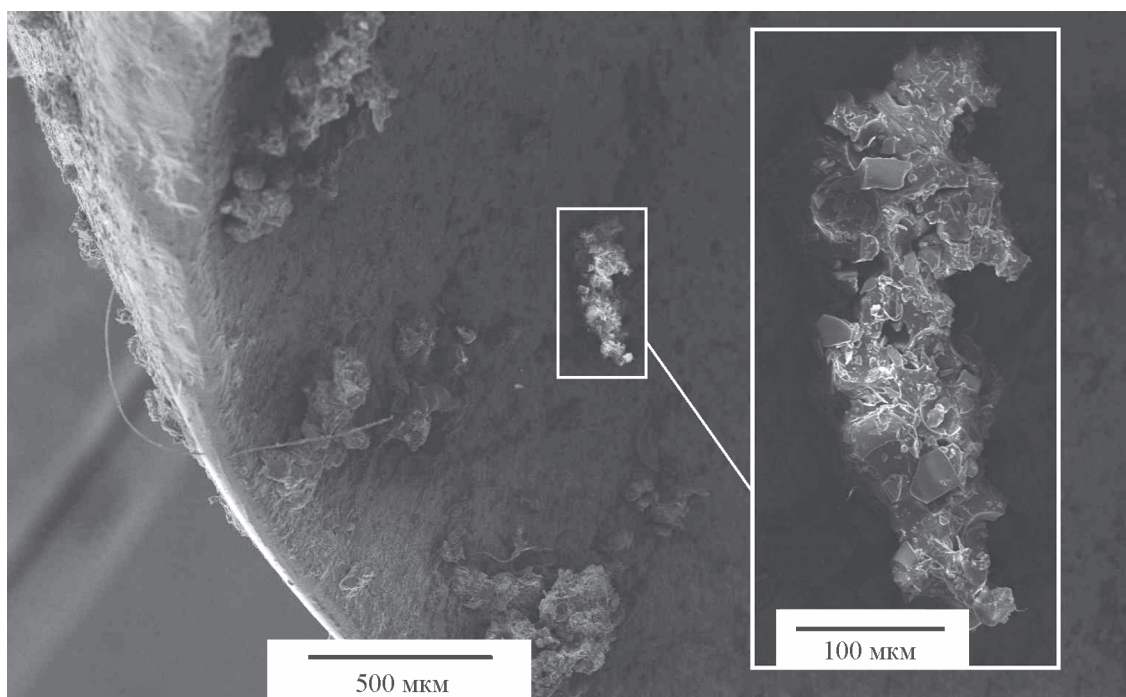


Рис. 3. Микрофотография поверхности катода с осевшими кластерами продуктов абляции синтактной пены.

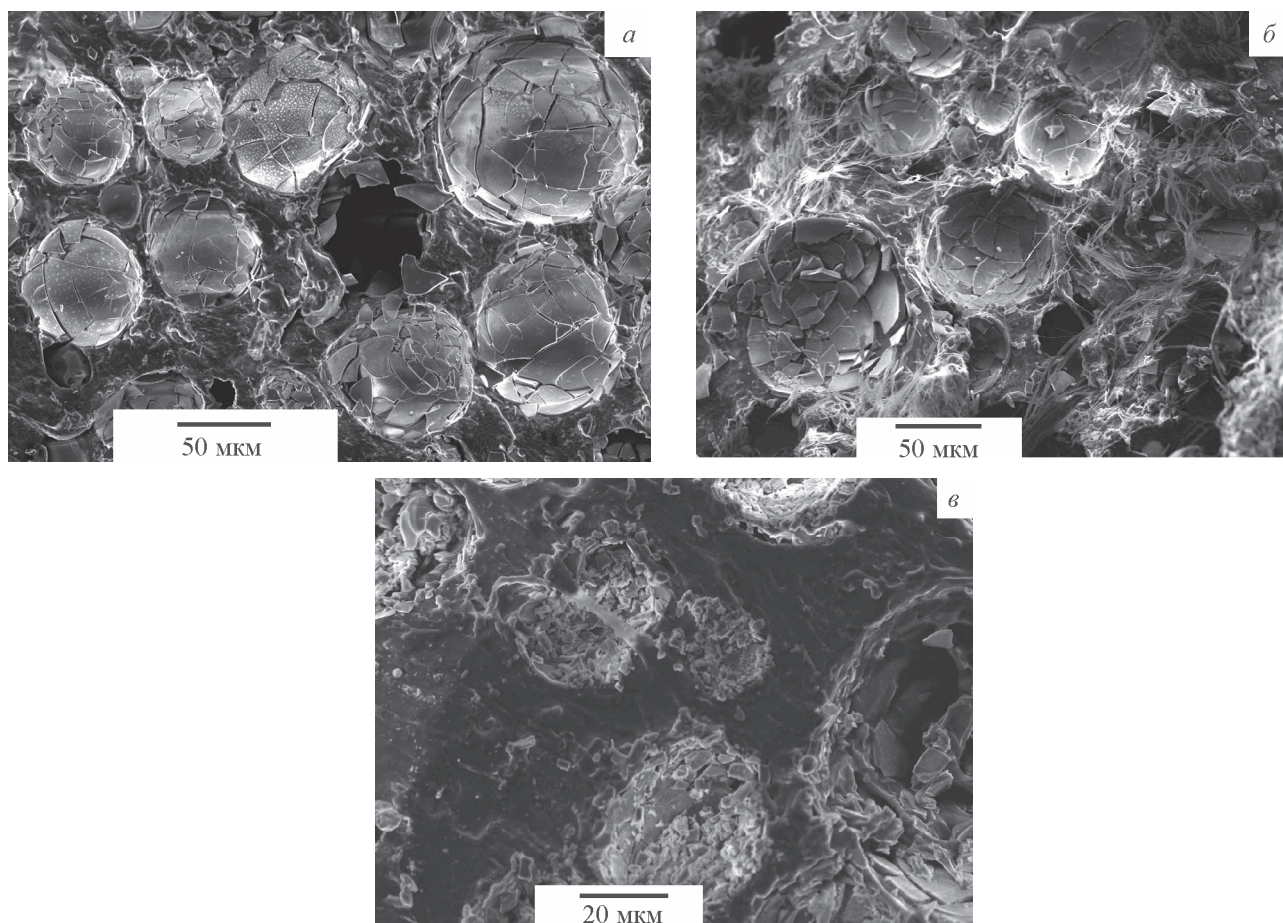


Рис. 4. Микрофотографии разреза в средней части образца на оси (а), периферии (б) и на глубине 1 мм в области центра кратера (в) после однократного воздействия пучка релятивистских электронов.

сфер столь значительны, что обнаружить формирование каких-либо дополнительных образований не представляется возможным (рис. 4, в). Отметим, что на расстоянии более 10 мм от границы кратера в образцах после воздействия пучка релятивистских электронов разрушения стеклосфер практически отсутствовали.

Методом рентгеновской дифракции были получены дифрактограммы исходной синтактной пены после воздействия на нее пучка релятивистских электронов, а также дифрактограммы стеклосфер и хризотил-асбестового волокна (рис. 5). Дифрактограмма бутадиен-нитрильного каучука обусловлена его аморфной структурой и характеризуется широкой линией с максимумом при $2\theta = 20^\circ$ (межплоскостное расстояние 0.454 нм) [18]. Дифрактограмма изучаемой синтактной пены представляет собой наложение

широких дифракционных полос, характерных для аморфных структур полимерного связующего и стеклосфер, с рефлексами кристаллической структуры хризотил-асбестового волокна, сформированного в основном гидросиликатом магния (природный хризотил) $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. Полученные дифрактограммы отечественного хризотил-асбестового волокна достаточно хорошо совпадают с результатами изучения асбестовых волокон, изготавливаемых из минерального сырья Италии и Канады [19].

Воздействие пучка релятивистских электронов (рис. 5) вызывает некоторое смещение положения наиболее интенсивного дифракционного максимума хризотил-асбестового волокна в синтактной пене (до облучения 0.735 нм, после — 0.752 нм), а также небольшое повышение расчетной величины содержания кристаллической фазы с 20.3 в исходном образце до

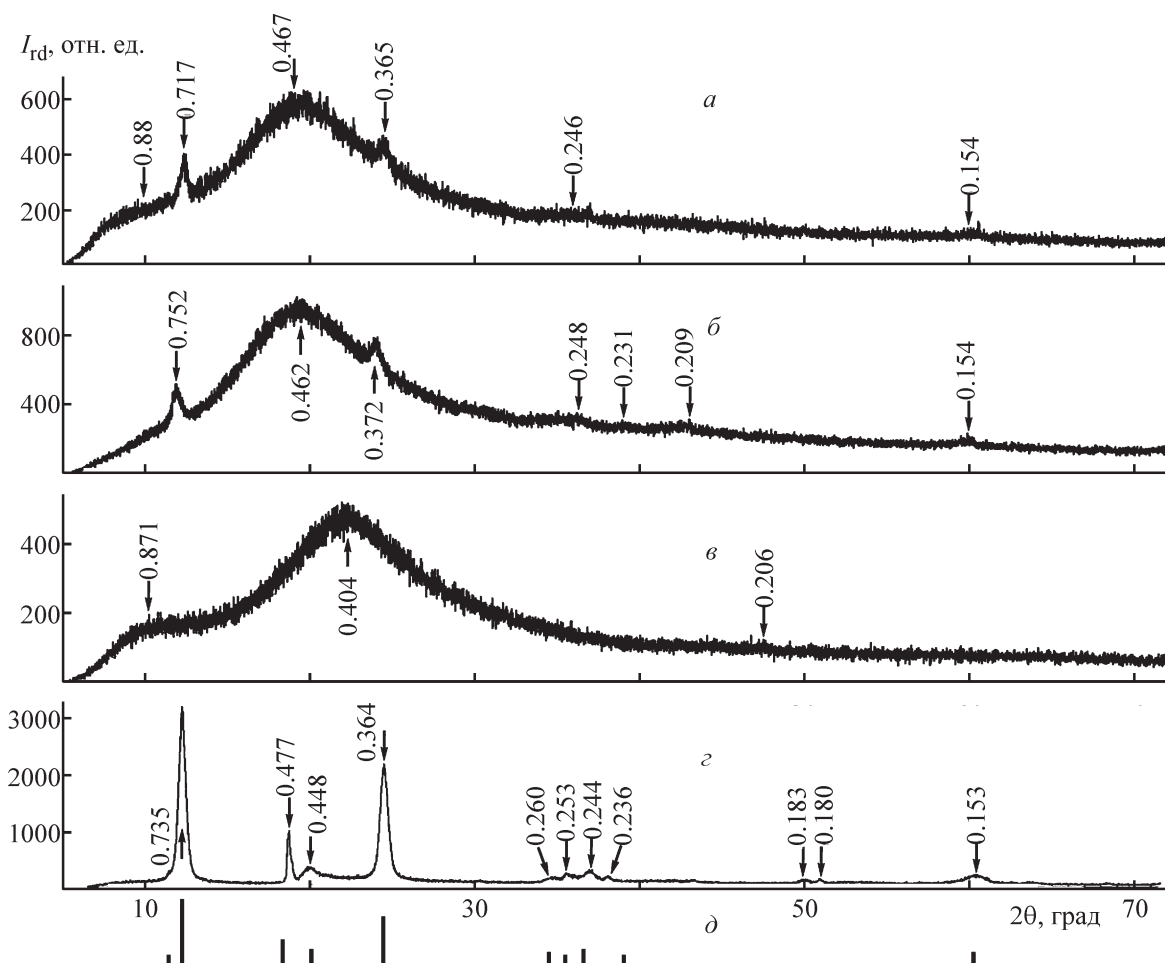


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы исходного синтакта (а), после воздействия пучка релятивистских электронов в слое на глубине 1 мм с облученной поверхности (б), стеклосфер (в), асбестового волокна (г) и природного хризотила (δ).

Цифры у кривых — межплоскостное расстояние (нм).
Дифрактограмма δ взята из базы данных ICDD PDF-2 (2012).

23.1% после облучения. Кроме того, наблюдается исчезновение «плеча» при углах $2\theta \sim 10^\circ$, которое также присутствует в дифрактограмме стеклосфер и соответствует межплоскостному расстоянию ~ 0.87 нм. Отметим, что форма и положение максимума других дифракционных полос практически не изменяются. Наиболее интересно вызванное воздействием пучка релятивистских электронов появление на дифрактограмме синтактной пены линии при $2\theta \sim 43^\circ$ (межплоскостное расстояние ~ 0.209 нм).

Обсуждение результатов

Наличие в синтактной пене полых стеклосфер понижает ее плотность и увеличивает глубину проникновения пучка релятивистских электронов. Вопрос точного расчета полей поглощенных доз при воздействии пучка релятивистских электронов на диэлектрические полимерные мишени остается достаточно сложным, в первую очередь из-за генерации вторичных электромагнитных полей, способных изменить глубину проникновения высокоэнергетических электронов и пространственное распределение поглощенной дозы [20, 21]. Однако для относительно малых плотностей потока релятивистских электронов, которые нами реализованы в экспериментах, влиянием электрического поля на пробег электронов можно пренебречь [22]. Кроме того, радиационно-индуцированная электропроводность синтактных пен более чем на два порядка величины превосходит радиационную электропроводность полимеров [23], что будет еще больше снижать уровень напряженности наведенных релятивистскими электронами электрических полей.

Численное моделирование переноса релятивистских электронов в изучаемых образцах выполнено методом Монте-Карло (программный код XRAY) с детальным прослеживанием быстрых электронов до энергии 1 кэВ [24]. Разыгрывали 10^7 историй первичных частиц. За глубину пробега электронов

(L) принимали толщину мишени, на которой пучок релятивистских электронов ослабляется на три порядка. Поглощенная доза электронного излучения на один падающий электрон пучка на поверхности образца обозначена D_0 , а при достижении максимума поглощенной дозы — D_{\max} . Глубина синтактной пены, на которой достигается максимум скорости термализации электронов пучка, обозначена L_p (табл. 2, рис. 6). Скорость термализации электронов пучка представляет собой производную по пространственной координате от плотности тока пучка в расчете на один электрон (J) и позволяет характеризовать распределение избыточного объемного электрического заряда [25, 26]. При близких значениях плотности падающего потока пучка релятивистских электронов распределение поглощенной дозы электронного излучения по толщине синтакта заметно различается (рис. 6), а поглощенная доза электронного излучения на поверхности достигает 56–99 МГр (рис. 6,

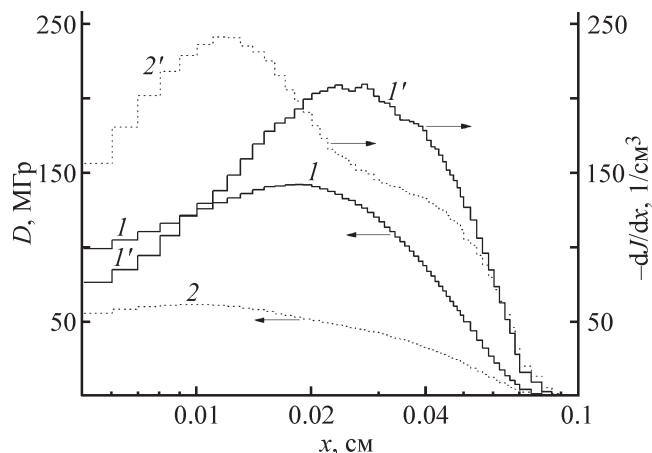


Рис. 6. Распределение поглощенной дозы электронного излучения (1, 2) и скорости термализации электронов в расчете на один электрон пучка (1', 2') при воздействии пучка релятивистских электронов в опытах ОП4 (1, 1') с плотностью потока энергии $210 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ и ОП5, ОП6 (2, 2') с плотностью потока энергии $190 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$.

Таблица 2

Оценки распространения пучка релятивистских электронов в синтактной пене

Опыт	Глубина пробега электронов L , мкм	Глубина, на которой достигается температура 1000 К, L_T , мкм	Глубина, на которой достигается максимум скорости термализации электронов пучка, L_p , мкм	Поглощенная доза на поверхности в расчете на один падающий электрон пучка, $\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$	Максимальное значение поглощенной дозы в расчете на один падающий электрон пучка, $\text{МэВ} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$
ОП_4	890	820	250	2.90	5.95
ОП_5	930	810	120	3.28	5.68
ОП_6	940	830	140	3.56	5.45

кривые 1, 2). Тем не менее унесенная при абляции масса слабо зависит от особенностей распределения поглощенной дозы электронного излучения по глубине образца.

Расстояние от облучаемой поверхности, на котором достигается температура 1000 К, обозначим L_T (теплоемкость $1550 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$). В проведенных экспериментах фактически реализованный энергетический спектр релятивистских электронов незначительно сказывается на величинах L и L_T (в пределах 10–12%), тогда как величина L_p в опытах изменяется в 2 раза (табл. 2).

Поскольку пиролиз бутадиен-нитрильного каучука при скорости нагрева $10 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$ начинается при температуре 600 К [9], в условиях быстрого нагрева при температуре 1000 К следует ожидать завершения деструкции полимерного связующего. Температура плавления стеклосфер оценивается в 1600 К по данным [1, 27]. Термическое разложение хризотил-асбеста сопровождается реакцией дегидроксилирования при 933 К с образованием форстерита Mg_2SiO_4 , а далее при 1043–1073 К образуются тугоплавкие энстатит $\text{Mg}_2(\text{SiO}_3)_2$ и SiO_2 [19, 28]. Повышение температуры образца в слое толщиной 100 мкм за счет поглощения энергии пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» превышает 4000 К. Такой температуры вполне достаточно для плавления и сублимации не только полимерной основы, но и использованных наполнителей.

Быстрый нагрев образца при неизменном объеме вызывает повышение давления. Оценку возникающего давления в ударной волне (P) при изохорическом нагреве от воздействия релятивистских электронов легко получить: $P = D(0)\rho_0\Gamma$, где $D(0)$ — поглощенная доза на поверхности, Γ — эффективный коэффициент Грюнайзена, который характеризует повышение давления при изохорическом нагреве гетерогенных сред. Отклонение от изохорического нагрева связано с разгрузкой у свободной поверхности образца. Экспериментальные исследования показали, что в ударно сжатом синтакте продольная скорость звука составляет $c_0 = 840 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [29], поэтому за время действия пучка релятивистских электронов акустическая разгрузка будет сказываться только на поверхностном слое толщиной менее 15 мкм, что значительно меньше глубины зоны энерговыделения. Экспериментально получено, что эффективный коэффициент Грюнайзена в условиях действия пучка электронов ускорителя «Кальмар» для синтактных пен зависит от объемной доли стеклосфер и для изучаемой пены составляет 0.3 [30]. Тогда оценка давления в опыте ОП_4 составит $\sim 20 \text{ ГПа}$, а в опытах ОП_5 и

ОП_6 — $\sim 9 \text{ ГПа}$. Такого давления вполне достаточно для разрушения стеклосфер [27, 29]. Первоначальная временная форма ударной волны будет практически совпадать с темпом энерговыделения от воздействия пучка релятивистских электронов.

Распространение ударно-волнового процесса в образце сопровождается формированием растягивающих напряжений, способных вызвать откольное разрушение [31, 32]. Отметим, что глубина кратера, образованного пучком релятивистских электронов в изучаемой синтактной пене, превышает не только величину L_T , но и L . Наблюдение фрагментов стеклосфер и хризотил-асбестовых волокон на катоде свидетельствует о том, что при воздействии электронного пучка имел место механический отрыв кластеров от поверхности синтактной пены. Откольная прочность синтактных пен при растяжении достаточно мала — $\sigma_{от} \leq 200 \text{ МПа}$ [29, 33]. Для оценки величины возникающего механического импульса давления (I_m) при реализации откольного разрушения можно воспользоваться формулой [34]

$$I_m = \frac{\Gamma}{2} \int_0^{m_f} \frac{D(m)}{\sqrt{c_0^2 + \Gamma(\Gamma + 1)D(m)}} dm,$$

где $D(m)$ — функция энерговыделения в зависимости от массовой координаты (m); Γ — эффективный коэффициент Грюнайзена; m_f — массовая координата внутренней границы отколовшегося слоя, которая определяется из уравнения $\Gamma\rho_0 D(m) = 2\sigma_{от}$.

При оценках I_m эффективный коэффициент Грюнайзена принимали 0.3. Получено, что $I_m \approx 1260 \text{ Па} \cdot \text{с}$ в опыте ОП_4 и $I_m \approx 800 \text{ Па} \cdot \text{с}$ в опытах ОП_5 и ОП_6. Величина m_f совпадает с глубиной пробега релятивистских электронов в синтакте. Отметим, что значение I_m уменьшается в пределах 5% при увеличении $\sigma_{от}$ до 2000 МПа. Считая, что длительность воздействия растягивающих напряжений совпадает с τ_0 , получим верхнюю оценку возникающего давления, которое в опыте ОП_4 не превышает $\sim 10 \text{ ГПа}$, а опытах ОП_5 и ОП_6 составляет $\sim 5.9 \text{ ГПа}$. Полученные оценки почти в 2 раза ниже, чем ожидается в условиях изохорического нагрева. Таким образом, откольное разрушение облучаемой поверхности синтактной пены вполне возможно на глубину пробега релятивистских электронов, а уровни возникающего давления достаточны для разрушения стеклосфер.

Итак, в условиях воздействия пучка релятивистских электронов начало процесса абляции следует связывать с сублимацией полимерного связующего синтактной пены. Образование кратера и особенно-

сти оседания на катоде кластеров в основном связаны с последующим откольным разрушением, вызванным превышением растягивающими напряжениями уровня прочности синтакта при ударно-волновых нагрузках от действия электронного пучка. С учетом того что параметры откольного разрушения выполняются уже в процессе воздействия релятивистских электронов, когда уже происходит сублимация образца, глубина кратера вполне может превышать максимальный пробег релятивистских электронов. Остывание поверхности кратера формирует отмеченную экспериментально морфологию его поверхности. Отметим, что большая по сравнению с диаметром длина хризотил-асбестового волокна будет способствовать неравномерному прогреву и, следовательно, удержанию части волокон на поверхности кратера.

Распространяющийся по образцу механический импульс давления вызывает разрушение стеклосфер и сжатие образца. Экспериментально показано, что при коллапсе стеклосфер диаметром до 100 мкм в полимерном связующем из эпоксидной смолы, вызванном ударно-волновым воздействием с давлением 2 ГПа, локальное повышение температуры достигает

1600 К за время ~ 300 нс [35]. При ударно-волновом сжатии до 5 ГПа пористого полиуретана достигаются температуры более 1700 К, достаточные для образования газообразных продуктов [36]. Согласно выполненным оценкам, уровень давления и температуры от воздействия пучка релятивистских электронов вполне достаточен для термического разложения полимерной основы во всем объеме синтактной пены.

Оксид кремния при высокой температуре способен вступать в реакцию с углеродом (более 1770–1870 К) или СО с образованием карбида кремния [37]. Продуктами пиролиза хризотил-асбеста являются форстерит Mg_2SiO_4 , энстатит $Mg_2(SiO_3)_2$ и оксид кремния SiO_2 . Пиролиз бутадиен-нитрильного каучука первоначально сопровождается образованием радикалов предположительно у третичного атома углерода, а также в бета-положении к связи $C\equiv N$ [10, 38], которые способны взаимодействовать с образующимися продуктами пиролиза хризотил-асбеста или оксидной основой стекла.

Анализ причин образования линии при $2\theta \sim 43^\circ$ на дифрактограммах синтакта после воздействия пучка релятивистских электронов представляет собой весьма сложную задачу из-за перекрывания характе-

Таблица 3

Кристаллографические параметры полиморфных модификаций неорганических соединений кремния, образование которых возможно в условиях ударно-волнового и температурного воздействий наносекундного пучка релятивистских электронов

№ модификации	Наименование	Группа симметрии	Параметры элементарной ячейки				Число формульных единиц	Объем элементарной ячейки, нм ³
			a, нм	b, нм	c, нм	угол, град		
1	$Mg_2(SiO_3)_2$ орторомбическая	Pcab	1.8251	0.80814	0.5181	—	8	0.83344
2	Mg_2SiO_4 орторомбическая	Pmnb	0.4756	1.0195	0.5981	—	4	0.290
3	Mg_2SiO_4 моноклинная	C2/m	1.033	0.577	0.452	$\beta = 90$	4	0.26159
4	SiC (15R) ромбическая	R3m	0.3073	—	3.77	—	15	0.30832
5	SiC (6H) гексагональная	P63mc	0.3073	—	1.508	—	6	0.12333
6	α -SiC гексогональная	P63mc	0.3074	—	3.77	—	15	0.308
7	SiC (4H) гексогональная	P63mc	0.3081	—	1.0061	—	4	0.08271
8	SiO ₂ кубическая	Fd-3m	0.712	—	—	—	8	0.36094
9	SiO ₂ (тридимит) моноклинная	Aa	0.5006	0.8599	0.8215	$\gamma = 91.502$	8	0.35348

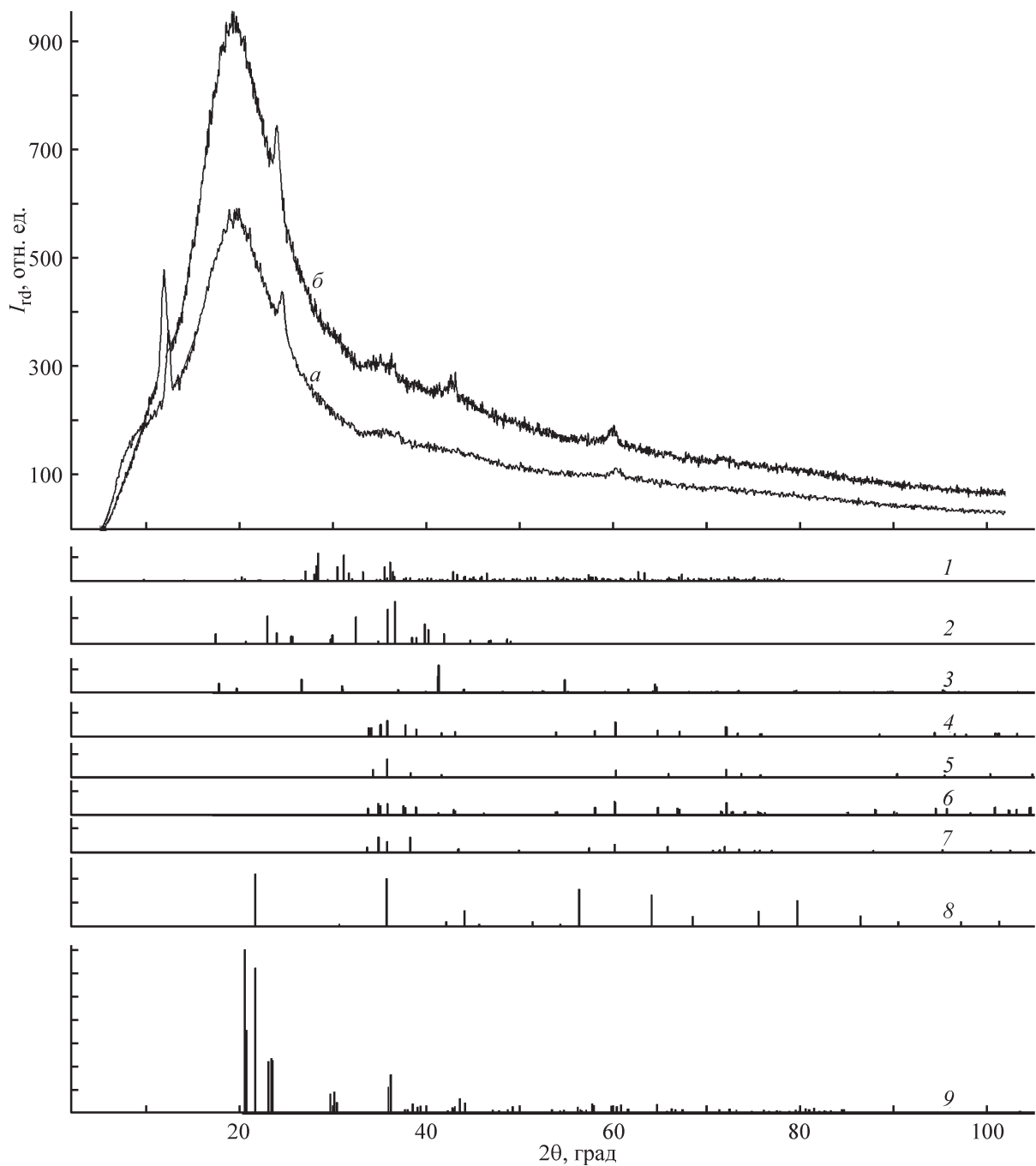


Рис. 7. Рентгенограммы исходной (*a*) и после однократного воздействия пучка релятивистских электронов (*б*) синтактной пены, обработанные по стандартной процедуре фильтрации шумов программного обеспечения DIFFRAC.EVA. Рефлексы полиморфных модификаций неорганических соединений кремния при рентгеновской дифракции по данным ICDD PDF-2 (2012): 1 — $\text{Mg}_2(\text{SiO}_3)_2$ орторомбическая, 2 — Mg_2SiO_4 орторомбическая, 3 — Mg_2SiO_4 моноклинная, 4 — SiC (15R) ромбическая, 5 — SiC (6H) гексагональная, 6 — $\alpha\text{-SiC}$ гексагональная, 7 — SiC (4H) гексагональная, 8 — SiO_2 кубическая, 9 — SiO_2 (тридимит) моноклинная.

ристических линий брэгговского отражения аморфной части синтакта при углах менее 28° и наличия полос хризотил-асбеста в диапазоне углов $34\text{--}38^\circ$. Исследования поведения силикатов, плавленного и пористого SiO_2 при воздействии ударной волны об-

наруживают ряд аномалий по сравнению с пористыми металлами и подробно изложены в обзоре [39]. Фазовые превращения при высоких давлениях остаются предметом активных исследований даже в кристаллическом кварце [40, 41].

Линии при $2\theta \sim 43^\circ$ на дифрактограммах могут соответствовать кристаллическим структурам ряда веществ. Рефлексы наиболее подходящих полиморфных модификаций из ряда возможных структур получены с использованием базы данных ICDD PDF-2 (2012) и представлены на рис. 7, а их кристаллографические параметры — в табл. 3.

Среди многочисленных полиморфных модификаций SiO_2 появление рефлексов в области 43° следует ожидать у кубической (кристобалит, группа Fd-3m) и моноклинной сингоний (группа Aa) SiO_2 . Образование фазы стишовита при ударном воздействии возможно при более высоких давлениях и сопровождается появлением рефлекса при $2\theta \sim 30^\circ$ [40]. Отметим, что для кубической и моноклинной сингоний SiO_2 свойственны более интенсивные рефлексы при углах 2θ от 21 до 25° (рис. 5 и 7), которых в проведенных экспериментах не обнаружено.

Согласно анализу полиморфных модификаций карбида кремния [42, 43], следует ожидать появление рефлекса при углах около 43° (межплоскостное расстояние 0.209 нм) в SiC (15R) и SiC (4H), однако основной рефлекс должен был бы отчетливо проявиться при $2\theta \sim 35.6^\circ$ (межплоскостное расстояние 0.252 нм), где его наблюдение осложняется наличием размытых линий поглощения исходного хризотил-асбеста.

Наиболее вероятным объяснением появления на дифрактограмме линии в области $2\theta \sim 42\text{--}43^\circ$ можно считать частичное дегидроксилирование участков волокон хризотил-асбеста с образованием моноклинной сингонии форстерита Mg_2SiO_4 (группа C2/m) или его орторомбической сингонии (группа Pmnb) [19] (рис. 7).

Исчезновение на дифрактограмме синтактной пены после воздействия пучка релятивистских электронов «плеча» при углах $2\theta \sim 10^\circ$, возможно, свидетельствует о разрушении мезофазных областей в стеклофазе микросфер или разрушении мезофазы, сформированной за счет взаимодействия поверхности стеклосфер с полимерным связующим.

Выводы

Анализ выполненных экспериментов по воздействию пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» с энергией до 310 кэВ и мощностью $6.2\text{--}7.5$ ГВт показал возможность как сублимации (при времени воздействия ~ 50 нс), так и откольного разрушения синтактной пены. Откольное разрушение фрагментов синтакта позволяет объяснить наблюдаемую экспериментально осцилляцию плотности при разлете газоплазменных образований и оседание на

катоде кластеров, содержащих полимерную основу, фрагменты стеклосфер и хризотил-асбестовых волокон.

Формируемое поле энерговыделения создает в сохраненной части образца синтактной пены высокие уровни давления ударной волны — более 5 ГПа и температур — более 1600 К, при которых происходит разрушение стеклосфер и изменение фазового состава синтактной пены.

Растровые электронные микрофотографии разломов и срезов синтактной пены показали, что использование полимерного связующего на основе бутадиен-нитрильного каучука, неспособного к образованию конденсированных продуктов пиролиза, препятствует формированию нитевидных образований (вискерсов) при коллапсе стеклосфер в синтактной пене.

С использованием метода рентгеновской дифракции показана возможность частичного дегидроксилирования волокон хризотил-асбеста с образованием моноклинной или орторомбической сингонии форстерита от воздействия на изучаемую синтактную пену пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар».

Целесообразно отметить, что короткие длительности действия высокого давления способствуют образованию наноразмерных фаз, которые не могут быть идентифицированы методом рентгеновской дифракции.

Благодарности

Эксперименты на установке «Кальмар» выполнены при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 2073 от 09.10.2020). Авторы признательны Д. В. Кондратьевой, А. А. Коптелову, С. А. Малинину и Б. Р. Гафарову за помощь в проведении работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

Д. Н. Садовничий — концепция статьи, литературный поиск, написание статьи, участие в проведении экспериментов по определению фазового состава; Ю. М. Милехин — формирование направления исследований и решаемых задач; Ю. Г. Калинин — формирование концепции проведения экспериментов на ускорителе «Кальмар», задание параметров ускорите-

ля «Кальмар» для транспортировки пучка релятивистских электронов; Е. Д. Казаков — проведение работ по диагностике пучка релятивистских электронов, получение хронограмм теневого лазерного зондирования, написание текста статьи в части описания работ на ускорителе; Д. И. Крутиков — участие в проведении экспериментов на ускорителе «Кальмар», диагностика пучка релятивистских электронов; К. Ю. Шереметьев, М. Б. Марков — проведение численного моделирования переноса пучка релятивистских электронов в образцах методом Монте-Карло, проведение теоретических оценок ударно-волновых процессов, участие в подготовке статьи и рисунков; Н. В. Перцев — подготовка образцов, исследование на растровом электронном микроскопе.

Информация об авторах

Садовничий Дмитрий Николаевич, д.т.н., проф. РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1993-2161>

Милехин Юрий Михайлович, д.т.н., акад. РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0592-0618>

Калинин Юрий Григорьевич, д.ф.-м.н., ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5123-5211>

Казаков Евгений Давидович, к.ф.-м.н., ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4334-2428>

Шереметьев Константин Юрьевич, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1995-3130>

Марков Михаил Борисович, д.ф.-м.н., ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3428-9688>

Перцев Никита Владимирович, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7671-8877>

Крутиков Дмитрий Игоревич, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5967-2843>

Список литературы

- [1] Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2003. С. 31–32, 135–145.
- [2] Берлин А. А., Шутков Ф. А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. М.: Химия, 1980. 222 с.
- [3] Afolabi L. O., Ariffb Z. M., Hashimb S. F. S., Alomayri T., Katarudina S. M. K.-A., Muhammad I. D. Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: A review // J. Mater. Res. Technol. 2020. V. 9. N 5. P. 10698–10718. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.074>
- [4] Милехин Ю. М., Садовничий Д. Н., Шереметьев К. Ю., Калинин Ю. Г., Казаков Е. Д., Марков М. Б. Формирование нановискеров наносекундным потоком релятивистских электронов в сферопластике, содержащем вольфрам // ДАН. 2019. Т. 487. № 2. С. 159–163. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524872159-163> [Milekhin Yu. M., Sadovnichii D. N., Sheremetyev K. Yu., Kalinin Yu. G., Kazakov E. D., Markov M. B. Formation of nanowhiskers in tungsten-containing syntactic foam under nanosecond relativistic electron beam // Dokl. Chem. 2019. V. 487. N 1. P. 184–187. <https://doi.org/10.1134/S0012500819070085>].
- [5] Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Калинин С. А., Потапенко А. И., Чепрунов А. А., Ульяновков Р. В., Шереметьев К. Ю., Перцев Н. В., Марков М. Б., Савенков Е. Б. Экспериментальное исследование образования нитевидных структур и свойств сферопластика при ударно-волновом воздействии // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 2. С. 123–131. <https://doi.org/10.15372/FGV20210213> [Sadovnichii D. N., Milekhin Yu. M., Malinin S. A., Potapenko A. I., Cheprunov A. A., Ulyanenkova R. V., Sheremet'ev K. Yu., Pertsev N. V., Markov M. B., Savenkov E. B. Experimental study of whisker formation and properties of spheroplastic under shock-wave loading // Combust. Explos. Shock Waves. 2021. V. 57. N 2. P. 238–245. <https://doi.org/10.1134/S0010508221020131>].
- [6] Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Калинин С. А., Вихорнова Т. Л., Осавчук А. Н., Мельников В. П., Шереметьев К. Ю., Перцев Н. В. Изменения диэлектрических и механических свойств сферопластика, содержащего металлизированные стеклянные микросферы, вызванные деформацией сжатия // ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 7. С. 1121–1127. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.07.49445.384-19> [Sadovnichii D. N., Milekhin Yu. M., Malinin S. A., Vikhornova T. L., Osavchuk A. N., Mel'nikov V. P., Sheremet'ev K. Yu., Pertsev N. V. Changes in dielectric and mechanical properties of spheroplastic containing metallized glass microspheres under compressive deformation // Tech. Phys. 2020. V. 65. N 7. P. 1076–1082. <https://doi.org/10.1134/S1063784220070166>].
- [7] Hurwitz F. I., Heimann P., Farmer S. C., Hembree D. M. Characterization of the pyrolytic conversion of polysilsesquioxanes to silicon oxycarbides // J. Mater. Sci. 1993. V. 28. P. 6622–6630.
- [8] Henderson E. J., Jonathan G. C. Veinot from phenylsiloxane polymer composition to size-controlled silicon carbide nanocrystals // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 809–815. <https://doi.org/10.1021/ja807701y>
- [9] Коптелов А. А., Милехин Ю. М., Шленский О. Ф. Тепловые эффекты термического разложения полимеров // Высокомолекуляр. соединения. 2005. Т. 47А. № 9. С. 1628–1634 [Koptelov A. A., Milekhin Yu. M., Shlenskii O. F. Heat effects in thermal degradation of polymer // Polym. Sci. Ser. A. 2005. V. 47. N 3. P. 948–953].

- [10] *Hiltz J. A.* Pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry identification of poly(butadiene-acrylonitrile) rubbers // *J. Anal. Appl. Pyrol.* 2000. V. 55. N 2. P. 135–150. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00090-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00090-X)
- [11] *Сакович Г. А.* Методология построения и практического применения композиционных материалов с дисперсными наполнителями // *Изв. АН СССР. Сер. хим.* 1990. № 10. С. 2354–2374.
- [12] *Демидов Б. А., Ивкин М. В., Петров В. А., Фанченко С. Д.* Импульсный электронный ускоритель «Кальмар-1» с плотностью мощности РЭП до 5×10^{12} Вт/см² // *Атом. энергия.* 1979. Т. 46. Вып. 2. С. 101–104 [*Demidov B. A., Ivkin M. V., Petrov V. A., Fanchenko S. D.* KAL'MAR-1 pulsed electron accelerator with relativistic electron beam power of up to 5×10^{12} W/cm² // *Atom. Energy.* 1979. N 2. P. 111–116].
- [13] *Ананьев С. С., Багдасаров Г. А., Гасилов В. А., Даныко С. А., Демидов Б. А., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г., Курило А. А., Ольховская О. Г., Стрижаков М. Г., Ткаченко С. И.* Исследование динамики анодной плазмы при воздействии мощного электронного пучка на эпоксидную смолу // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43. № 7. С. 608–615. <https://doi.org/10.7868/S0367292117070022> [*Ananyev S. S., Bagdasarov G. A., Gasilov V. A., Dan'ko S. A., Demidov B. A., Kazakov E. D., Kalinin Yu. G., Kurilo A. A., Ol'khovskaya O. G., Strizhakov M. G., Tkachenko S. I.* Study of the anode plasma dynamics under the action of a high-power electron beam on epoxy resin // *Plasma Phys. Rep.* 2017. V. 43. N 7. P. 726–732. <https://doi.org/10.1134/S1063780X17070029>].
- [14] *Furutani H., Fukumura H., Masuhara H., Kambara S., Kitaguchi T., Tsukada H., Ozawa T.* Laser-induced decomposition and ablation dynamics studied by nanosecond interferometry. 2. A Reactive Nitrocellulose Film // *J. Phys. Chem. B.* 1998. V. 102. P. 3395–3401.
- [15] *Hauer M., Funk D. J., Lippert T., Wokaun A.* Time-resolved techniques as probes for the laser ablation process // *Optics and Lasers in Engineering.* 2005. V. 43. N 3–5. P. 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2004.03.013>
- [16] *McGrane S. D., Moore D. S., Funk D. J.* Subpicosecond shock interferometry of transparent thin films // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 93. N 9. P. 5063–5068. <https://doi.org/10.1063/1.1563034>
- [17] *Frank P., Shaw-Stewart J., Lippert T., Boneberg J., Leiderer P.* Laser-induced ablation dynamics and flight of thin polymer films // *Appl. Phys. A.* 2011. V. 104. N 2. P. 579–582. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6500-3>
- [18] *Nihmath A., Ramesan M. T.* Synthesis, characterization, processability, mechanical properties, flame retardant, and oil resistance of chlorinated acrylonitrile butadiene rubber // *Polym. Adv. Technol.* 2018. V. 29. N 8. P. 2165–2173. <https://doi.org/10.1002/pat.4324>
- [19] *Bloise A., Catalano M., Barrese E., Gualtieri A. F., Gandolfi N. B., Capella S., Belluso E.* TG/DSC study of the thermal behaviour of hazardous mineral fibres // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. V. 123. P. 225–229. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4939-8>
- [20] *Аккерман А. Ф., Бушман А. В., Демидов Б. А., Ивкин М. В., Ни А. Л., Петров В. А., Рудаков Л. И., Фортвов В. Е.* Влияние размера зоны поглощения энергии на характеристики ударных волн, возбуждаемых сильноточным электронным пучком в металлической мишени // *Журн. эксперим. и теорет. физики.* 1986. Т. 91. Вып. 3. С. 1762–1766 [*Akkerman A. F., Bushman A. V., Demidov B. A., Zavgorodnil S. F., Ivkin M. V., Ni A. L., Petrov V. A., Rudakov L. I., Fortov V. E.* Effect of size of energy absorption zone on the characteristics of shock waves excited by a strong relativistic electron beam in a metallic target // *J. Exp. Theor. Phys.* 1986. V. 64. N 5. P. 1043–1045].
- [21] *Воронин Ф. Н., Иноземцева К. К., Марков М. Б.* Электромагнитное и термомеханическое воздействие электронного пучка на преграду // *Математическое моделирование.* 2017. Т. 29. № 12. С. 29–45 [*Voronin F. N., Inozemtseva K. K., Markov M. V.* Electromagnetic and Thermomechanical effect produced by an electronic beam on a solid barrier // *Mathematical Models and Computer Simulations.* 2018. V. 10. P. 407–417. <https://doi.org/10.1134/S2070048218040154>].
- [22] *Гафаров Б. Р., Ефремов В. П., Садовничий Д. Н., Демидов Б. А., Фортвов В. Е.* Генерация давления в гетерогенном материале при неравновесном энерговыделении в компонентах // *Хим. физика.* 2001. Т. 20. № 4. С. 66–72.
- [23] *Садовничий Д. Н., Тютнев А. П., Милехин Ю. М.* Электрические эффекты в полимерах и композиционных материалах при облучении пучками электронов // *Изв. АН. Серия хим.* 2020. № 9. С. 1607–1613 [*Sadovnichii D. N., Tyutnev A. P., Milekhin Yu. M.* Electrical effects in polymers and composite materials under electron beam irradiation // *Russ. Chem. Bull.* 2020. V. 69. N 9. P. 1607–1613. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2944-y>].
- [24] *Ланна А. В., Бурмистров Д. С., Васильев О. Н.* Расчет микродозиметрических характеристик в воде, облучаемой электронами и гамма-квантами // *Изв. вузов МВ и ССО СССР. Сер. Физика.* 1988. № 2. С. 77–82.
- [25] *Тютнев А. П., Ванников А. В., Мингалеев С. Г.* Радиационная электрофизика органических диэлектриков. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 177–183.
- [26] *Садовничий Д. Н., Тютнев А. П., Милехин Ю. М.* Электризация политетрафторэтилена потоком электронов // *Химия высоких энергий.*

2008. Т. 42. № 6. С. 485–491 [Sadovnichii D. N., Tyutnev A. P., Milekhin Yu. M. Electron-beam charging of polytetrafluoroethylene // High Energy Chem. 2008. V. 42. N 6. P. 435–441. <https://doi.org/10.1134/S0018143908060039>].
- [27] Семенов Г. А., Столярова В. Л. Масс-спектрометрическое исследование испарения оксидных систем. Л.: Наука, 1990. 300 с.
- [28] MacKenzie K. J. D., Meinhold R. H. Thermal reactions of chrysotile revisited: A ^{29}Si and ^{25}Mg MAS NMR study // Am. Mineral. 1994. V. 79. P. 43–50.
- [29] Гафаров Б. Р., Коргунов И. Г., Милехин Ю. М., Уткин А. В. Особенности поведения сферопластика с мягким связующим при умеренном ударно-волновом нагружении // Сб. тр. «Физика экстремальных состояний вещества-2003» / Под ред. акад. В. Е. Фортова. Черногловка: Институт проблем химической физики РАН, 2003. С. 76–80.
- [30] Ефремов В. П., Потепенко А. И. Термомеханические процессы в композиционных материалах под действием интенсивных потоков энергии // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 6. С. 924–930 [Efremov V. P., Potapenko A. I. Thermomechanical processes of composite materials under the action of intense energy fluxes // High Temp. 2010. V. 48. P. 881–886. <https://doi.org/10.1134/S0018151X10060155>].
- [31] Каннель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. С. 128–134, 149–229.
- [32] Бойков В. И., Скворцов В. А., Фортвов В. Е., Шаманин И. В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. М.: Физматлит, 2003. С. 96–139.
- [33] Зубарева А. Н., Уткин А. В., Ефремов В. П. Ударно-волновые свойства сферопластиков // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 3. С. 45–50.
- [34] Бакулин В. Н., Острик А. В. Расчетно-экспериментальное исследование механического действия излучений на композитные элементы конструкций летательных аппаратов в полетных условиях // Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. Т. 5. № 4. С. 151–166.
- [35] Караханов С. М., Пластинин А. В., Бордзиловский Д. С., Бордзиловский С. А. Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 105–113. <https://doi.org/10.15372/FGV20160315>
- [Karakhanov S. M., Platinin A. V., Bordzilovskii D. S., Bordzilovskii S. A. Time of hot-spot formation in shock compression of microballoons in a condensed medium // Combust. Explos. Shock Waves. 2016. V. 52. N 3. P. 350–357. <https://doi.org/10.1134/S0010508216030151>].
- [36] Dattelbaum D. M., Coe J. D. Shock-driven decomposition of polymers and polymeric foams // Polymers. 2019. V. 11. N 3. P. 493–516. <https://doi.org/10.3390/polym11030493>
- [37] Мэттьюз Ф. Л., Роллинг Р. Д. Композиционные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. С. 68 [Matthews F. L., Rawling R. D. Composite materials: Engineering and science. Cambridge: Woodhead Publ. Limited, 1999. 470 p.].
- [38] Shield S. R., Ghebremeskel G. N., Hendrix C. Pyrolysis-GC/MS and TGA as tools for characterizing blends of SBR and NBR // Rubber Chem. Technol. 2001. V. 74. N 5. P. 803–813. <https://doi.org/10.5254/1.3547654>
- [39] Медведев А. Б., Трунин Р. Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // Успехи физ. наук. 2012. Т. 182. № 8. С. 829–846. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201208b.0829> [Medvedev A. B., Trunin R. F. Shock compression of porous metals and silicates // Phys. -Usp. 2012. V. 55. N 8. P. 773–789. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0182.201208b.0829>].
- [40] Gleason A. E., Bolme C. A., Lee H. J., Nagler B., Galtier E., Milathianaki D., Hawreliak J., Kraus R. G., Eggert J. H., Fratanduono D. E., Collins G. W., Sandberg R., Yang W., Mao W. L. Ultrafast visualization of crystallization and grain growth in shock-compressed SiO_2 // Nat. Commun. 2015. N 6. P. 8191–1–8191-6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9191>
- [41] Tracy S. J., Turneaure S. J., Duffy T. S. In situ X-ray diffraction of shock-compressed fused silica // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 135702–01–135702–06. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.135702>
- [42] Pujar V. V., Cawley J. D. Effects of stacking faults X-ray diffraction profiles of b-SiC powders // J. Am. Ceram. Soc. 1995. V. 78. N 3. P. 774–782. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08246.x>
- [43] Ortiz A. L., Sanchez-Bajo F., Cumbreira F. L., Guiberteau F. X-ray powder diffraction analysis of a silicon carbide-based ceramic // Mater. Lett. 2001. V. 49. N 2. P. 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00358-X](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00358-X)