

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ НАНОВОЛОКОН ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНОГО ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СИНТАКТНЫЕ ПЕНЫ С ПОЛИМЕРНЫМ СИЛОКСАНОВЫМ СВЯЗУЮЩИМ

© Д. Н. Садовничий¹, Ю. М. Милехин¹, К. Ю. Шереметьев¹, Е. Д. Казаков^{2,3},
М. Б. Марков³, Е. Б. Савенков³

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 Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,
125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4
E-mail: soyuz@fcfdt.ru

Поступила в Редакцию 25 января 2022 г.

После доработки 25 января 2022 г.

Принята к публикации 2 февраля 2022 г.

Методами растровой электронной микроскопии и рентгеновской дифракции изучены превращения, вызванные воздействием потока релятивистских электронов с длительностью облучения на половине амплитудного значения 100 нс и мощностью 6.3–9.2 ГВт на синтактную пену, образованную стеклянными микросферами и силоксановым блок-сополимером, а также полимерную основу синтакта. Показано, что при разрушении стеклянных микросфер в синтактной пене от действия пучка релятивистских электронов наблюдается образование продолговатых структур микрометровых размеров и нитевидных структур с минимальным диаметром 40 нм (нановолокон). С использованием методов Монте-Карло проведены оценки распределения полей поглощенных доз и давления ударной волны. Обсуждаются обнаруженные изменения химического и фазового состава синтактной пены и ее полимерной основы, вызванные однократным воздействием пучка релятивистских электронов.

Ключевые слова: синтактная пена; силоксановые блок-сополимеры; наноструктуры; пучок релятивистских электронов; пиролиз; радиационная стойкость

DOI: 10.31857/S004446182201011X

Благодаря высокой термостойкости фенилсилесквиоксанные полимеры и синтактные пены на их основе представляют интерес для аэрокосмической техники [1–4]. Строение сегментированных сополимеров фенилсилесквиоксана и диметилсилоксана позволяет регулировать температурную зависимость изменения механических характеристик как самих полимеров, так и синтактных пен на их основе [5–8].

Воздействие импульсных пучков релятивистских электронов создает такие условия для радиационно-термических превращений материала, при которых реализуются высокая скорость нагре-

ва и интенсификация процессов массопереноса с высокой концентрацией продуктов радиолитического распада [9]. Сопутствующие воздействию пучков релятивистских электронов процессы генерации ударных волн и электрических полей также оказывают влияние на процесс радиационно-химических превращений материала. Начиная с определенной амплитуды, ударная волна способна вызвать химические превращения в материалах [10, 11]. На примере оксикарида кремния показано, что если пиролиз происходит в электрическом поле, то образование фаз углерода и SiC наблюдается при более низких температурах [12].

Повышение температуры и давления при одинаковых плотностях потока энергии тем больше, чем выше пористость материала синтактной пены [13, 14]. Таким образом, энерговыделение от пучка релятивистских электронов с длительностью облучения на половине амплитудного значения тока около 100 нс в синтактной пене, состоящей из полимерной основы и стеклянных микросфер, создает предпосылки для протекания химических реакций в экстремальных условиях — локально высоких давлений, температур и электрических полей.

Обычно в условиях воздействия ударных волн наблюдается образование наночастиц, например детонационных алмазов [15]. Для получения нановолокон наиболее эффективны методы матричного синтеза при гальваническом заполнении металлами пор трековых мембран («ядерных фильтров») [16]. Возможность формирования нановолокон при абляции металлов от воздействия лазерного излучения наносекундной длительности показана в работах [17, 18]. Отметим, что дробление микрометровых и субмикрометровых капель до наночастиц вследствие развития капиллярной неустойчивости в плазме факела, образующегося от воздействия на металлическую мишень лазерного излучения YAG:Nd с длительностью импульса 20–40 нс, применяется для получения смеси нанометровых частиц с узкой дисперсией размера (метод лазерного электродиспергирования) [19].

В работе [20] обнаружено появление нитевидных образований размером более 40 нм при воздействии пучка релятивистских электронов на синтактную пену с полимерной основой из кремнийорганического полимера и стеклосфер (диаметр 30–100 мкм), содержащих вольфрам. Снижение толщины синтакта до 4 мм и применение неметаллизированных стеклосфер сопровождалось исчезновением нитевидных образований [20]. Нитевидные структуры получены при толщине синтакта 10 мм от воздействия ударной волны, вызванной детонацией эквидистантно-поверхностного заряда взрывчатого вещества [21].

Отметим, что в работе [20] толщина синтакта с неметаллизированными стеклосферами составляла 4 мм, что всего в 2.6 раза превышает максимальный пробег электронов пучка (1.54 мм), тогда как нитевидные образования в синтактной пене с кремнийорганическим связующим и стеклосферами, содержащими модифицированный вольфрам, надежно регистрировались в образцах, толщина которых в 6.7 раза превышала максимальный пробег электронов пучка (1.2 мм). Как показано ранее в наших экспериментах [22], характерная длительность облучения

много меньше времени акустической разгрузки зоны облучения, поэтому ширина волны напряжений определяется шириной зоны энерговыделения, которая зависит от энергии падающих частиц [23, 24]. Если толщина образца сравнима с глубиной энерговыделения, то, очевидно, эффекты образования вторичных ударных волн способны сильно исказить динамику формирования ударно-волновых напряжений и, следовательно, картину течения полимерного связующего в объеме коллапсирующей стеклосферы.

Для выявления причин формирования нитевидных образований, в том числе наноразмерных, при испарении и разложении полимерного связующего в объеме коллапсирующей микросферы [22] целесообразно изучить воздействие пучков релятивистских электронов на синтактную пену, изготовленную на основе стеклянных микросфер и полимерного связующего, продукты пиролиза которого содержат конденсированную фазу. Для снижения влияния отраженных и дифракционных волн следует обеспечить превышение толщины образцов в 7 и более раз по сравнению с глубиной пробега электронов пучка.

Цель работы — изучение превращений, вызванных воздействием наносекундного пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» в синтактной пене на основе стеклянных микросфер и полимерного связующего на основе сополимера фенилсилсесквиоксана и диметилсилоксана, в условиях слабого влияния отраженных и дифракционных ударных волн.

Экспериментальная часть

В качестве полимерной матрицы синтактной пены использовали силоксановый блок-сополимер ЛЕСТОСИЛ-СМ общей формулы $\text{HO} \{ [\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO}_{1.5}]_n [\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_m \} \text{H}$, где $n = 30\text{--}60$, $m = 80\text{--}130$, содержащий линейные полидиметилсилоксановые и полифенилсилсесквиоксановые звенья (ФГУП «НИИСК»). Для приготовления синтактной пены блок-сополимер растворяли в толуоле (х.ч., АО «ЭКОС-1») в соотношении 67:50. В качестве сшивающего агента использовали винилтрис(ацетоксимо)силан (ПКФ «Арсенал Кама») (массовая доля в синтанкте 5 мас%). Стеклянные микросферы МС-А9 (ООО «ЕЗИМ») (массовая доля в синтанкте 28 мас%) добавляли в композицию, перемешивали в пропеллерно-лопастной мешалке и производили пневматическое напыление на подложку пятью слоями до толщины 11 мм с промежуточной выдержкой на каждом слое по 1 ч. После напыления образцы сушили при комнатной температуре в течение 48 ч и далее при температуре 383 К в течение 1 ч в термостате.

Образцы силоксанового блок-сополимера ЛЕСТОСИЛ-СМ изготавливали заливкой в ванночку из тефлона с применением одинаковой с синтактом концентрации сшивающего агента по приведенным выше температурно-временным режимам.

Плотность синтактной пены $600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, плотность полимерной основы $1050 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Облучение образцов выполнено в диодном узле ускорителя «Кальмар» при остаточном давлении не выше 10^{-2} Па. Методика облучения и контроль параметров пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» представлены в работах [22, 25]. Температура испытаний комнатная. Воздействие пучков релятивистских электронов на образцы синтактной пены выполнено с подложкой из органического стекла толщиной 4 мм, а также без подложки, что позволяет оценить параметры ударно-волновых нагрузок.

Облучению подвергались как образцы полимерной основы толщиной 5–6 мм, так и слоевые образцы, состоящие из двух пластин толщиной по 3 мм.

Для взвешивания образцов использовали аналитические весы ВЛР-20 (НПП «Госметр») с абсолютной погрешностью $7.5 \cdot 10^{-5}$ г.

Морфологические исследования выполняли с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6490 (JEOL Ltd). Эксперименты по определению фазового состава проводили в кварцевой кювете методом рентгеновской дифракции на дифрактометре D2 PHASER (Bruker) в излучении CuK_α с длиной волны 0.154 нм. Регистрацию дифрактограмм прово-

дили в интервале углов $2\theta=0.05^\circ$ с шагом сканирования $2\theta=0.05^\circ$ 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).

Спецификой генерации пучков релятивистских электронов на ускорителях с взрывоэмиссионным катодом является некоторый разброс параметров, поэтому в каждом эксперименте контролировалась кинетика тока и энергия пучка. Область облучения образцов контролировалась в каждом опыте с помощью камеры обскуры. Для удобства будем обозначать опыты по воздействию пучков релятивистских электронов на образцы синтактной пены и полимерной основы заглавными буквами S и P соответственно, далее номер опыта (табл. 1).

Воздействие пучков релятивистских электронов на образцы синтактной пены и полимерного связующего сопровождается абляцией поверхностных слоев, формированием кратера в зоне облучения и в ряде случаев образованием сквозного отверстия в центральной области облучения (рис. 1).

Типовое радиальное распределение плотности потока энергии на поверхности образца при воздействии пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» получено с использованием камеры обскуры (рис. 1, а). Глубина кратера в центральной части для синтактной пены достигает 2.3–3.0 мм (рис. 1, б, в). Поверхность кратера неровная, в центральной части кратера заметно образование кок-

Таблица 1

Параметры воздействия пучков релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» на образцы синтактной пены и полимерного связующего

Опыт	Энергия пучка электронов, падающая на поверхность образца, Дж	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 полувысоте амплитудного значения тока τ_0 , нс
S1	481	6.27	0.49	22.1	215	102
S2	570	6.52	0.70	22.9	258	98
S3	550	6.53	0.62	22.5	253	98
S4	650	7.27	0.79	27.4	237	100
S5*	650	7.89	0.72	31.6	208	98
P1	560	6.20	0.29	18.9	235	128
P2	720	8.74	0.47	31.2	228	103
P3	820	9.17	0.74	28.3	195	148
P4**	720	7.84	0.42	26.1	211	115

* При воздействии пучка релятивистских электронов отсутствовала подложка.

** Образец состоял из двух слоев по 3 мм каждый.

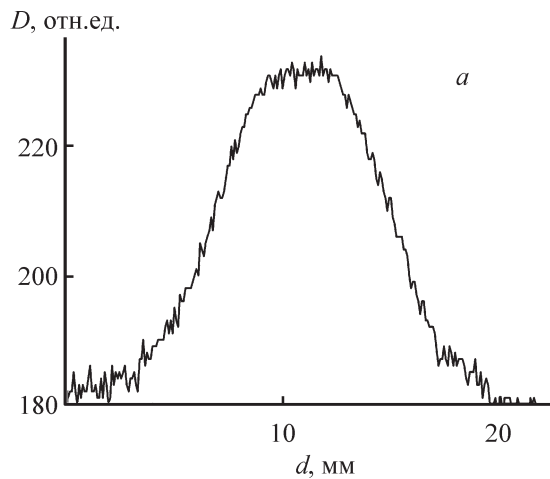
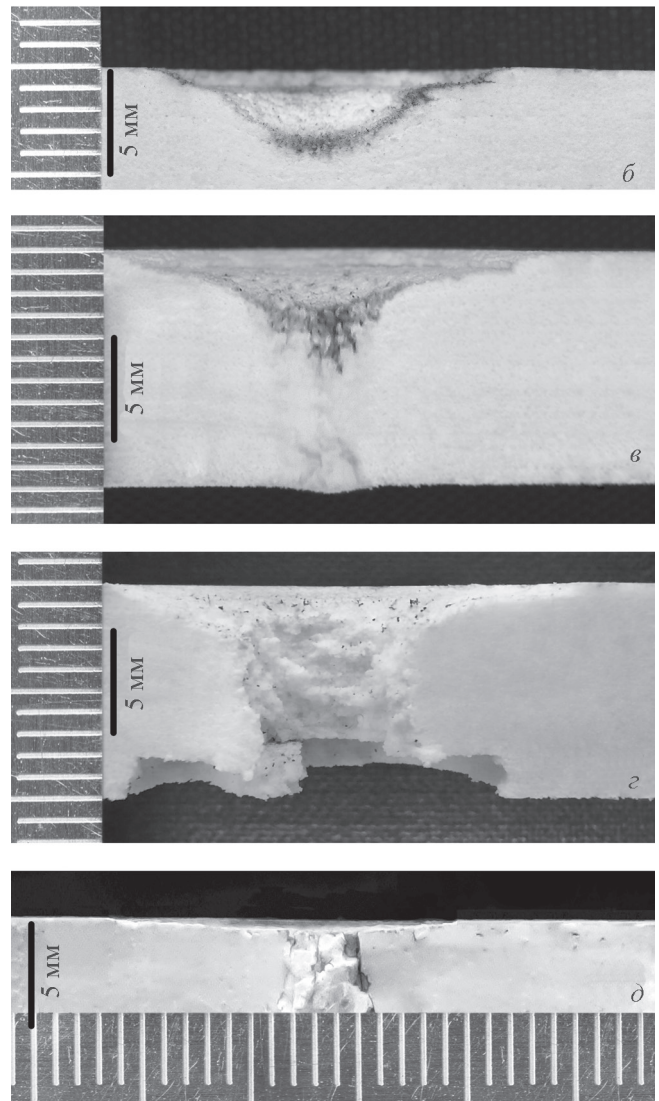


Рис. 1. Полученное с использованием камеры обскуры типовое радиальное распределение плотности потока энергии электронов на поверхности образца при воздействии пучка релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» (а); фотография кратера в синтакте (энергия пучка 550 Дж, площадь облучения 0.62 см^2) (б); фотография кратера с трещинами и вздутия на тыльной стороне синтакта (энергия пучка 481 Дж, площадь облучения 0.49 см^2) (в); фотография разреза, проходящего через центр воздействия пучка релятивистских электронов на синтакт, с образовавшимся отколом на тыльной части образца в условиях облучения без подложки (энергия пучка 650 Дж, площадь облучения 0.72 см^2) (з); фотография кратера и разрушения центральной области силикоанового блок-сополимера (энергия пучка 720 Дж, площадь облучения 0.47 см^2) (д).

сового слоя, который проникает на глубину $\sim 1 \text{ мм}$ (рис. 1, б). В опыте S1 (табл. 1) на тыльной стороне образца под зоной воздействия пучка релятивистских электронов образовывалось «вздутие» на $\sim 1 \text{ мм}$ с 3–5 трещинами длиной до 3 мм, расходящимися от центра в радиальном направлении, а в центральной части кратера наблюдаются трещины со следами термического разложения, которые ориентированы под небольшим углом к направлению воздействия пучка электронов в объем синтакта (рис. 1, в). Эффективную удельную энергию уноса рассчитывали как отношение суммарной энергии пучка релятивистских электронов к унесенной массе образца. В изученном диапазоне параметров пучков релятивистских электронов эффективная удельная энергия уноса синтактной пены составляет $4.1 \pm 0.7 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1}$.

При облучении образцов синтактной пены без подложки в центральной части наблюдаются образо-



вание сквозного отверстия диаметром 6 мм и откол на глубину 2 мм (рис. 1, з), который по диаметру практически совпадает с диаметром области облучения (параметры облучения соответствуют опыту S5).

Абляция полимерной основы выражена в меньшей степени, но во всех опытах наблюдается образование радиальных трещин на облучаемой поверхности и сквозной трещины в центральной части области облучения (рис. 1, д). Отметим, что в слоевом образце (опыт P4) центральное сквозное отверстие образуется только в первом облучаемом слое. Во втором слое образца опыт P4 обнаружены только нитевидные трещины, которые свидетельствуют о реализации достаточно высоких ударно-волновых напряжений.

Измеренное значение уносимой массы образца силикоанового блок-сополимера при воздействии релятивистских электронов с энергией пучка 720 Дж (опыт P2) составляет 0.2 г. Вещество уносится за счет

двух эффектов: абляции по облучаемой поверхности, которая достигает глубины 350 мкм, и выброса вещества из образующейся в центральной области кратера сети трещин. Расчет унесенной массы, исходя из максимальной толщины слоя абляции, диаметра зоны облучения и плотности полимерного связующего $\sim 1050 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, дает величину уноса с поверхности $\sim 0.06 \text{ г}$. Тогда унос вещества из центральной трещины составляет $\sim 0.14 \text{ г}$, что соответствует диаметру эффективного сквозного отверстия цилиндрической формы, равному $\sim 320 \text{ мкм}$. По величине унесенной массы без учета формирования сквозного отверстия можно оценить эффективную удельную энергию сублимации величиной $12 \text{ кДж}\cdot\text{г}^{-1}$.

Типовые микрофотографии поверхности центральной области кратера в опыте S1 не обнаруживают каких-либо структур или остатков стеклосфер (рис. 2, а). На глубине более 2 мм от облучаемой поверхности, на внутренней поверхности разрушенных стеклосфер наблюдается формирование продолговатых структур длиной до 12 мкм и диаметром до 1 мкм (рис. 2, б). При большем увеличении обнаруживаются нитевидные структуры диаметром от 40 нм и длиной более 5 мкм, которые можно классифицировать как нановолокна (рис. 2, б, вставка).

Поверхность кратера полимерной основы неровная (рис. 3). Методом растровой электронной микроскопии на поверхности кратера обнаружены микроотверстия с неровными краями диаметром до 450 мкм, причем диаметр микроотверстия вглубь образца уменьшается до $\sim 70 \text{ мкм}$ (рис. 3, вставка). Подобная форма повреждений свидетельствует о выбросе вещества из объема и типична для электроразрядных процессов, обусловленных электрическим пробоем.

Микроотверстия электрического пробоя отчетливо наблюдаются в первом слое (опыт P4) и полностью отсутствуют во втором (тыльном) слое. Изучение электрического пробоя при наносекундных воздействиях высокого напряжения, как правило, осложнено инжекционными эффектами из электродов, и в данном случае оценка электрических полей, вызываемых пробоем, по всей видимости, близка к «истинной» электрической прочности кремнийорганических тонких пленок — $6\cdot 10^8 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ [26, 27].

Рентгеновская дифрактограмма полимерного связующего синтакта (рис. 4, б) типична для полифенилсилесквioxановых полимеров и характеризуется двумя рефlekсами [28–30]. Анализ дифрактограмм позволил дать оценку размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) рентгеновских лучей. Малоугловой максимум реализуется на углах $2\theta \sim 11.97^\circ$ (межплоскостное расстояние 0.74 нм). Его малая ширина свидетельствует об ограничении движений вокруг продольной оси макромолекул, а размер ОКР составляет $2.5\text{--}2.9 \text{ нм}$. Второй рефлекс, более диффузный, достигает максимума при $2\theta \sim 19.61^\circ$ (межплоскостное расстояние 0.452 нм) и связан с толщиной полимерных цепей. Важно учитывать, что ЛЕСТОСИЛ-СМ является сегментированным блок-сополимером, в состав которого входят микрофазы полидиметилсилоксана и полифенилсилесквioxана. Воздействие пучка релятивистских электронов вызывает изменение соотношения максимумов первого и второго рефлексов (рис. 4, б, кривая 4) и соответственно снижение расчетной степени кристалличности с 26.0 до 16.5%. При этом наблюдается снижение размера ОКР, ассоциируемого с толщиной полимерной цепи [28], от $4.3\text{--}4.9$ до $\sim 3 \text{ нм}$.

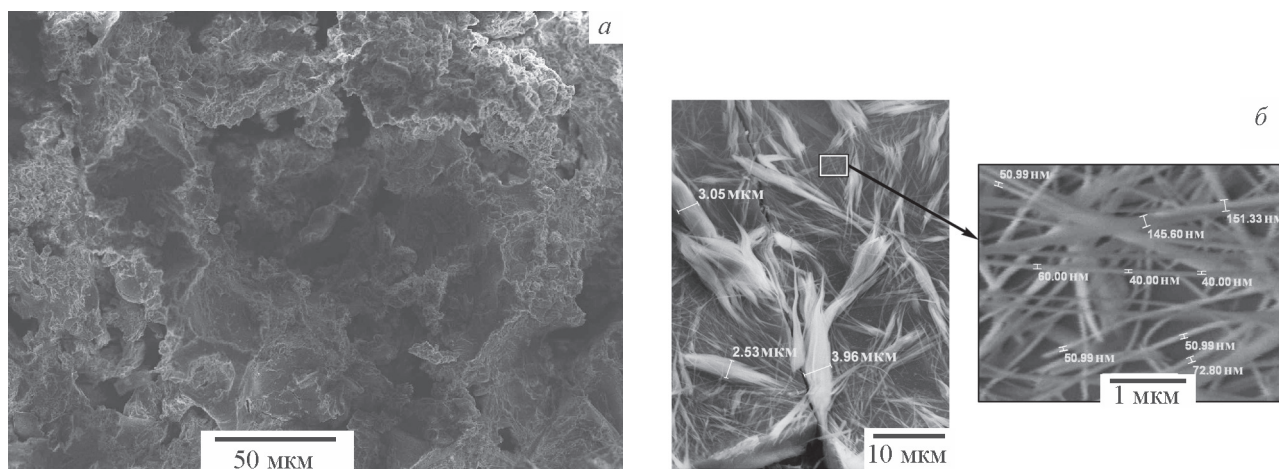


Рис. 2. Микрофотография поверхности синтакта в центральной области кратера после воздействия пучка релятивистских электронов (а), типовые микрофотографии разреза на глубине 2–7 мм под кратером после однократного воздействия пучка релятивистских электронов (б).

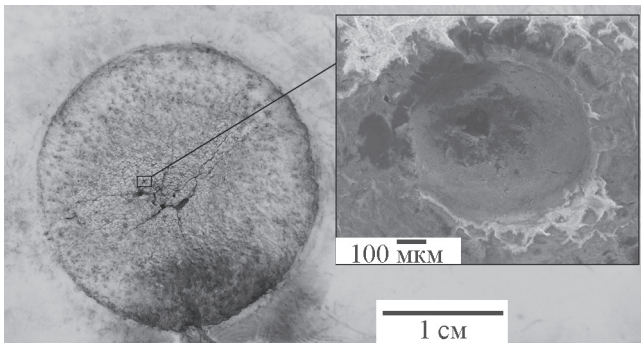


Рис. 3. Типовая микрофотография поверхности блок-сополимера и микрофотография округлого отверстия на его поверхности (вставка), образованного выбросом газоплазменных продуктов электрического пробоя после однократного воздействия пучка релятивистских электронов.

Рентгеновская дифрактограмма синтакта опыт S1 (рис. 4, *a*, кривая 1) формируется как индивидуальными свойствами стеклосфер и полимерного связующего, так и образованием дополнительного рефлекса при малых углах 2θ . Поскольку рефлекс при углах $2\theta = 8.07^\circ$ (межплоскостное расстояние 1.092 нм и ОКР 18.4 нм) наблюдается только в синтакте, следует ожидать, что его появление вызвано формированием мезофазных образований, обусловленных взаимодействием полимерного связующего с функциональными

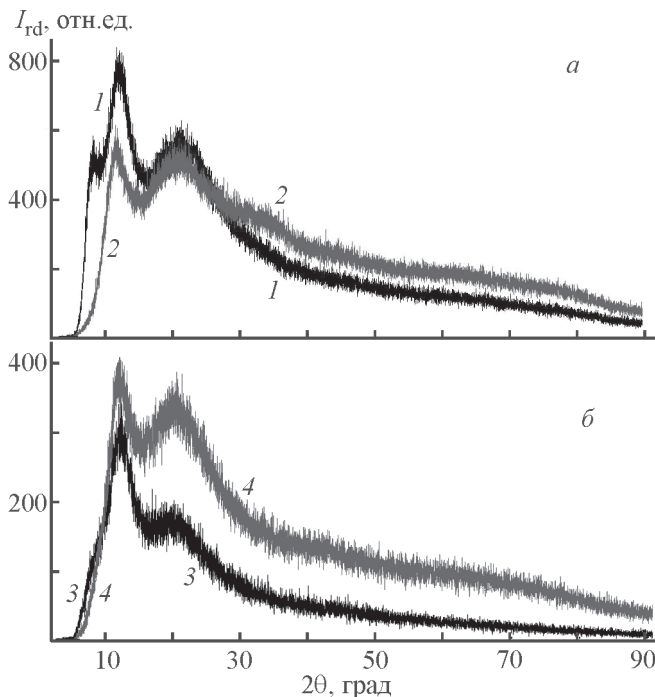


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы синтакта (*a*) и его полимерной основы (*b*) до (1, 3) и после однократного воздействия релятивистских электронов (2, 4).

группами на поверхности стеклосфер. Отметим, что в синтакте на основе бутадиен-нитрильного каучука и аналогичных стеклосфер рефлекс при углах $2\theta \sim 8^\circ$ отсутствовал [22].

Для рентгенодифракционных исследований из объема синтакта вырезали по четыре пластины толщиной 2 мм и площадью, близкой к площади облучения. На типовых дифрактограммах исходных и подвергнутых облучению пластин синтактной пены и ее полимерной основы видно, что в результате воздействия пучка релятивистских электронов наблюдается исчезновение рефлекса при $2\theta \sim 8.07^\circ$ (рис. 4, *a*, кривая 2) и появление размытого гало в области углов $33\text{--}36^\circ$. Отметим, что воздействие пучка релятивистских электронов не оказало значимого влияния на положение и форму рефлексов синтактной пены с максимумами при углах $2\theta \sim 11.55^\circ$ (межплоскостное расстояние 0.765 нм, размер ОКР 3.4–3.8 нм) и $2\theta \sim 21.4^\circ$ (межплоскостное расстояние 0.41 нм, размер ОКР 1.8 нм). Однако после воздействия пучка релятивистских электронов наблюдается снижение расчетной степени кристалличности от 21 до 14–15%. Отметим, что рефлекс при $2\theta \sim 8.07^\circ$ частично сохраняется после воздействия пучка релятивистских электронов только в слое синтакта толщиной 2 мм у тыльной стороны образца, примыкающего к подложке.

В контрольных экспериментах, выполненных на изучаемых образцах синтактных пен после статического и ударного сжатия длительностью 1–2 мс [31], разрушение стеклосфер не оказало влияния на форму рентгеновских дифрактограмм.

Обсуждение результатов

Поглощение энергии пучка релятивистских электронов малой длительности вызывает повышение температуры при практически неизменном облучаемом объеме. С использованием методов Монте-Карло выполнены расчеты пространственного распределения поглощенной дозы электронного излучения для проведенных экспериментов аналогично нашей работе [22]. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

При расчете глубины от облучаемой поверхности, на которой достигается температура 1000 К, обозначенной далее L_T , принимались значения теплоемкости синтакта и его полимерного связующего 1550 и 1700 Дж·кг⁻¹·К⁻¹ соответственно. Отметим, что глубина уноса синтакта почти в 2 раза больше, чем рассчитанное значение L_T , а у полимерного связующего, наоборот, в 3 раза меньше. По всей видимости, это свидетельствует о различиях в механизмах уноса. В случае синтакта, по аналогии с ранее вы-

Таблица 2

Оценки распространения пучка релятивистских электронов в проведенных экспериментах

Опыт	Глубина пробега электронов, мкм	Глубина, на которой достигается температура 1000 К, L_T , мкм	Максимальное значение поглощенной дозы, МГр	Глубина, на которой достигается максимальное значение поглощенной дозы, мкм	Поглощенная доза на поверхности образца, МГр	Усредненное на глубине половинного ослабления пучка значение поглощенной дозы, МГр	Механический импульс давления I_m , Па·с	Давление, ГПа
S1	1560	1180	24.7	188	15.5	7.68	520	5.09
S2	1910	1440	15.3	363	10.1	6.65	523	5.33
S3	1700	1340	17.4	288	10.7	9.15	536	5.47
S4	1660	1290	16.3	338	12.4	8.50	499	4.98
S5*	1510	1170	21.2	37.5	17.5	9.59	501	5.11
P1	1020	850	39.1	37.5	34.0	18.2	2745	21.4
P2	1030	840	33.7	12.5	33.7	15.2	2173	21.1
P3	910	740	32.4	12.5	32.4	11.8	1370	9.26
P4**	930	750	35.5	113	30.3	13.6	2167	18.8

* При воздействии пучка релятивистских электронов отсутствовала подложка.

** Образец состоял из двух слоев по 3 мм каждый.

полненными экспериментами [22], унос облучаемой поверхности обусловлен откольным разрушением. Ударно-волновые нагрузки в образцах полимерного связующего скорее всего обусловлены испарением поверхностных слоев при воздействии пучка релятивистских электронов, при этом также реализуются и электроразрядные процессы, на которые указывают обнаруженные на поверхности округлые микроотверстия с неровными краями. Наличие почернения поверхности образцов однозначно свидетельствует о реализации достаточно высоких температур, однако при воздействии пучка релятивистских электронов на синтакт без подложки следы от почернения почти отсутствуют.

Оценки возникающего механического импульса давления с учетом реализации откольных эффектов и испарения выполнены с использованием консервативного подхода, изложенного в [32].

Импульс давления (I_m) при воздействии пучка релятивистских электронов на синтакт оценивали по рассчитанным значениям распределения поглощенной дозы электронного излучения $D(m)$:

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

где $D(m)$ — функция распределения поглощенной дозы электронного излучения в зависимости от массовой координаты вглубь образца (m); c_0 — скорость звука [22]; Γ — эффективный коэффициент

Грюнайзена; m_f — массовая координата внутренней границы отколовшегося слоя, которая определяется из уравнения $\Gamma \rho_0 D(m) = 2\sigma_{от}$, для синтакта эффективный коэффициент Грюнайзена принимали равным 0.3 [33].

Импульс давления I_m в образцах полимерного связующего оценивали по формуле для испарительного импульса

$$I_m = \chi \int_0^{m_s} \sqrt{2[D(m) - \lambda Q_s]} dm, \quad (2)$$

где параметр χ принимался равным 0.7, $\lambda = 1$ для полностью сублимированного вещества, энергия сублимации Q_s для оценки импульса принималась равной 12 кДж·г⁻¹. Массовая толщина сублимированного слоя m_s определялась условием $D(m) = \lambda Q_s$.

Верхнюю оценку возникающего в образцах давления получали как I_m/τ_0 , считая, что длительность воздействия совпадает с τ_0 — длительностью облучения на полувысоте амплитудного значения тока.

Выполненные оценки показывают, что величина импульса давления в проведенных экспериментах для синтакта изменяется в пределах 10% (табл. 2). В случае воздействия пучка релятивистских электронов на синтакт $I_m = 499$ –536 Па·с, а для облучения образца полимерного связующего достигает двух раз: $I_m = 1370$ –2745 Па·с. При этом начальное давление в области поглощения пучка релятивистских электронов достигает в синтакте 5 ГПа, а в образцах полимерного связующего — от 9.3 до 21 ГПа.

Волновой характер нагрузки при воздействии пучка релятивистских электронов обусловлен интерференцией волн сжатия и разрежения, динамикой процессов упругопластического деформирования, физико-химических превращений и разрушения в материале. Отражение ударной волны от поверхности тела вызывает разрушение в условиях напряженного состояния, близкого к всестороннему растяжению. Характерные значения откольной прочности твердых полимеров находятся в интервале 0.15–0.3 ГПа при длительностях ударно-волновой нагрузки порядка 0.1–1 мкс [34]. Откольному разрушению эластомеров предшествует образование пор, которые зарождаются после малой деформации растяжения, при этом напряженное состояние между порами уходит от всестороннего растяжения, вследствие чего становятся возможными большие обратимые деформации, поскольку образование микроразрывов само по себе еще не является разрушением [34, 35]. Рассмотрение моделей появления зоны множественных разрушений и предсказание геометрических характеристик зоны разрушения в условиях откола представляется отдельным вопросом [36], который в настоящей работе не затрагивается.

Естественно, что при распространении по образцу амплитуда ударной волны будет уменьшаться, а длительность действия фазы сжатия возрастать. Образование откола на тыльной стороне синтакта (опыт S5) показывает, что даже пройдя 6–8 мм, ударная волна сохраняет достаточно высокую амплитуду — более 0.2 ГПа. При этом отколовшийся слой близок по толщине к глубине проникновения пучка релятивистских электронов в синтакт и практически совпадает с диаметром воздействующего пучка электронов. Поэтому образование сквозных отверстий на всю толщину синтакта при воздействии пучка релятивистских электронов без подложки в опыте S5, так же как при облучении однослойных образцов полимерного связующего на подложке, скорее свидетельствует об особенностях разрушения рассмотренных материалов при интерференции ударных волн, чем о неравномерности пучка релятивистских электронов по поверхности образцов. Отметим, что разрушение других полимерных материалов (полиметилметакрилат, полистирол, отвержденная эпоксидная смола) в условиях воздействия пучков релятивистских электронов отличается от полученных в настоящей работе и остается предметом обсуждения [37, 38].

Высокие давления при распространении ударной волны в материале реализуются в узкой зоне — фронте ударной волны, которая в наших экспериментах составляет 1.5–2 мм в синтакте и менее 1 мм в поли-

мерном связующем. Спустя ~1 мкс происходит спад давления в результате возникновения волн разгрузки [39]. Температура при прохождении ударной волны в пористом материале в несколько раз выше, чем в сплошном, и по завершении ударно-волнового процесса снижается более медленно по закону обычной теплопроводности.

Экспериментально показано, что воздействие на полидиметилсилоксан ударной волны с максимальной амплитудой более 10 ГПа сопровождается образованием межмолекулярных поперечных связей и гель-фракции [40]. Полученные дифрактограммы отвержденного силоксанового блок-сополимера обнаруживают снижение степени кристалличности с 26 до 16.5% и размера ОКР, соответствующего толщине полимерной цепи, от 4.3–4.9 до ~3 нм. Именно этот эффект наблюдается в первом облучаемом слое опыта P4, однако, несмотря на наличие механических трещин во втором слое, его рентгеновская дифрактограмма сохраняет параметры исходного образца. Трудно ожидать, что амплитуда ударной волны в опыте P4 снизится почти в 2 раза от 18.8 до менее 10 ГПа, если волна пройдет по образцу всего 3 мм.

В то же время, как показали численные расчеты переноса релятивистских электронов, после абляции поверхностных слоев на максимальную глубину 350 мкм остается до 700 мкм блок-сополимера с поглощенной дозой электронного излучения более 20 кГр. А толщина слоя с температурой выше 1000 К после уноса составит величину до 400 мкм. Воздействие гамма- и рентгеновского излучения при поглощенной дозе более 10 кГр также вызывает образование гель-фракции [41, 42]. Однако облучение с поглощенной дозой до 100 кГр не сказывается на термическом разложении изучаемого синтакта [43]. Поглощенная доза за максимальным пробегом релятивистских электронов, обусловленная тормозным излучением, в проведенных экспериментах составляет менее 1 кГр и не способна вызвать образование гель-фракции.

Таким образом, наблюдаемые закономерности изменения рентгеновских дифрактограмм силоксанового блок-сополимера следует связать с изменением фазовой структуры в результате радиационно-термического воздействия пучка релятивистских электронов в объеме, ограниченном областью поглощения релятивистских электронов.

Экспериментально показано, что температура, достигаемая при коллапсе стеклянных микросфер в ударной волне, составляет 1600 К [44]. Моделирование фазовых и химических равновесий в синтактной пене при высоких температурах выполнено с использованием программного кода TERRA [45].

Проведенные расчеты показали, что основными газообразными продуктами, образующимися в интервале температур 1050–1600 К, являются метан, водород и этан, а конденсированными — SiO_2 и SiC . Массовая доля углерода, нитрида кремния, метасиликата натрия $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, оксида алюминия и других веществ не превышает 1%. Согласно проведенному в [22] анализу, рефлекс в области углов $2\theta = 33\text{--}36^\circ$ в наибольшей степени может соответствовать образованию гексагональной (*P63mc*) сингонии SiC -6H.

Пиролиз фенилсилсесквиоксановых каучуков сопровождается образованием термостойких оксидов, карбидов, оксикарбидов кремния [46], а при температурах от 473 до 873 К полученные стекла содержат поры, в которых найдены волокна диаметром около 1 мкм из аморфных Si—O—Si -доменов [7]. При пиролизе полисилоксана общей формулы $[\text{—Si}(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{O—}]_3[\text{—Si}(\text{CH}_3)(\text{H})\text{O—}]_2 \times \times [\text{—Si}(\text{CH}_3)(\text{CH}=\text{CH}_2)\text{O—}]_2$ (коммерческая марка SPR-684, Gelest Inc., США) в электрическом поле $5 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ и токе 2 А при достаточно низкой температуре 1053 К наблюдается преимущественное образование гексагональной сингонии SiC [12]. Авторы связывают этот факт с увеличением скорости зародышеобразования под действием электрического поля, сопровождающегося джоулевым нагревом и электромиграцией. В экспериментах с воздействием пучков релятивистских электронов напряженность электрического поля очень велика и ограничивается достижением электрической прочности облучаемых образцов [47], а развитие электрических пробоев вызывает протекание в каналах пробоя токов проводимости с амплитудой, превышающей 1000 А [48, 49].

В настоящее время сложно однозначно указать механизм образования нитевидных структур, в том числе нанометрового диаметра, вызванных коллапсом стеклосфер в синтактных пенах при воздействии пучков релятивистских электронов с наносекундным фронтом. Отметим два подхода к объяснению формирования протяженных наноструктур при нано- и фемтосекундных воздействиях лазерного излучения.

В работе [50] образование, расширение и разрушение пены в результате действия сил поверхностного натяжения, остывания и замерзания расплава за счет электронной электропроводности использовано для объяснения образования нанорельефа поверхности при фемтосекундных воздействиях лазерного излучения на металлы.

В работе [18] образование нанопроволок при лазерной абляции металлов и полупроводников в сверхтекучий гелий связывают с последовательностью процессов образования при абляции поверхности

мишени атомов, димеров и кластеров (до нескольких десятков атомов) и их коагуляции при столкновениях. При этом энергии, выделяющейся за счет уменьшения их поверхности, хватает для плавления образующихся кластеров большего размера. Это продолжается до тех пор, пока размер кластера не станет столь большим, что перестанет расплавляться. Далее начинается процесс приплавления кластеров друг к другу с образованием продолговатых фрагментов, ориентированных вдоль оси вихря в сверхтекучем гелии.

Коллапсирующая от действия ударной волны микросфера формирует стенки «микрореактора». Испарение полимерного связующего в объеме «микрореактора» за короткое время 0.1–2 мкс сопровождается пиролизом с образованием конденсированных и газообразных продуктов, обладающих большей термостойкостью, в данном случае SiC . Образующиеся области пены из жидких и газообразных продуктов пиролиза полифенилсилсесквиоксана разрушаются под действием растягивающих напряжений, например на стадии прохождения волны растяжения, что будет способствовать формированию нитевидных образований. Дефекты структуры стеклосфер и места локализации частичных электрических разрядов могут служить точками преимущественной конденсации продуктов пиролиза при остывании локально нагретой выше 1600 К области. Дальнейший рост нитевидных структур может продолжаться при остывании локальных областей разрушенных микросфер достаточно длительное время, определяемое процессами теплопередачи.

Выводы

Воздействие пучков релятивистских электронов со средней плотностью потока энергии $200 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ (мощность 6.3–9.2 ГВт) создает высокие уровни как поглощенных доз электронного излучения — в синтакте до 25 МГр и в силоксановом блок-сополимере до 39 МГр, так и вторичных факторов — ударной волны, сопровождаемой откольными эффектами, и электрических полей, которые сопровождаются электрическими разрядами.

Высокие уровни ударной волны (более 5 ГПа) достаточны для коллапса стеклянных микросфер и повышения температуры более 1600 К, что обеспечивает протекание пиролиза в необлучаемой части синтактной пены с образованием гексагональной (*P63mc*) сингонии SiC -6H и разрушением мезофазных образований, предположительно обусловленных взаимодействием полимерного связующего с функциональными группами стеклосфер.

Изменение фазового состава блок-сополимера вызвано в основном терморadiационным действием пучка релятивистских электронов и сопровождается уменьшением в облучаемой области степени кристалличности с 26 до 16.5%, а также расчетного размера областей когерентного рассеяния, ассоциируемых с толщиной полимерной цепи.

Методами растровой электронной микроскопии после однократного воздействия пучка релятивистских электронов установлено образование на внутренней поверхности разрушенных стеклосфер нитевидных образований с минимальным диаметром 40 нм и длиной более 5 мкм, а также продолговатых образований микрометровых размеров.

Предложен возможный механизм образования нитевидных структур при коллапсе стеклосфер. Ударная волна от воздействия пучка релятивистских электронов разрушает стеклосферы и формирует локальные области своеобразного «микрореактора» с температурой, достаточной для испарения и пиролиза полимерного связующего за счет сжатия поры (диаметром до 100 мкм). Разрушение и затвердевание пены, образованной жидкими и газообразными продуктами пиролиза при наличии стабильной при высоких температурах конденсированной фазы, может сопровождаться образованием нитевидных структур при остывании в процессе дальнейшей теплопередачи. Затравкой для роста нитевидных структур могут выступать продукты конденсации испаренных в «микрореакторе» веществ, дефекты структуры стеклосфер и частичные электрические разряды.

Благодарности

Эксперименты на установке «Кальмар» выполнены при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 3026 от 25.11.2021). Авторы признательны Д. В. Кондратьевой, Н. В. Перцеву, О. М. Борщевой 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 — литературный поиск, написание статьи, участие в проведении экспериментов по определению фазового состава и химических равновесий; Ю. М. Милехин — формулирование задач и цели исследования; К. Ю. Шереметьев — проведение теоретических оценок ударно-волновых процессов, анализ результатов, полученных методом растровой

электронной микроскопии; Е. Д. Казаков — проведение работ на ускорителе «Кальмар» по диагностике пучка релятивистских электронов; М. Б. Марков, Е. Б. Савенков — проведение численного моделирования переноса пучка релятивистских электронов в образцах методом Монте-Карло.

Информация об авторах

Садовничий Дмитрий Николаевич, д.т.н., профессор РАН,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1993-2161>

Милехин Юрий Михайлович, д.т.н., академик РАН,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0592-0618>

Шереметьев Константин Юрьевич,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1995-3130>

Казаков Евгений Давидович, к.ф.-м.н.,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4334-2428>

Марков Михаил Борисович, д.ф.-м.н.,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3428-9688>

Савенков Евгений Борисович, д.ф.-м.н.,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3363-7043>

Список литературы

- [1] *Baney R. H., Itoh M., Sakakibara A., Suzuki T.* Silsesquioxanes // *Chem. Rev.* 1995. V. 95. P. 1409–1430. <https://doi.org/10.1021/cr00037a012>
- [2] *Temnikova M. N., Vasil'eva V. G., Buzina M. I., Muzaфарov A. M.* Synthesis and comparison of the rheological and thermal properties of acyclic and polycyclic forms of polyphenylsilsesquioxane // *Eur. Polym. J.* 2020. V. 130. P. 109676. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109676>
- [3] *Afolabi L. O., Ariffb Z. M., Hashimb S. F. S., Alomayri T., Kamarudina 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] *Семенов В. В., Кириллов А. И., Домрачев Г. А.* Гетерофазный синтез полимерных органосиланов // *ЖПХ.* 2010. Т. 83. № 1. С. 118–125 [*Semenov V. V., Kirillov A. I., Domrachev G. A.* Heterophase synthesis of polymeric organosilanes // *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 1. P. 115–122. <https://doi.org/10.1134/S1070427210010222>].
- [5] *Краев И. Д., Попков О. В., Шульдешов Е. М., Сорокин А. Е., Юрков Г. Ю.* Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений // *Тр. ВИАМ.* 2017. № 12 (60). С. 48–62. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5>
- [6] *Пряхина Т. А., Шрагин Д. И., Кононович Ю. Н., Васильев В. Г., Бузин М. И., Папков В. С., Музафа-*

- ров А. М. Синтез, реологические и термические свойства полидиметилсилоксанов, модифицированных длинноцепными углеводородными заместителями с полярными фрагментами // Изв. АН. Сер. хим. 2015. № 3. С. 605–612 [Pryakhina T. A., Shragin D. I., Kononevich Y. N., Vasilev V. G., Buzin M. I., Papkov V. S., Muzafarov A. M. Synthesis, rheological, and thermal properties of polydimethylsiloxanes modified with long-chain hydrocarbon substituents with polar fragments // Russ. Chem. Bull. 2015. V. 64. N 3. P. 605–612. <https://doi.org/10.1007/s11172-015-0906-6>].
- [7] Haußmann M., Reznik B., Bockhorn H., Denev J. A. Thermal degradation of polymethylsilsesquioxane and microstructure of the derived glasses // J. Anal. Appl. Pyrol. 2011. V. 91. P. 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.02.016>
- [8] Минасьян Р. М., Поливанов А. Н., Минасьян О. И. Пути повышения термостойкости кремнийорганических эластомерных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 7. С. 24–26.
- [9] Болдырев В. В., Воронин А. П., Ляхов Н. З., Канимов Б. К. Неорганические реакции в мощных пучках ускоренных электронов // ЖВХО им. Д. И. Менделеева. 1990. Т. 35. № 5. С. 540–545.
- [10] Бацанов С. С. Неорганическая химия высоких динамических давлений // Успехи химии. 1986. Т. 55. № 4. С. 579–607.
- [11] Алымов М. И., Вадченко С. Г., Гордополова И. С., Сайков И. В., Милукова И. В. Влияние механоактивации при тепловом и ударно-волновом инициировании реакций тугоплавких металлов с тефлоном // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 11. С. 1242–1249. <https://doi.org/10.1134/S0002337X18110015> [Alymov M. I., Vadchenko S. G., Gordopolova I. S., Saikov I. V., Milyukova I. V. Effect of mechanical activation on thermally and shock wave initiated reactions of refractory metals with teflon // Inorg. Mater. 2018. V. 54. N 11. P. 1175–1182. <https://doi.org/10.1134/S0020168518110018>].
- [12] Ma R., Erb D., Lu K. Flash pyrolysis of polymer-derived SiOC ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. 2018. V. 38. N 15. P. 4906–4914. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.010>
- [13] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 3-е изд. М.: Физматлит, 2008. С. 524–527.
- [14] 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>
- [15] Долматов В. Д. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 4. С. 375–397 [Dolmatov V. Yu. Detonation-synthesis nanodiamonds: Synthesis, structure, properties and applications // Russ. Chem. Rev. 2007. V. 76. N 4. P. 339–360. <https://doi.org/10.1070/RC2007v076n04ABEH003643>].
- [16] Martin C. R. Nanomaterials: A membrane-based synthetic approach // Science. 1994. V. 266. N 5193. P. 1961–1966. <https://doi.org/10.1126/science.266.5193.1961>
- [17] Wang K., Chung S. Y., Kim D. Morphology of Si nanowires fabricated by laser ablation using gold catalysts // Appl. Phys. A. 2004. V. 79. P. 895–897. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-2790-z>
- [18] Гордон Е. Б., Карабулин А. В., Краснокутский С. А., Матюшенко В. И., Ходес И. И. Образование наноструктур при коагуляции полупроводников в сверхтекучем гелии // Химия высоких энергий. 2017. Т. 51. № 4. С. 261–265. <https://doi.org/10.7868/S0023119317040040> [Gordon E. B., Karabulin A. V., Krasnokutski S. A., Matyushenko V. I., Khodos I. I. Formation of nanostructures during coagulation of semiconductors in superfluid helium // High Energy Chem. 2017. V. 51. N 4. P. 245–249. <https://doi.org/10.1134/S001814391704004X>].
- [19] Синтез, строение и свойства металл/полупроводник содержащих наноструктурированных композитов / Под ред. Л. И. Трахтенберга, М. Я. Мельникова. М.: Техносфера, 2016. С. 438–440.
- [20] 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 nanowiskers 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>].
- [21] Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Калинин С. А., Потапенко А. И., Чепрунов А. А., Ульянников 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., Ulyanikov 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>].
- [22] Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Калинин Ю. Г., Казаков Е. Д., Шереметьев К. Ю., Марков М. Б.,

- Перцев Н. В., Крутиков Д. И.* Некоторые особенности воздействия наносекундного пучка релятивистских электронов на синтактную пену с полимерной основой из бутадиен-нитрильного каучука // ЖПХ. 2021. Т. 94. № 8. С. 1065–1078. <https://doi.org/10.31857/S0044461821080132>
- [Sadovnichii D. N., Milekhin Y. M., Kalinin Y. G., Kazakov E. D., Sheremet'ev K. Yu., Markov M. B., Pertsev N. V., Krutikov D. I. Specific features of the action of a nanosecond relativistic electron beam on a syntactic foam with the butadiene-acrylonitrile rubber base // Russ. J. Appl. Chem. 2021. V. 94. P. 1134–1146. <https://doi.org/10.1134/S1070427221080152>].
- [23] *Gering G. I., Eliseev N. A., Fedosov V. V.* Radiation-acoustic effect in polymers irradiated with high-current electron beams // Mech. Compos. Mater. 1992. V. 27. N 5. P. 609–613. <https://doi.org/10.1007/BF00613489>.
- [24] *Бойко В. И., Валяев А. Н., Погребняк А. Д.* Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // Успехи физ. наук. 1999. Т. 169. № 11. С. 1243–1271 [*Boiko V. I., Valyaev A. N., Pogrebnyak A. D.* Metal modification by high-power pulsed particle beams // Phys.-Usp. 1999. V. 42. N 11. P. 1139–1166. <https://doi.org/10.1070/PU1999v042n11ABEN000471>].
- [25] *Ананьев С. С., Багдасаров Г. А., Гасилов В. А., Данько 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>].
- [26] Электрические свойства полимеров / Под ред. Б. И. Сажина. Л.: Химия, 1986. С. 136.
- [27] *Закревский В. А., Пахотин В. А., Сударь Н. Т.* Влияние крутизны фронта импульса напряжения на электрическую прочность полимеров // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 1. С. 120–125. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.01.46972.98-18> [*Zakrevskii V. A., Pakhotin V. A., Sudar' N. T.* Effect of the voltage pulse front steepness on the electric strength of polymers // Tech. Phys. 2018. V. 63. P. 1814–1819. <https://doi.org/10.1134/S1063784219010262>].
- [28] *Андреанов К. А., Слонимский Г. Л., Цванкин Д. Я., Папков В. С., Левин В. Ю., Квачев Ю. П., Ильина М. Н., Макарова Н. Н.* Рентгенографическое исследование полиарилалкилсилесквиоксанов // Высокомолекуляр. соединения. Сер. Б. 1974. Т. 16. № 3. С. 208–211.
- [29] *Zhang L., Dai D., Zhang R.* The synthesis and X-ray diffraction study of the ladder-like polysilsesquioxanes with side-chain ester groups // Polym. Adv. Technol. 1997. V. 8. N 11. P. 662–665. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1581\(199711\)8:11%3c662::AID-PAT698%3e3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1581(199711)8:11%3c662::AID-PAT698%3e3.0.CO;2-U)
- [30] *Liu C., Liu Z., Xie P., Dai D., Zhang R.* Synthesis and characterization of novel reactive ladder-like polysilsesquioxanes with side-chain ester groups (Ester-Ts) // Polym. Int. 2000. V. 49. P. 509–513. [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200006\)49:6%3c509::AID-PI1390%3e3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200006)49:6%3c509::AID-PI1390%3e3.0.CO;2-L)
- [31] *Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Малинин 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. № 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>].
- [32] *Фортон В. Е., Лоборев В. М., Шиловцев Б. А., Острик А. В.* Физика ядерного взрыва. В 5 т. Т. 2. Действие взрыва. М.: Физматлит, 2010. С. 353–356.
- [33] *Ефремов В. П., Потапенко 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>].
- [34] *Каннель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортон В. Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. С. 208, 224–228.
- [35] *Калмыков Ю. Б., Канель Г. И., Пархоменко И. П., Уткин А. В., Фортон В. Е.* Поведение резины в ударных волнах и волнах разрежения // Прикл. механика и техн. физика. 1990. Т. 31. № 1 (179). С. 126–130.
- [36] *Петров Ю. В., Уткин А. А.* Неустойчивость критических и геометрических характеристик зоны разрушения в условиях откола // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2020. № 3. С. 30–38. <https://doi.org/10.31857/S0572329920030149>

- [Petrov Y. V., Utkin A. A. Instability of critical and geometric characteristics of the fracture zone under spall conditions // *Mechanics of Solids*. 2020. V. 55. N 3. P. 324–331. <https://doi.org/10.3103/S0025654420030139>].
- [37] Демидов Б. А., Ефремов В. П., Петров В. А., Мещеряков А. Н. Динамика объемного разрушения прозрачных диэлектрических полимерных материалов при импульсном воздействии сильнофокусированного электронного пучка // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2009. № 9. С. 18–23.
- [38] Гуревич М. И., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г., Курило А. А., Тельковская О. В., Чукбар К. В. О разрушении упругих полимерных материалов под воздействием электронного пучка // *ЖТФ*. 2021. Т. 91. № 11. С. 1655–1661. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.11.51525.346-20>
- [39] Ададуров Г. А., Гольданский В. И. Превращения конденсированных веществ при их ударно-волновом сжатии в регулируемых термодинамических условиях // *Успехи химии*. 1981. Т. 50. № 10. С. 1810–1827.
- [40] Гольданский В. И., Ямпольский П. А., Баркалов И. М., Густов В. В., Дулин И. Н., Зубарев В. Н., Казакевич А. Г. Химические реакции в полимерах, вызванные ударными волнами // *Высокомолекулярное соединение*. Сер. А. 1968. Т. 10. № 4. С. 799–807.
- [41] Панкратова Л. Н., Тихонов Н. А., Ужегов К. В. Изучение изменения теплофизических и механических свойств силоксановых блок-сополимеров в присутствии циклосилоксанов под действием γ -излучения // *Химия высоких энергий*. 2014. Т. 48. № 1. С. 28–32.
- [42] Тихонов Н. А., Панкратова Л. Н., Полянина Д. А., Кутейникова Л. И. Влияние облучения на термические переходы в силоксановом блок-сополимере БСП 20:5 // *Химия высоких энергий*. 2012. Т. 46. № 2. С. 134–136 [Tikhonov N. A., Pankratova L. N., Polyayina D. A., Kuteinikova L. I. Effect of irradiation on thermal transitions in the siloxane block copolymer BCP 20:5 // *High Energy Chem*. 2012. V. 46. N 2. P. 91–94. <https://doi.org/10.1134/S0018143912020117>].
- [43] Милехин Ю. М., Коптелов А. А., Коптелов А. И., Садовничий Д. Н. Термическая стабильность облученных полимеров // *Тр. XXX Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела»*. Севастополь, 24–29 августа 2020 г. М: ФГБНУ НИИ ПМТ, 2020. С. 121–130.
- [44] 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., Plastinin 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>].
- [45] Трусов Б. Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // *Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2012. № 2. С. 240–249.
- [46] 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>
- [47] Олешко В. И., Бакут Е. Х., Бураченко А. Г., Тарасенко В. Ф. О природе свечения полиметилметакрилата при возбуждении пучком электронов субнаносекундной и наносекундной длительности // *ЖТФ*. 2017. Т. 87. № 2. С. 271–276. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.02.44137.1860>
[Oleshko V. I., Tarasenko V. F., Baksht E. K., Burachenko A. G. On the nature of emissions of polymethylmethacrylate excited by an electron beam of subnanosecond or nanosecond duration // *Tech. Phys*. 2017. V. 62. N 2. P. 299–304. <https://doi.org/10.1134/S1063784217020232>].
- [48] Буркин В. В., Кузнецова Н. С., Лопатин В. В. Волновая динамика электровзрыва в твердых диэлектриках // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. № 5. С. 42–48. [Burkin V. V., Kuznetsova N. S., Lopatin V. V. Wave dynamics of electric explosion in solids // *Tech. Phys*. 2009. V. 54. N 5. P. 644–650. <https://doi.org/10.1134/S1063784209050065>].
- [49] Садовничий Д. Н., Милехин Ю. М., Лопаткин С. А., Вазов В. Ф., Гусев С. А., Бутенко Е. А. Импульсный электрический пробой смесевых энергетических конденсированных систем // *Физика горения и взрыва*. 2010. Т. 46. № 4. С. 107–115 [Sadovnichii D. N., Milekhin Y. M., Gusev S. A., Butenko E. A., Lopatkin S. A., Vazhov V. F. Pulsed electrical breakdown of energetic composite condensed systems // *Combust. Explos. Shock Waves*. 2010. V. 46. N 4. P. 464–471. <https://doi.org/10.1007/s10573-010-0061-1>].
- [50] Ашитков С. И., Комаров П. С., Овчинников А. В., Струлева Е. В., Жаховский В. В., Иногамов Н. А., Агранат М. Б. Абляция металлов и образование наноструктур под действием фемтосекундных лазерных импульсов // *Квант. электрон.* 2014. Т. 44. № 6. С. 535–539 [Ashitkov S. I., Komarov P. S., Ovchinnikov A. V., Struleva E. V., Agranat M. B., Zhakhovskii V. V., Inogamov N. A. Ablation and nanostructuring of metals by femtosecond laser pulses // *Quantum Electron*. 2014. V. 44. N 6. P. 535–539. <https://doi.org/10.1070/QE2014v044n06ABEH015448>].