

## **Влияние взрывной обработки на строение и свойства ультрадисперсного политетрафторэтилена**

**Л. Н. Игнатьева, Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, В. Г. Курявый,  
Г. А. Зверев, Е. Б. Меркулов, А. Б. Слободюк, В. М. Бузник**

---

Изучено влияние обработки взрывным прессованием порошка ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ) (торговая марка "Форум"). Выявлено, что после обработки на поверхности образца появляется корочка, которая имеет иную морфологию, фазовый и химический состав чем исходный образец. Области сплюснутых частиц, соединенных волокнами, которые обнаружены в темной пленке, напоминают, крейзовые структуры. В эти структуры, помимо ПТФЭ, входят соединения железа. При сохранении молекулярного строения полимера в целом, в материале происходит увеличение содержания среднемолекулярных фракций за счет уменьшения низко- и высокомолекулярных фракций. После обработки появляется новый тип разупорядочения, кристалличность материала в целом увеличивается.

**Ключевые слова:** взрывное прессование, УПТФЭ, композиты, фторполимеры, ударная волна, наноструктуры.

---

The effect of processing by explosive compaction on the powder UPTFE-FORUM was studied. It was revealed that the crust appears on the sample surface after treatment. It has a different morphology, phase and chemical composition compared original sample. The flattened particles, connected by fibers reminding kreyzovye structure are found in a dark crust. The compounds of iron in addition to PTFE are found in these structures. The molecular structure of polymer is saved as a whole, but there is an increase in the quantitative content of the middle molecular fractions by reducing of the low-and high ones. After treatment, a new type of disorder are appears but the crystallinity of the material increases.

**Keywords:** Explosive pressing, UPTFE, composites, fluoropolymers, knock wave, nanostructures.

---

### **Введение**

Фторполимеры — активно изучаемый и широко используемый класс соединений. Потребности современных технологий диктуют необходимость улучшения их эксплуатационных характеристик путем модифицирования имеющихся материалов, а также получения новых продуктов, например композитов на основе фторполимеров. Одним из материалов этого класса является порошок УПТФЭ (торговая марка "Форум"), разработанный в Институте химии ДВО РАН [1]. Материал получил практическое применение в качестве ресурсосберегающей добавки в моторные масла. Исследования материала комплексом физико-химических методов выявили его сложное морфологическое строение, так в нем обнаружено присутствие фракций с разной молеку-

лярной массой, различающихся характеристиками и возможностями практического приложения [2 – 4]. Другая особенностью УПТФЭ — его чувствительность к механическим воздействиям [5] при прессовании порошка или ударном воздействии происходит возрастание дефектности УПТФЭ на молекулярном уровне. Это проявляется в генерации парамагнитных радикалов и появлении разветвлений в полимерной цепи за счет образований боковых трифторметилных групп [5, 6]. Отмеченные факторы делают перспективным применение взрывной обработки для УПТФЭ, метода, широко используемого для получения композитных материалов на основе фторполимеров [7]. При этом можно ожидать изменение строения и свойств продукта.

Применение взрывчатых веществ (ВВ) для обработки материалов позволяет создавать в твердом теле

ударные волны, распространяющиеся с высокой скоростью от поверхности нагружения в глубину [7]. Детонацией ВВ можно реализовать в обрабатываемом материале давления от десятков МПа до нескольких сотен ГПа и широкий спектр температур от десятков до тысячи градусов. В полимерных материалах, подвергнутых взрывной обработке изменяются не только плотность материала, но и другие характеристики, обеспечивая проявление новых свойств [7].

Цель настоящей работы — исследование порошка УПТФЭ, подвергнутого взрывной обработке. Изучение его термических свойств, морфологии, молекулярного и субмолекулярного строения.

### Методика эксперимента

#### Получение образцов

Исходный порошок УПТФЭ, обрабатывали в металлических ампулах методом взрывного прессования с давлением в ударном фронте 0,6 ГПа, длительностью 15 мкс (рис. 1). Распределение ударного давления по радиусу ампулы происходит не равномерно (рис. 1б), так как в результате схождения ударных волн в центре ампулы наблюдается повышения ударного давления более 1 ГПа.

После обработки образец УПТФЭ представляет собой двухслойное твердое образование — светлый спрессованный порошок, покрытый тонкой темной корочкой. Это обусловлено тем, что при соударении частиц порошка при ВП происходит их интенсивная деформация, трение и разогрев поверхности слоев (более 500°C), аналогично как в центре ампулы [7]. По мере возможности в работе светлую и темную (корочка) части анализировали отдельно.

### Методы исследования

Морфологию образцов изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии на микроскопе высокого разрешения Hitachi S5500, производства Японии. Элементный анализ проводили на микрондодовой энергодисперсионной приставке Thermo Scientific, производства США.

ИК-спектры поглощения образцов регистрировали при комнатной температуре на спектрометре IFS EQUINOX 55S в области 4000 – 350 см<sup>-1</sup> с ошибкой регистрации частот не более 0,5 см<sup>-1</sup>. Образцы перетирали до мелкодисперсного состояния и запрессовывали в таблетки с материалом KBr.

Дифрактограммы порошков получали на автоматическом дифрактометре D-8 ADVANCE в Cu K<sub>α</sub>-излучении.

Термогравиметрический (ТГ) анализ и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) проводили на приборе STA-449C, фирмы NETZSCH. Для измерения использовали платиновый тигель с крышкой, имеющей калиброванное отверстие, обеспечивающее давление паров разложения 1 атм. и аналогичный тигель с крышкой в качестве образца сравнения. Исследование проводили при скорости нагрева 5°C/мин в потоке сухого аргона, масса исследуемого образца УПТФЭ равнялась 7,670 мг и 11,953 мг для обработанного образца, при точности взвешивания 0,003 мг. Экспериментальная ошибка измерения температуры менее 1°C, потери массы — 0,003 мг, определения теплоты — менее 3%. Нагревание заканчивали после прекращения изменения веса.

Спектры ядерного магнитного резонанса (ЯМР) <sup>19</sup>F регистрировали на твердотельном ЯМР спектрометре Bruker Avance AV-300 (поле 7,04 Тл). Использо-

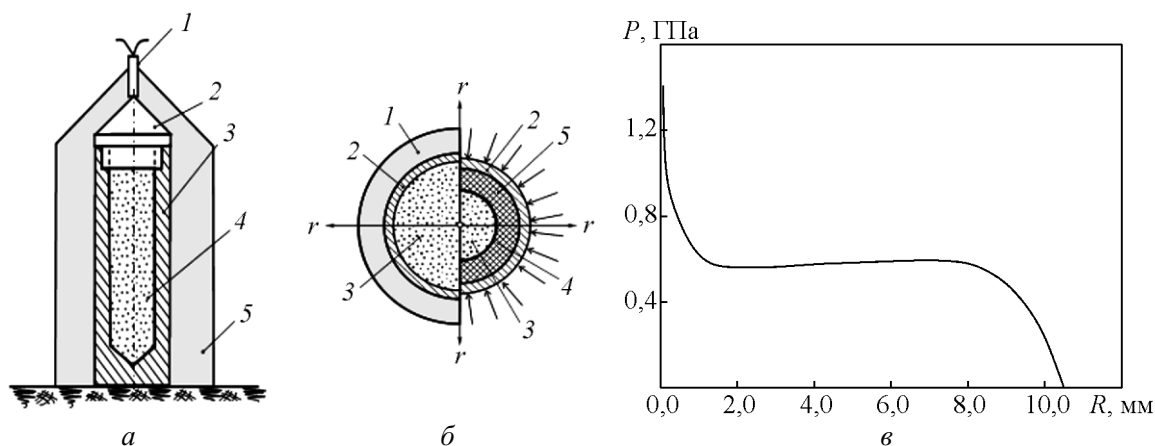


Рис. 1. Схема взрывного обжигания порошка полимера: а — в продольном срезе: 1 — электрический детонатор, 2 — пробка, 3 — ампула, 4 — полимер, 5 — заряд ВВ; б — в поперечном сечении: 1 — ВВ, 2 — ампула, 3 — порошок полимера, 4 — ударный фронт, 5 — спрессованный материал; в — распределение ударного давления по радиусу ампулы.

вали одноимпульсную последовательность, в экспериментах с вращением образца под магическим углом применяли синхронизированное с частотой вращения образца (15 кГц) спиновое эхо. Этанолом для расчета химического сдвига  $^{19}\text{F}$  служил гексафторбензол  $\text{C}_6\text{F}_6$ . При интерпретации спектров использовали результаты квантово-химических расчетов.

### Результаты и обсуждение

Изучение морфологии исходного порошка УПТФЭ проводили неоднократно [8, 9]. Порошок

состоит из частиц близких по форме к сфере со средним диаметром частиц  $\sim 1$  мкм, минимальным диаметром — 100 нм, максимальным диаметром — 3 мкм (рис. 2а).

После взрывной обработки морфология образца существенно меняется. Светлая часть образца имеет вид плотной массы слипшихся в блоки частиц, оплывшего вида (рис. 2б), просматривается слоистое строение частиц (рис. 2в). Можно полагать, что блоки составлены из отдельных и слипшихся в агломераты частиц УПТФЭ, деформированных взрывной волной. Согласно данным энергодисперсионного анализа по-

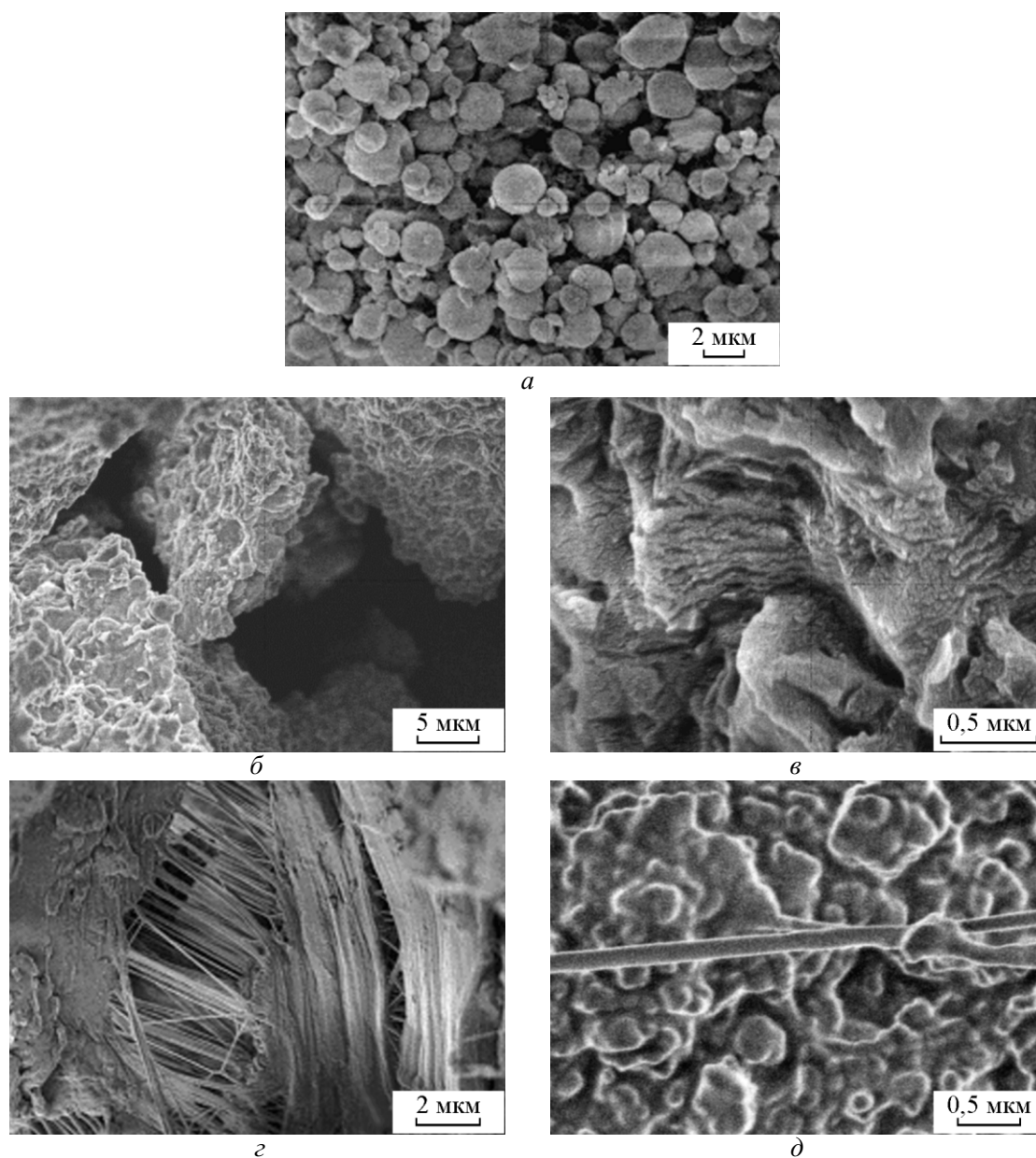


Рис. 2. СЭМ УПТФЭ: а — исходный порошок; б — д — после взрывной обработки; б, в — светлая часть образца; з, д — темная часть.

рошок (светлая часть) состоит из углерода (34,5 ат.%) и фтора (65,5 ат.%).

Темная часть образца (корочка на поверхности) состоит из слипшихся частиц сплюсненной формы, которые, скорее всего, образовались при деформации частиц УПТФЭ (рис. 2д). Помимо этого, даже при небольших увеличениях просматриваются фибрильные структуры диаметром 50 – 200 нм и длиной 5 – 10 мкм. Наблюдаемая конфигурация напоминает крейзовые структуры, включающие области сплошных полимеров, соединенных волокнами [10]. В исходном порошке УПТФЭ волокнистые образования не наблюдали (рис. 2а), как и в светлой части образца (рис. 2б, в).

Энергодисперсионный анализ показал, что в состав нитеобразных структур входят железо, углерод, кислород, фтор (табл. 1). Появление железа в составе стержней, выявленных в поверхностном слое (почти 6 %) связано с попаданием на образец частиц металлической ампулы.

Таблица 1

Содержание элементов в нитеобразных структурах образца УПТФЭ после взрывной обработки (по данным микронзондового энергодисперсионного анализа)

Элемент	Линия	масс. %	ат. %
C	K	48,53 ± 1,44	66,16 ± 1,97
O	K	5,44 ± 0,57	5,57 ± 0,59
F	K	26,00 ± 1,24	22,41 ± 1,07
Fe	L	20,03 ± 4,72	5,87 ± 1,38
Суммарный состав		100,00	100,00

Молекулярное строение исходного материала УПТФЭ ранее изучали спектроскопическими методами [11]. Сделанные на основании этих исследований выводы были подтверждены квантово-химическими расчетами [12]. На рис. 3 представлены ИК-спектры исходного УПТФЭ, светлой и темной частей образца, подвергнутого взрывной обработке.

Как видно из рис. 3, ИК-спектры исходного образца и светлой части образца после обработки очень схожи между собой. Данный факт указывает на то, что взрывная обработка, в целом, не нарушает молекулярного строения материала. Его основу составляют фторуглеродные  $(-CF_2-)_n$  цепи, замыкающиеся  $-CF=CF_2$ -группами, и имеющие  $CF_3$  боковые ответвления. Об этом свидетельствует наличие в ИК-спектрах полос при 1256, 1154 ( $CF_2$ ), 1786 ( $-CF=CF_2$ ) и 986  $cm^{-1}$  (боковая  $-CF_3$  группа [11, 13]). По соотношению интенсивностей полос, характеризующих колебания основных фрагментов цепи ( $CF_2$ ) и концевых групп можно сделать определенные качественные заключения об изменении длины макромолекулярных цепей полимера при его обра-

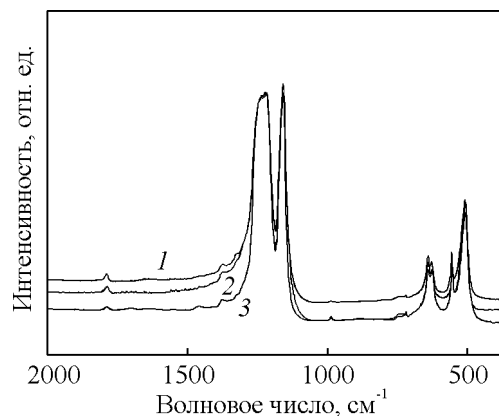


Рис. 3. ИК-спектры поглощения УПТФЭ до (1) и после взрывной обработки: 2 – светлая часть, 3 – темная часть.

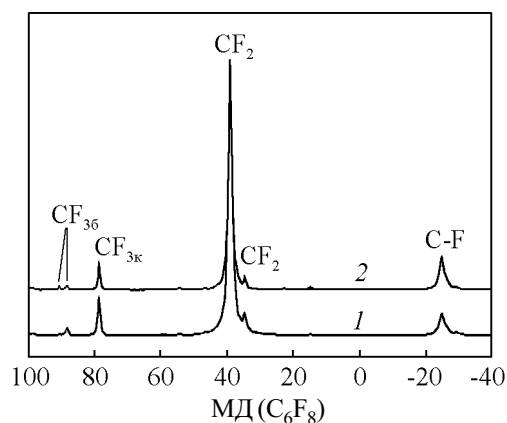


Рис. 4. Спектры ЯМР<sup>19</sup>F образца УПТФЭ: 1 – исходного, 2 – после обработки.

ботке. Для светлой части образца УПТФЭ соотношение интенсивностей полос  $I_{1154}/I_{1786}$ ,  $(CF_2)/(-CF=CF_2)$  в ИК-спектре равно 32. Соответствующая характеристика в ИК-спектре исходного образца УПТФЭ составляет 27. Это можно связать с падением интенсивности полосы при 1786  $cm^{-1}$ , обусловленным уменьшением числа концевых групп после обработки взрывным прессованием. Причинами изменения может быть сокращение доли низкомолекулярных фракций в составе полимера (например, за счет их полимеризации) или замещения олифиновых  $-CF=CF_2$  групп трифторметильными. Однако данные ЯМР<sup>19</sup>F (рис. 4) указывают на уменьшение числа концевых  $-CF_3$  групп, поэтому механизм замещения маловероятен.

В то же время, анализ соотношения  $I_{1154}/I_{986}$ ,  $(CF_2)/(-CF_3)$  в ИК-спектрах (рис. 3) указывает на то, что интенсивность полосы при 986  $cm^{-1}$  возрастает в ИК-спектре обработанного образца почти вдвое (113 — исходный, 58 — обработанный). Поскольку

полоса при  $986 \text{ см}^{-1}$  характеризует колебания боковых  $-\text{CF}-\text{CF}_3$ -групп [8, 11], можно заключить, что дефектность материала возрастает после взрывной обработки за счет увеличения числа боковых трифторметильных групп в структуре полимера. Интенсивность сигнала атомов фтора в  $-\text{CF}$ -группах в спектрах ЯМР $^{19}\text{F}$  также возрастает после обработки.

Для темной части образца, выявлены те же эффекты. Помимо этого в ИК-спектре темной пленки наблюдаются слабые дополнительные полосы при  $1457$ ,  $1709$  и  $881 \text{ см}^{-1}$ , что может быть связано с появлением окисленных форм углерода и сажи, последнее объясняет темный цвет этой части образца [13, 14].

В низкочастотной области спектров (ниже  $800 \text{ см}^{-1}$ ) ИК-спектры исходного образца и светлой части обработанного взрывом образца идентичны. Как известно эта часть спектра дает информацию о надмолекулярной структуре полимера [13]. В частности широкие бесструктурные полосы в области  $700 - 800 \text{ см}^{-1}$  характеризуют аморфность полимера, полоса  $638 \text{ см}^{-1}$  связана с наличием в цепи регулярной спирали. Полоса при  $625 \text{ см}^{-1}$  обычно относится к дефектной структуре, обусловленной взаимным переходом между лево- и правоповорачивающимися спиралями макромолекул ПТФЭ. Отличия ИК-спектра темной части образца видны только в области  $800 \text{ см}^{-1}$ . Изменения формы полосы в области  $800 - 700 \text{ см}^{-1}$  указывают на некоторые изменения характера аморфности образующейся корочки, что может быть связано с появлением окисленного углерода в образце.

Анализ дифрактограмм образца УПТФЭ до и после взрывной обработки (рис. 5) показывает, что в целом в образце остается кристаллическая фаза. На это указывает сохранение интенсивной линии  $2\theta = 18^\circ$ , которая наблюдается на дифрактограммах кристаллических образцов ПТФЭ. Как известно УПТФЭ также кристалличесок (по данным [8, 15] на 90%). Дифрактограммы обработанного образца (светлой и темной части) отличаются друг от друга, и от исходного образца. Дифрактограмма светлой части характеризуется наличием заметного по интенсивности гало в области  $2\theta = 20 - 30^\circ$ , которое не наблюдается у исходного УПТФЭ, но обнаруживается в рентгенограммах образцов ПТФЭ, полученных лазерной обработкой полимера [16] и после разложения ПТФЭ в плазме электрического разряда [17]. Дифрактограмма исходного образца УПТФЭ характеризуется наличием заметного диффузного гало в области  $2\theta = 30 - 50^\circ$ , на рентгенограмме светлой части обработанного образца его интенсивность меньше, но оно все-таки присутствует. Другой особенностью

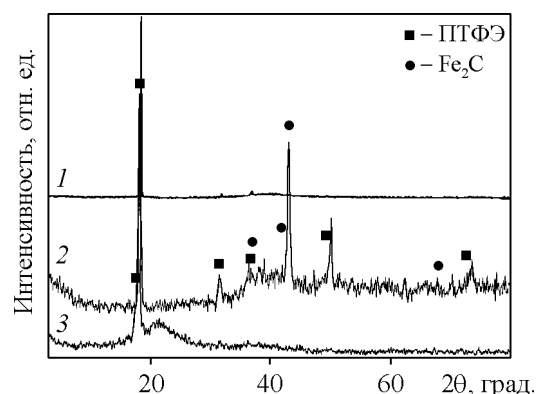


Рис. 5. Дифрактограммы образца УПТФЭ до (1) и после взрывной обработки: 2 – темная часть, 3 – светлая часть.

светлого образца является слабое проявление кристаллических рефлексов при значениях углов больше  $30^\circ$ , которые наблюдаются в исходном образце [15]. Резкое отличие интенсивности кристаллических рефлексов для угла  $18^\circ$  и больших значений, отображает существенную текстуру образца. Скорее всего, светлая часть обработанного образца имеет трехфазную структуру, в которой помимо текстурированной кристаллической фазы ПТФЭ присутствуют две аморфные фракции, первая обусловлена межслоевым рассеянием (гало в области  $20^\circ$ ), вторая, соответствующая гало в области  $30 - 50^\circ$ , отображает наличие фракции отличной по строению от цепочечных компоновок [16]. Доля последней при взрывной обработке уменьшается в сравнении с исходным образцом.

Дифрактограмма темной пленки, образующейся на поверхности образца УПТФЭ после обработки, характеризуется присутствием дополнительных рефлексов кристаллических фаз, которые, согласно РФА анализу, соответствуют карбиду железа, меди, окислу никеля. Гало в области  $2\theta = 30 - 50^\circ$  становится более интенсивным, в то время как в области  $2\theta = 20 - 30^\circ$  исчезает. Следует отметить и большую интенсивность кристаллических рефлексов от ПТФЭ при значениях брегговских углов более  $30^\circ$ , что можно связать с уменьшением структурирования кристаллической фазы в темном образце обработанного УПТФЭ.

Изменения, возникающие при взрывной обработке в морфологии и фазовом составе должны отразиться и на термических свойствах образца. Как известно потеря массы в образце УПТФЭ начинается при температуре  $50^\circ\text{C}$  [18], что связано с наличием в образце низкомолекулярной парафиноподобной фракции, сублимирующей при этой температуре. На кривой ДСК УПТФЭ (рис. 6) наблюдаются

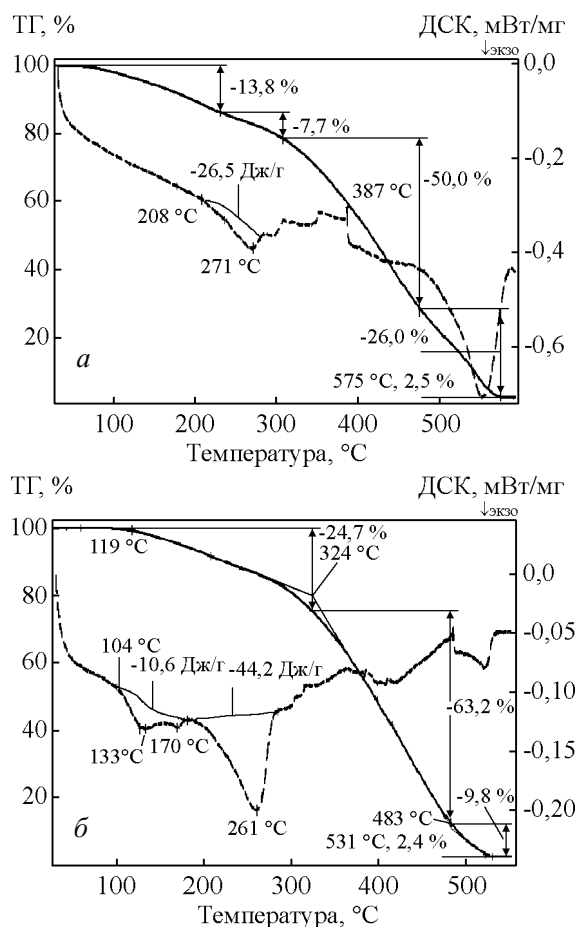


Рис. 6. Данные ТГ и ДСК анализа образцов УПТФЭ до (а) и после (б) взрывной обработки.

эндотфекты при 83 и 215°C, которые отображают плавление низкомолекулярной парафиноподобной фракции и фторполимерной фракции [18].

В обработанном образце потеря массы начинается при температуре выше 120°C (рис. 6), что отображает исчезновение низкомолекулярной фракции при взрывной обработке УПТФЭ. Можно выделить два этапа разложения: 120–324 и 324–531°C. После окончания процесса остается небольшое количество (0,1 – 0,2 мг) продукта черного цвета, скорее всего, какая-то разновидность сажи, возможно, металлы. Содержание этого нелетучего остатка продуктов пиролиза примерно одинаково для обоих образцов.

Наличие нескольких этапов разложения в исходном образце УПТФЭ объясняется присутствием в материале различных фракций, отличающихся молекулярной массой и супрамолекулярным строением, температурой плавления и сублимации. Тот факт, что потеря массы исходного УПТФЭ начи-

нается при более низкой температуре, чем того же образца после обработки и изменение температур окончания процесса свидетельствует об изменении фракционного состава обработанного материала. Возможно, под давлением происходит увеличение содержания среднемoleкулярных фракций за счет уменьшения низко- и высокомолекулярных.

Процесс плавления образцов так же претерпел изменения. В обработанном образце появляются эндотфекты с максимумами при 130 и 170°C, и суммарным тепловым эффектом плавления 10,6 Дж/г, не наблюдавшиеся в исходном УПТФЭ. Можно предположить, что при взрывной обработке происходит частичное исчезновение низкомолекулярной фракции, возможно за счет полимеризационных процессов. При дальнейшем плавлении обработанного образца наблюдается эндотфект с максимумом температуры 261°C и теплотой плавления 44,2 Дж/г, в то время как в исходном образце УПТФЭ максимум температуры эндотфекта 271°C, а его величина 26,5 Дж/г. Таким образом, степень кристалличности среднемoleкулярной фракции увеличилась почти в два раза.

### Заключение

Обработка УПТФЭ взрывным прессованием приводит к ряду изменений в исходном материале. Самым важным результатом, на наш взгляд, является появление корочки на поверхности образца, которая имеет совершенно иную морфологию и фазовый состав. Области сплюснутых частиц, соединенных волокнами, которые обнаружены в темной пленке, напоминают, крейзовые структуры. Как правило, крейзы образуются при термомеханическом растяжении пленок ПТФЭ, в нашем случае они появляются при взрывном сжатии. В эти структуры, помимо ПТФЭ, входят соединения железа. С одной стороны этот результат указывает на частичное удаление атомов железа из стальной ампулы в процессе прессования, с другой стороны — открывает путь получения нового композитного материала. В молекулярном отношении радикальных изменений материала при обработке не происходит. УПТФЭ сохраняет свои особенности, то есть остается низкомолекулярной фракцией ПТФЭ, которая в свою очередь состоит из фракций с различным молекулярным весом. Однако данные ИК-спектроскопического, ЯМР и калориметрического анализа дают основание полагать, что под давлением происходит увеличение содержания среднемoleкулярных фракций за счет уменьшения низко- и высокомолекулярных. При этом, несмотря на то, что после

обработки появляется новый тип разупорядочения, кристалличность материала в целом увеличивается.

### Литература

1. Цветников А.К., Уминский А.А. Патент РФ № 1775419. Способ переработки политетрафторэтилена.
2. Горбенко О.М., Игнатъева Л.Н., Машталяр Д.В., Цветников А.К., Бузник В.М. Термические свойства продуктов сублимации нанодисперсного политетрафторэтилена. *Материалы, Технологии, инструменты*, 2009, т. 14, № 3, с. 27 – 30.
3. Бузник В.М. Новые наноразмерные и микроразмерные объекты на основе политетрафторэтилена. *Российские нанотехнологии. Исследования и разработки*, 2009, т. 4, № 11 – 12, с. 35 – 41.
4. Бузник В.М., Игнатъева Л.Н., Курявый В.Г., Меркулов Е.Б., Савченко Н.Н., Устинов А.Ю., Слободюк А.Б., Никитин Л.Н. Особенности строения и термические свойства микрочастиц “ЯДРО-ОБОЛОЧКА” с составом: парафин-ультрадисперсный политетрафторэтилен. *Высокомолекулярные соединения*, 2010, т. 52, № 12, с. 2147 – 2157.
5. Игнатъева Л.Н., Курявый В.Г., Цветников А.К., Бузник В.М. Исследование влияния давления и импульсного механического воздействия на ИК- и ЭПР-спектры ультрадисперсного политетрафторэтилена. *Журн. структ. химии*, 2002, т. 43, № 5, с. 821 – 826.
6. Ignatieva L., Kuryaviy V., Tsvetnikov A., Pyatov S., Polyshchuk S., Bouznik V. The structures of polytetrafluoroethylene forms modified by various methods. *JPCS*, 2007, v. 68, issue 5-6, L. 1106 – 1111.
7. Адаменко Н.А., Фетисов А.В., Казуров А.В. Взрывная обработка металлополимерных композиций. Волгоград: ВолгГТУ, 2007, 240 с.
8. Бузник В.М., Фомин В.М., Алхимов А.П. и др. Металлополимерные нанокомпозиты (получение, свойства, применение). Новосибирск: Из-во СО РАН, 2005, 260 с.
9. Курявый В.Г., Цветников А.К., Бузник В.М. Особенности иерархического и морфологического строения частиц ультрадисперсного политетрафторэтилена по данным просвечивающей электронной и атомно-силовой микроскопии. *Перспективные материалы*, 2005, № 3, с. 86 – 89.
10. Волинский Л.А., Бакеев Н.Ф., Структурная самоорганизация аморфных полимеров. М.: Физматлит, 2005, 232 с.
11. Игнатъева Л.Н., Бузник В.М. ИК-спектроскопическое исследование политетрафторэтилена и его модифицированных форм. *Российский химический журнал*, 2008, т. 52, № 3, с. 66 – 72.
12. Игнатъева Л.Н., Бузник В.М. Квантово-химические расчеты спектроскопических и топологических параметров фторуглеродных олигомеров  $C_nF_{2n+2}$  и  $C_nF_{2n}$ . *Журнал физической химии*, 2005, т. 79, № 9, с. 1631 – 1638.
13. Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. М.: Химия, 1976, 472 с.
14. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М.: Физматлит, 2001, 582 с.
15. Bouznik V.M., Kirik S.D., Solovyov L.A., Tsvetnikov A.K. A crystal structure of ultra-dispersed form of polytetrafluoroethylene based on X-ray powder diffraction data. *Powder Diffrac.*, 2004, v. 19, no. 2, p. 153 – 141.
16. Лебедев Ю.А., Королев Ю.М., Поликарпов В.М., Игнатъева Л.Н., Антипов Е.М. Рентгенографический анализ политетрафторэтилена. *Кристаллография*, 2010, т. 55, № 4, с. 651 – 656.
17. Курявый В.Г., Бузник В.М., Игнатъева Л.Н., Зверев Г.А., Кайдалова Т.А., Суховерхов С.В. Совместная деструкция политетрафторэтилена и различных электродов в плазме высоковольтного разряда. *Материалы-технологии-инструменты*, 2010, т. 15, № 1, с. 84 – 88.
18. Бузник В.М., Горбенко О.М., Игнатъева Л.Н., Цветников А.К., Машталяр Д.В. Термические свойства продуктов сублимации ультрадисперсного политетрафторэтилена. *Перспективные материалы*, 2007, № 6, с. 56 – 59.

Статья поступила в редакцию 15.02.2012 г.

**Игнатъева Лидия Николаевна** — Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток), доктор химических наук. Специалист в области физико-химического исследования фторполимерных материалов. E-mail: ignatieva@ich.dvo.ru.

**Адаменко Нина Александровна** — Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) (г. Волгоград), доктор технических наук, профессор. Специалист в области создания полимерных композиционных материалов взрывным прессованием. E-mail mv@vstu.ru.

**Казуров Андрей Владимирович** — Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) (г. Волгоград), аспирант. Специалист в области создания металлополимерных композиционных материалов взрывным прессованием. E-mail mv@vstu.ru.

**Курявый Валерий Георгиевич** — Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток), кандидат химических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области микроскопии и микрозондового анализа. E-mail: kvg@ich.dvo.ru.

**Зверев Григорий Александрович** — Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток), инженер. Специалист в области микроскопии и микрозондового анализа. E-mail: bronatin@mail.ru.

**Меркулов Евгений Барисович** — Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток), кандидат химических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области микроскопии и микрозондового анализа. E-mail: merkulov@ich.dvo.ru.

**Слободюк Арсений Борисович** — Институт химии ДВО РАН (г. Владивосток), научный сотрудник. Специалист в области ядерно-магнитного резонанса. E-mail: arsenii@ich.dvo.ru.

**Бузник Вячеслав Михайлович** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), действительный член Российской Академии наук. Специалист в области исследования полимеров и наноматериалов. E-mail: bouzник@ngs.ru.