

Особенности структурообразования в полиимид-фторопластовых композиционных материалах при ударно-волновой обработке

Н. А. Адаменко, А. В. Казуров, С. М. Рыжова, И. В. Сергеев

Рассмотрены особенности структурообразования в полиимид-фторопластовых композиционных материалах (КМ) при ударно-волновой обработке (УВО) порошковых смесей кольцевым ударным фронтом. Установлено, что в зависимости от применяемых параметров УВО реализуются различные механизмы ударного уплотнения полимерной смеси и структурного взаимодействия в полиимид-фторопластовых КМ. При параметрах ниже оптимальных, микроструктура получаемых образцов имеет практически такой же характер, как у статически спрессованных материалов, и, следовательно, низкий уровень физико-механических свойств КМ. В области оптимальных параметров УВО происходит максимальное уплотнение полимерных прессовок и в механизме уплотнения наблюдается переход от равноосной деформации к поперечной. В микроструктуре таких прессовок деформация частиц представляется результатом равномерного пластического течения, при котором они заметно сплющиваются по направлению ударного сжатия и растекаются в поперечном направлении. Показано, что структура полиимида, полученного статическим прессованием, представляет собой полимер, состоящий из аморфной области с равномерно распределенными в ней участками кристаллической фазы, а фторопласт-4 имеет характерную для него слоистую структуру, состоящую из чередующихся аморфных и кристаллических областей. Установлено, что в результате УВО структура в направлении движения ударного фронта более жесткого стеклообразного полиимида значительно деформируется и приобретает пластинчатую форму, а более мягкий высокоэластичный фторопласт-4 деформируется с образованием блочных частиц нерегулярной формы, аналогичных по форме частицам, полученным при теломеризации. При критических параметрах УВО происходит скачкообразное изменение структуры в центре прессовки, сопровождающееся появлением наноразмерных фаз, изменением тонкой структуры и повышением микротвердости. При этом образуются как отдельные монокристаллические включения размером от 150 до 800 нм, так и агломераты, состоящие из частиц размером от 50 до 550 нм.

Ключевые слова: полиимид, фторопласт-4, композиционный материал, ударно-волновая обработка, структурообразование.

Введение

В узлах трения современной техники все более широкое распространение находят антифрикционные термостойкие термопластичные полимеры, способные длительно работать в тяжелых условиях эксплуатации [1]. Перспективными материалами с высокими механическими свойствами и термостойкостью являются полиимиды (ПИ), но возрастающие запросы современной техники требуют повышения их триботехнических свойств, поэтому в них вводят до 30–50 об. % дисперсных наполнителей, таких как политетрафторэтилен (фторопласт-4, Ф-4),

что позволяет значительно снизить коэффициент трения и улучшить прирабатываемость полимерных триботехнических деталей, тем самым существенно повышая их эксплуатационные характеристики [2]. Однако при его использовании в качестве наполнителя возникает проблема высокой вязкости расплава этих полимеров и обеспечения хорошего адгезионного взаимодействия между ними, что связано с инертностью Ф-4 [1, 3].

Основной способ получения полиимид-фторопластовых композиционных материалов (КМ) — методы порошковой металлургии: смешивание порошков полимеров, последующее изостатическое

прессование и спекание [3, 4]. Однако из-за низкого адгезионного взаимодействия между компонентами не всегда возможно в полной мере реализовать высокие значения прочности при растяжении, ударной вязкости и пластичности, что ограничивает эксплуатационные способности создаваемых КМ. Одним из путей решения данной проблемы является применение высокоэнергетических методов формования КМ, в частности ударно-волновой обработки (УВО) [2, 5, 6]. При этом качественный скачок эксплуатационных свойств полиимид-фторопластовых материалов может быть достигнут за счет комплексной реализации процессов, обеспечивающих повышение адгезионного взаимодействия компонентов [7, 8]. Формирующиеся в результате взаимодействия полимеров на молекулярном и надмолекулярном уровнях материалы представляют собой фактически новые полимерные системы с иным уровнем физических свойств и не подчиняющиеся закону аддитивности для смеси этих полимеров [9].

УВО порошковых смесей полимеров — перспективный способ получения КМ, обеспечивающий одновременно прессование, формование, измельчение, плавление, термодинамическую активацию и консолидацию порошков полимеров. УВО способствует прохождению процессов структурообразования как “сверху вниз”: путем размельчения крупных частиц порошков до микро- и нанометровых размеров, так и “снизу вверх”, путем взаимодействия отдельных сегментов макромолекул (макрорадикалов), образовавшихся под кратковременным воздействием высоких давлений и температур [2, 6]. Активному измельчению до нанометровых размеров способствует также механическое стеклование полимеров при УВО [10, 11]. Особый интерес представляет УВО скользящей ударной волной полимер-полимерной смеси в цилиндрической ампуле, так как позволяет создавать условия формирования КМ при заданном сочетании скорости детонации взрывчатого вещества (ВВ) и исходной пористости порошковой смеси, приводящие к резкому повышению давления и температуры при сжатии ударных волн, что сопровождается изменением структуры и механических свойств материала в центре прессовки [12 – 14].

Цель работы — исследование закономерностей формирования структуры и свойств полиимид-фторопластовых КМ при УВО их порошковых смесей.

Методика эксперимента

В работе проводили сравнительные исследования влияния статического прессования (СП) и УВО на структурообразование равноплотных КМ на основе

полиимида ПМ-69 (ГОСТ 25288-82), наполненного 50 % Ф-4 (ГОСТ 10007-80). Точность объемных пропорций обеспечивали смешиванием навесок порошков полимеров заданной массы (с точностью до 0,01 г), взвешенных на лабораторных электронных весах ОНАУС-123. КМ получали СП в пресс-формах давлением 0,3 ГПа и УВО в цилиндрических ампулах давлением в ударном фронте 0,2 – 2 ГПа [13]. УВО проводили на композиционных смесях с разной пористостью (от 30 до 50 %), что обеспечивали предварительной статической подпрессовкой в ампуле давлением от 5 до 10 МПа. Спекание при температуре 390 °С КМ после СП и УВО проводили в замкнутом объеме, так как оно способствует интенсификации процессов взаимодействия между полимерными компонентами. При анализе результатов УВО использовали основные физические параметры взрывного процесса в компактируемом КМ, которые рассчитывали с помощью компьютерной программы, разработанной в Волгоградском государственном техническом университете [14]: работу по обжатию прессуемого порошкового материала (A_B); энергию, передаваемую порошку в ударном фронте (E_Φ) и давление в ударном фронте (P).

Свойства КМ зависят от структурных изменений во время ударно-волнового уплотнения, происходящих по разным механизмам, определяемым исходными параметрами порошковой смеси и интенсивности взрывного воздействия. Микроструктуры КМ исследовали на оптическом микроскопе “Olympus” BX-61 в отраженном свете и атомно-силовом микроскопе Solver PRO непосредственно после полировки микрошлифов до зеркальной поверхности ($R_a = 0,63 - 2,5$ мкм). Так как более твердая фаза меньше подвергается полировке, то это позволило идентифицировать на наноуровне образование упрочняющих фаз в структуре КМ. Измерение диаметра наноструктурированной зоны исследуемых КМ осуществляли с помощью программного обеспечения AnalySIS® на снимках с оптическим увеличением $\times(500 - 1000)$. Исследование тонкой структуры КМ осуществляли с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре “ДРОН-3.0”, анализируя профили рефлексов с индексами 100 и 003 для Ф-4. Исследование изменений кристаллической структуры Ф-4 в полиимид-фторопластовых КМ включало определение степени кристалличности (χ) по методике [15]. Для определения влияния параметров УВО на структурные изменения исследуемых композиций использован метод структурного анализа (РСА), в котором на основании измерения физического уширения интерференционных линий (β), определяют два параметра модели Уоррена [16]:

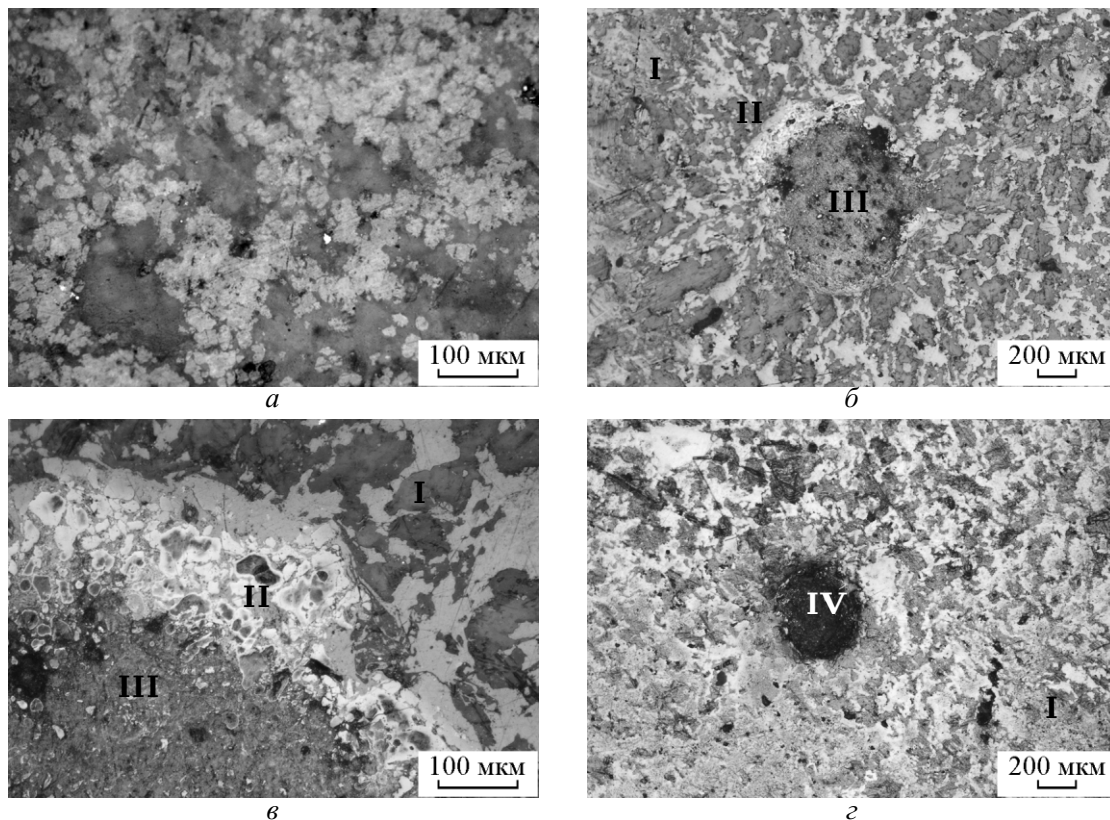


Рис. 1. Микроструктура КМ 50 % ПИ + 50 % Ф-4, полученных на различных параметрах: а – СП, б, в – оптимальных, г – критических; I – основная зона; II – переходная зона; III – зона наноструктурирования; IV – кумулятивное отверстие.

размер областей когерентного рассеивания рентгеновских лучей (ОКРЛ) и величины микродеформации (МКД, $\Delta a/a$), характеризующей величину макронапряжений.

Взаимосвязь структуры с механическими свойствами анализировали по изменению микротвердости, которую определяли на микротвердомере ПМТ-3М методом восстановленного отпечатка с нагрузкой 0,2 Н. Приведенные зависимости микротвердости и диаметра центральной зоны являются результатом аппроксимации экспериментальных данных, полученных при испытании не менее 5 одинаковых образцов КМ.

Результаты исследований и их обсуждение

Свойства КМ зависят от структурных изменений во время ударно-волнового уплотнения, на которые оказывает влияние исходные параметры порошковой смеси и интенсивности взрывного воздействия. Результаты исследования микроструктуры показали, что в зависимости от применяемых параметров УВО реализуются разные механизмы ударного уплотнения

полимерной смеси и структурного взаимодействия в полиимид-фторопластовых КМ. При давлениях УВО $P < 0,2 - 0,3$ ГПа, микроструктура получаемых образцов имеет практически такой же характер, как у статически спрессованных материалов (рис. 1а), и, следовательно, низкий уровень физико-механических свойств КМ [5, 6, 13]. С повышением давления УВО до $P = 0,4 - 1$ ГПа меняется механизм уплотнения, происходит максимальное уплотнение полимерных прессовок (эти параметры УВО можно считать оптимальными) и в механизме уплотнения наблюдается переход от равноосной деформации к поперечной. В микроструктуре таких прессовок деформация частиц представляется результатом равномерного пластического течения, при котором они заметно сплющиваются по направлению ударного сжатия и растекаются в поперечном направлении [6].

Качественные отличия микроструктурных механизмов уплотнения в композиционной смеси при УВО возможны в центре ампулы при оптимальной пористости, определенных энергетических и силовых параметрах ($A_b \sim 52 - 82$ кДж/м, $E_\phi \sim 24 - 28$ кДж/м, $P \sim 1 - 2$ ГПа), способствующих получению КМ с

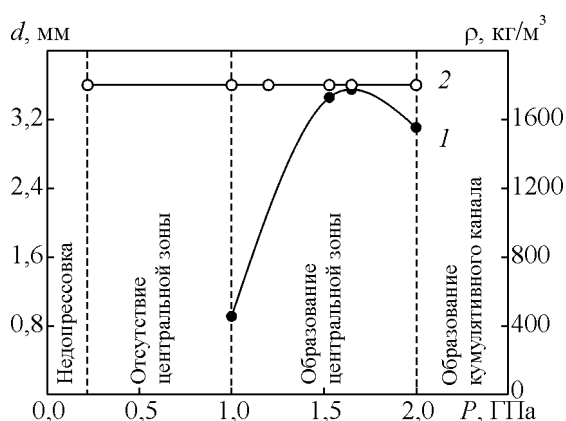


Рис. 2. Зависимость изменения плотности (1) и диаметра центральной зоны (2) полиимид-фторопластовых КМ от давления УВО.

наиболее высоким адгезионным взаимодействием компонентов [5]. Применение УВО полиимид-фторопластовой порошковой смеси с пониженной

пористостью (30 %) критическими ударными давлениями ($P = 1 - 2$ ГПа) способствует наноструктурированию КМ, в результате стадия переукладки частиц в более плотную упаковку преимущественно проходит через их измельчение (рис. 1б, в) за счет схождения ударных волн и их отражения. При прохождении ударного фронта сначала возникают активированные состояния полимеров. За счет микропластических деформаций во фронте ударной волны образуются дефектные состояния физической и химической природы. Активным механизмом при высоком давлении, реализуемом при УВО, является разрыв полимерной цепи с образованием макро-радикалов. Образование свободных радикалов означает перевод вещества в химически наиболее активную форму, наделенную повышенной энергией. Свободные радикалы (или дополнительные концевые группы при их рекомбинации) обладают достаточно высокой реакционной способностью (пониженной

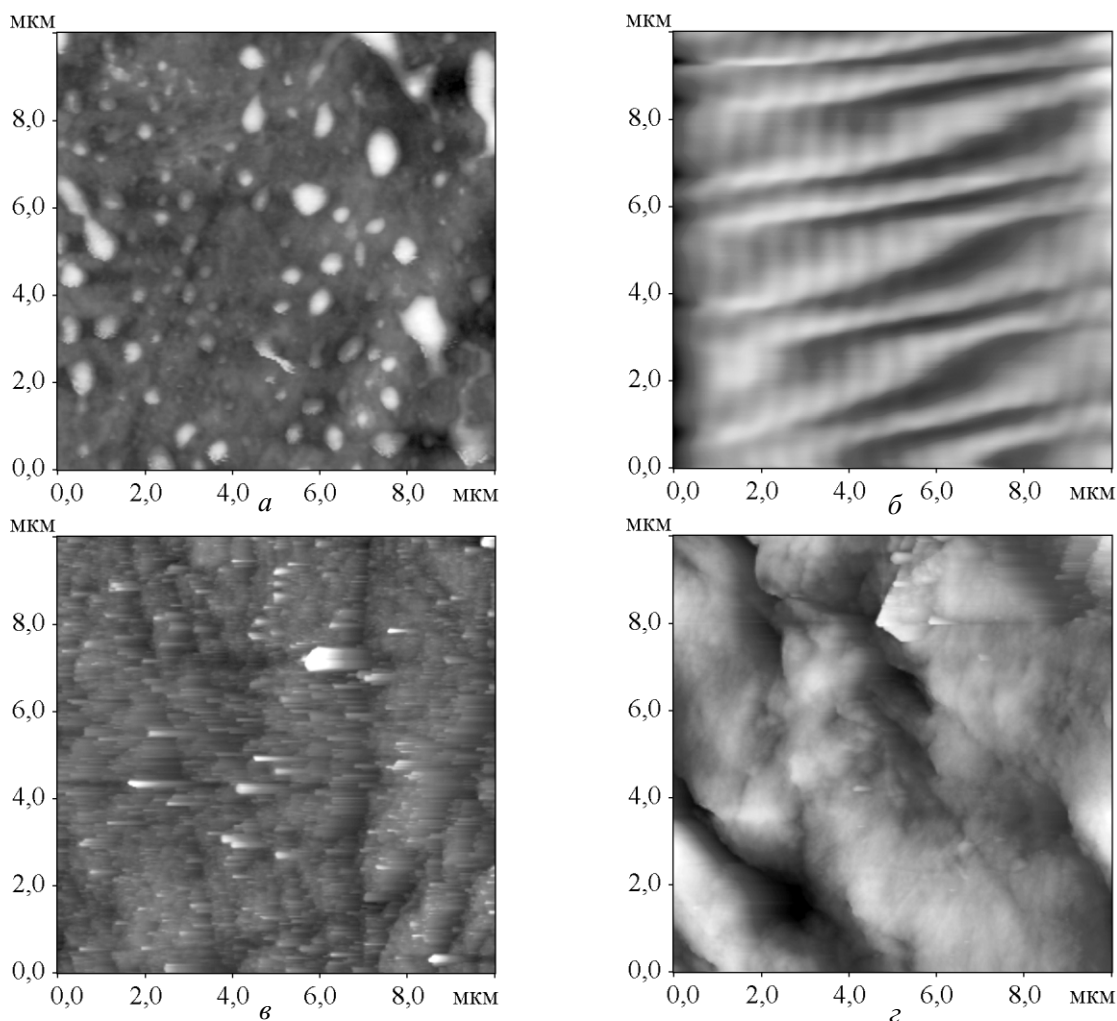


Рис. 3. Микроструктуры КМ 50 % ПИ + 50 % Ф-4, после СП (а, б) и УВО (в, г) на критических параметрах (основная зона): а, в – ПИ; б, г – Ф-4.

Тонкая структура Ф-4 в КМ 50 % ПИ + 50 % Ф-4 (линии [100] и [003])

Давление УВО, P , ГПа	Степень кристалличности, χ , %	Микродеформация, $\Delta a/a \cdot 10^{-3}$, %	Напряжения второго рода, σ_{II} , МПа	Размер ОКР, нм
0,2 – 0,3	56	3,64	1,49	61,1
0,4 – 1,0	53 – 58	6,94	2,4	39,3
1,0 – 2,0 (зона наноструктурирования)	35 – 40	5,83	2,8	31,8

энергией активации) и инициируют последующие химические реакции. При этом в условиях механических и тепловых полей и достаточно высоких для полимера температур, обеспечивающих подвижность элементов структуры, что облегчается рекомбинацией макрорадикалов и химическими преобразованиями [2], происходит формирование новой структуры, в том числе с наноразмерными параметрами. При достаточно высокой температуре возможны процессы деструкции, пиролиза или карбонизации полимера, которые идут более активно, чем выше значение давления в ударном фронте [2]. Согласно микроструктурным исследованиям в результате УВО на критических параметрах полиимид-фторопластовых КМ наблюдается появление переходной зоны (рис. 1б, в, зона II) между зоной наноструктурирования и основной. Превышение критических параметров УВО ($A_b > 92$ кДж/м, $E_\phi > 42$ кДж/м, $P > 2$ ГПа) приводит к выбросу материала в центр прессовки и образованию кумулятивного канала (рис. 1г). зависимости

Из рис. 2 видно, что образование наноструктур происходит в узком интервале давлений в ударном

фронте (от 1 до 2 ГПа), причем величина давления неоднозначно влияет на размер получаемой центральной зоны. При увеличении давления в ударном фронте происходят следующие закономерности: от 1 до 1,6 – 1,8 ГПа — значительный рост размера центральной зоны (от 0,4 – 0,5 до 1,7 – 1,8 мм), что связано с повышением общего энергетического воздействия и увеличением размеров участка высокого давления в центре ампулы; от 1,6 – 1,8 до 2 ГПа — уменьшение размера центральной зоны до 1,6 – 1,7 мм, когда избыточное давление способствует термодеструкции полимеров. Дальнейшее повышение давления (выше 2 ГПа) приводит к образованию кумулятивного канала за счет выноса материала из центральной части прессовки. Плотность полиимид-фторопластовых КМ независимо от прикладываемых давлений остается неизменно высокой (рис. 2).

Исследования, проведенные на атомном-силовом микроскопе, позволили выявить существенные изменения в структуре полиимид-фторопластовых КМ после УВО в сравнении со СП (рис. 3). Структура ПИ, полученного СП (рис. 3а), представляет собой

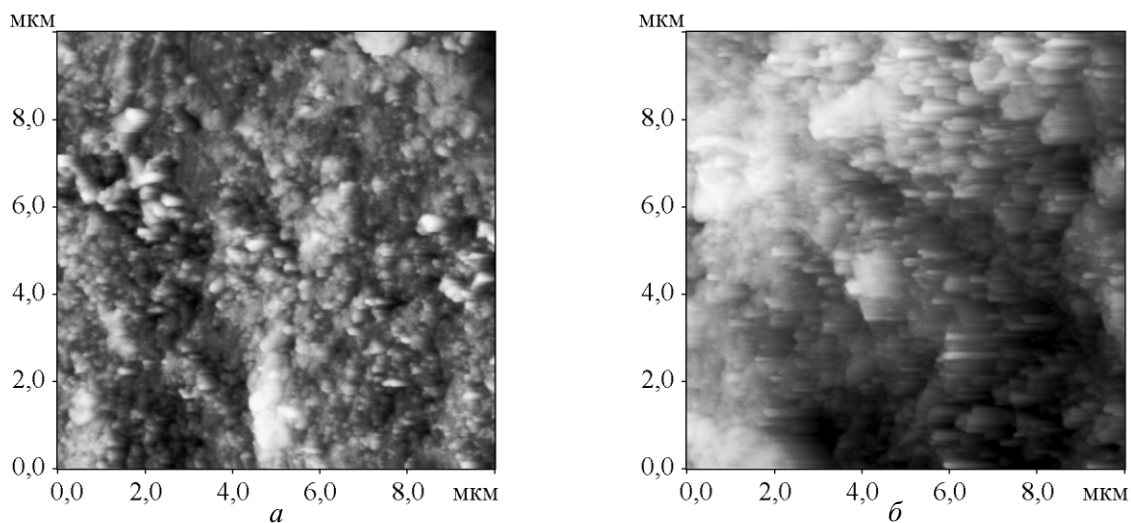


Рис. 4. Наноструктуры КМ 50 % ПИ + 50 % Ф-4 после УВО на критических параметрах с размером нанофазы, нм: а – 150 – 800; б – 50 – 550.

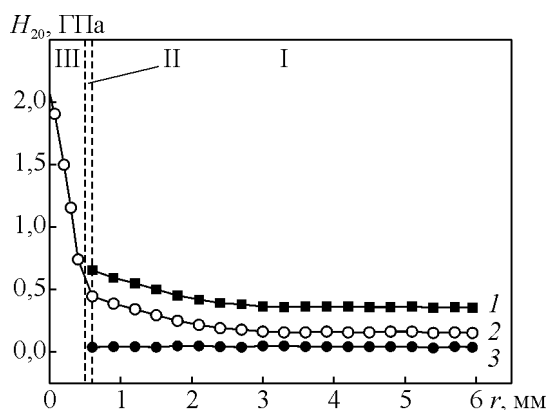


Рис. 5. Изменение микротвердости по радиусу прессовки 50 % ПИ+50 % Ф-4: 1 — ПИ; 2 — КМ ПИ+Ф-4; 3 — Ф-4: I — основная зона; II — переходная зона; III — зона наноструктурирования.

полимер, состоящий из аморфной области с равномерно распределенными в ней участками кристаллической фазы, а Ф-4 (рис. 3б) имеет характерную для него слоистую структуру, состоящую из чередующихся аморфных и кристаллических областей [1, 4]. В результате УВО на критических параметрах ($P = 1 - 2$ ГПа) более жесткий стеклообразный ПИ (рис. 3в) значительно деформируется в направлении движения ударного фронта и приобретает пластинчатую форму, а более мягкий высокоэластичный Ф-4 (рис. 3г) деформируется с образованием блочных частиц нерегулярной формы, аналогичных по форме частицам, полученным при теломеризации Ф-4 [17]. Применение критических параметров УВО приводит к значительным изменениям в структуре центральной части (зоны) прессовки: в образовавшихся наноструктурированных участках (рис. 4) прослеживаются как отдельные монокристаллические нанометровые включения $\sim 150 - 800$ нм (рис. 4а), так и агломераты такого же размера, состоящие из частиц размером от 50 до 100 нм (рис. 4б), эти частицы имеют более высокую твердость, так как при полировке сточились на 40–270 нм меньше, чем матрица.

С помощью РСА установлено (таблица), что по сравнению со структурой, полученной СП, образование структуры при УВО сопровождается уменьшением размера ОКР от 61,1 до 31,8–39,3 нм, повышением $\Delta a/a$ от $3,64 \cdot 10^{-3}$ до $(5,83 - 6,94) \cdot 10^{-3} \%$ и напряжений второго рода (σ_{II}) от 1,49 до 2,4–2,8 МПа и снижением χ Ф-4 в наноструктурированном композите от 56 до 35–40 %.

Понижение степени кристалличности вызвано увеличением взаимодействия между полимерами и изменением термодинамического режима формирования структуры, что в совокупности приводит к разориентации макромолекул [6]. Уменьшение

размеров ОКР, повышение уровня $\Delta a/a$ и σ_{II} связано с более интенсивным дроблением блоков мозаики кристаллической структуры Ф-4 при высоких ударных давлениях.

Измерение микротвердости показало, что можно выделить 3 характерных участка ее изменения по радиусу. В основной зоне (I) твердость повышается незначительно (0,15–0,20 ГПа) вследствие усиления адгезионного взаимодействия и монолитизации полимеров. В основной зоне твердость ПИ и КМ не изменяется, при этом твердость КМ ниже, чем у жесткоцепного стеклообразного ПИ за счет достаточно мягкого и мало упрочняемого УВО Ф-4. В переходной зоне (II) и основной части твердость возрастает до 0,20–0,60 ГПа за счет упрочнения наноструктурированным композитом и формирования более жесткого материала. Повышению твердости КМ способствует присутствие жесткоцепного ПИ, сдерживающего развитие деформаций, возникающих вследствие внедрения индентора в поверхность материала. Образование наноструктур в КМ сопровождается интенсивным повышением твердости в 1,5–3,5 раза до 0,60–2,10 ГПа в центре ампулы (III) (рис. 5), что свидетельствует о формировании новой структуры на основе наноразмерных составляющих. Это происходит за счет деструктивно-рекомбинационных процессов и переукладки макромолекул в более плотную упаковку с образованием более прочных наночастиц. Вариация значений твердости в широких пределах (рис. 5) связана с неоднозначностью влияния ударных давлений и энергий по радиусу прессовки на структуру КМ.

Выводы

1. Установлено, что для реализации наноструктурирования необходимо, чтобы давление и энергия взрывного воздействия в порошковой полимер-полимерной смеси были достаточны не только для достижения структуры предельного уплотнения, но и для качественного изменения структурного состояния в результате интенсивной пластической деформации, физико-химического взаимодействия структурных компонентов, что достигается при параметрах УВО $P = 1 - 2$ ГПа, когда в центральной части прессовки происходит усиление ударных волн вследствие эффекта их схождения.

2. Образование наноструктур сопровождается значительным повышением твердости и изменением тонкой структуры полимера. Величина давления влияет на размер получаемой центральной зоны, при этом плотность полиимид-фторопластовых КМ остается неизменно максимальной.

3. Выявлены существенные изменения в структуре полиимид-фторопластовых КМ после УВО в сравнении с СП. Установлено, что при УВО $P = 1 - 2$ ГПа в центральной части прессовки образуются как отдельные монокристаллические включения (150 – 800 нм), так и агломераты, состоящие из частиц размером от 50 до 100 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №14-29-00158.

Литература

1. Головкин Г.С., Дмитренко В.П. Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов. М.: РУСАКИ, 2005, 472 с.
2. Адаменко Н.А., Фетисов А.В., Казуров А.В. Взрывная обработка металлополимерных композиций: монография. Волгоград: ВолГТУ, 2007, 240 с.
3. Крыжановский В. К. Производство изделий из полимерных материалов; под общей ред. В. К. Крыжановского. СПб.: Профессия, 2008, 460 с.
4. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006, 624 с.
5. Адаменко Н.А., Казуров А.В., Сергеев И.В. Особенности формирования структуры в никель-фторопластовых нанокompозитах при взрывной обработке. Российские нанотехнологии, 2012, т. 7, № 5 – 6, с. 70 – 74.
6. Адаменко Н.А., Казуров А.В., Фетисов А.В., Агафонова Г.В. Получение полимерных нанокompозитов взрывной обработкой. Российские нанотехнологии, 2009, т. 4, № 1 – 2, с. 137 – 144.
7. Бузник В.М. Новые наноразмерные и микро-размерные объекты на основе политетрафторэтилена. Российские нанотехнологии, 2009, т. 4, № 11 – 12, с. 35 – 41.
8. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008, 660 с.
9. Юдин В.Е., Светличный В.М. Влияние структуры наночастиц наполнителя на физические свойства полиимидных композитов. Российский химический журнал (журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2009, № 4, т. LIII, с. 75 – 85.
10. Денисаев А.А., Штейнберг Ф.С., Берлин А.А. Иницирование реакции в тонкопленочных многослойных образцах алюминий-фторопласт при ударе на копре. Химическая физика, 2008, т. 27, № 6, с. 85 – 92.
11. Кожушко А.А., Синани А.Б. Скорость нагружения и хрупкость твердых тел. Физика твердого тела, 2005, т. 47, № 5, с. 812 – 815.
12. Курдюмов А.В., Бритун В.Ф., Ярош В.В. Синтез сверхтвердых фаз углерода и нитрида бора в наноструктурном состоянии методом ударного сжатия. Материаловедение, 2009, № 1, с. 33 – 40.
13. Адаменко Н.А., Трыков Ю.П., Казуров А.В. Свойства железифторопластового композита, полученного взрывным прессованием в ампулах. Перспективные материалы, 2003, № 4, с. 83 – 86.
14. Rogozin V.D., Kazurov A.V., Adamenko N.A. Анализ параметров взрывного прессования металлополимерной смеси в цилиндрической ампуле. Известия Волгоградского гос. технического университета. Сер. Проблемы материаловедения, сварки, прочности в машиностроении, 2008, № 10 (48), вып. 2, с. 42 – 44.
15. Мартынов М.А., Вылегжанина К.А. Рентгенография полимеров. М.: Химия, 1972, 98 с.
16. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС, 2002, 360 с.
17. Кирюхин Д.П., Ким И.П., Бузник В.М., Игнатъева Л.Н., Курявый В.Г., Сахаров С.Г. Радиационно-химический синтез теломеров тетрафторэтилена и их использование для создания тонких защитных фторполимерных покрытий. Российский химический журнал (журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева), 2008, т. LII, № 3, с. 66 – 72.

References

1. Golovkin G. S., Dmitrenko V. P. *Nauchnye osnovy proizvodstva izdely iz termoplastichnykh kompozitsionnykh materialov* [Scientific basics of details production from thermoplastic composite materials]. Moscow, Rusaki Publ., 2005, 472 p.
2. Adamenko N.A., Fetisov A.V., Kazurov A.V. *Vzryvnaya obrabotka metallopolymernykh kompozitsy* [Explosive treatment of metal-polymer compounds]. Volgograd, RF, VolgSTU Publ., 2007, 240 p.
3. Kryzhanovsky V.K. *Proizvodstvo izdely iz polimernykh materialov* [Production of articles from polymer materials]. St-Petersburg, Professiya Publ., 2008, 460 p.
4. Mikhaylin Yu. A. *Termoustoychivye polimery i polimernye materialy* [Thermostable polymers and polymeric materials]. St-Petersburg, Professiya Publ., 2006, 624 p.
5. Adamenko N.A., Kazurov A.V., Sergeyev I.V. *Osobennosti formirovaniya struktury v nikel-ftoroplastovykh nanokompozitakh pri vzryvnoy obrabotke* [Peculiarities of structure formation in nickel-PTFE nanocomposites under explosive treatment]. *Rossyskiye nanotekhnologii — Nanotechnologies in Russia*, 2012, vol. 7, no. 5 – 6, pp. 70 – 74.
6. Adamenko N.A., Kazurov A.V., Fetisov A.V., Agafonova G.V. *Polucheniye polimernykh nanokompozitov vzryvnoy obrabotkoy* [Obtaining of polymer nano-composites by explosive treatment]. *Rossyskiye nanotekhnologii — Nanotechnologies in Russia*, 2009, vol. 4, no. 1 – 2, pp. 137 – 144.
7. Buznik V. M. *Novye nanorazmernye i mikrorazmernye obyektu na osnove politetraforetilena* [New nano-sized and micro-sized objects on polytetrafluoroethylene basis]. *Rossyskiye nanotekhnologii — Nanotechnologies in Russia*, 2009, vol. 4, no. 11 – 12, pp. 35 – 41.
8. Mikhaylin Yu. A. *Spetsialnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Special polymer composite materials]. St-Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2009, 660 p.

9. Yudin V.E., Svetlichny V.M. Vliyaniye struktury nanochastits napolnitelya na fizicheskiye svoystva poliimidnykh kompozitov [Effect of structure of filler nanoparticles on physical properties of polyimide composites]. *Rossysky khimichesky zhurnal — Russian journal of general chemistry*. 2009, vol. LIII, no. 4, pp. 75 – 85.
10. Denisayev A.A., Shteynberg F. S., Berlin A. A. Initsirovaniye reaktsii v tonkoplenochnykh mnogoslonykh obraztsakh alyuminy-ftoroplast pri udare na kopre [Initiation of reaction in thin-film aluminum-PTFE multilayer samples under impact in pendulum machine]. *Khimicheskaya fizika — Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 27, no. 6, pp. 85 – 92.
11. Kozhushko A.A., Sinani A.B. Skorost nagruzheniya i khrupkost tverdykh tel [Loading rate and fragility of solid bodies]. *Fizika tverdogo tela — Physics of the solid state*, 2005, vol. 47, no. 5, pp. 812 – 815.
12. Kurdyumov A.V., Britun V.F., Yarosh V.V. Sintez sverkhtverdykh faz ugleroda i nitrida bora v nanostrukturnom sostoyanii metodom udarnogo szhatiya [Synthesis of carbon and boron nitride superhard phases in nanostructured state by impact compression]. *Materialovedeniye — Inorganic materials. Applied Research*, 2009. no. 1, pp. 33 – 40.
13. Adamenko N.A., Trykov Yu.P., Kazurov A.V. Svoystva zhelezoforoplastovogo kompozita, poluchennogo vzryvnym pressovaniyem v ampulakh [Properties of iron-PTFE composite obtained by explosive compression in ampules]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2003, no. 4, pp. 83 – 86.
14. Rogozin V.D., Kazurov A.V., Adamenko N.A. Analiz parametrov vzryvnogo pressovaniya metallopolimernoy smesi v tsilindricheskoy ampule [Analysis of metal – polymer mixture explosion pressing parameters in cylinder ampules]. *Izvestiya Volgogradskogo gos. tekhnicheskogo universiteta. Ser. Problemy materialovedeniya, svarki, prochnosti v mashinostroyenii — Bulletin of Volgograd State Technical University. Ser. Problems of materials science, strength in machine building*, 2008, no. 10 (48), iss. 2, pp. 42 – 44.
15. Martynov M.A., Vylegzhanina K.A. *Rentgenografiya polimerov* [Radiography of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1972, 98 p.
16. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguyev L.N. *Rentgenografichesky i elektronno-optichesky analiz* [X-ray and electron-optic analysis]. Moscow, MISiS Publ., 2002, 360 p.
17. Kiryukhin D.P., Kim I.P., Buznik V.M., Ignatyeva L.N., Kuryavy V.G., Sakharov S.G. Radiatsionno-khimichesky sintez telomerov tetraftoretilena i ikh ispolzovaniye dlya sozdaniya tonkikh zashchitnykh ftoropolimernykh pokryty [Radiation-chemical synthesis of PTFE telomers and their use for creation thin protective coatings]. *Rossysky khimichesky zhurnal — Russian journal of general chemistry*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 66 – 72.

Статья поступила в редакцию 30.09.2014 г.

Адаменко Нина Александровна — ФГБОУ ВПО “Волгоградский государственный технический университет” (400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28, ВолГТУ), доктор технических наук, профессор, Специалист в области создания полимерных композиционных материалов взрывным прессованием. E-mail: mvpol@vstu.ru.

Казуров Андрей Владимирович — ФГБОУ ВПО “Волгоградский государственный технический университет” (ВолГТУ) (г. Волгоград), кандидат технических наук, доцент, специалист в области создания металлополимерных композиционных материалов взрывным прессованием. E-mail: mvpol@vstu.ru.

Рыжова Светлана Михайловна — ФГБОУ ВПО “Волгоградский государственный технический университет” (ВолГТУ) (г. Волгоград), учебный мастер, специалист в области: создания полимерных композиционных материалов взрывным прессованием. E-mail: mvpol@vstu.ru

Сергеев Иван Викторович — ФГБОУ ВПО “Волгоградский государственный технический университет” (ВолГТУ) (г. Волгоград), лаборант-исследователь, специалист в области создания полимерных композиционных материалов взрывным прессованием. E-mail: mvpol@vstu.ru

Peculiarities of structure formation in polyimide-polyacetal composite materials under shock-wave treatment

N. A. Adamenko, A. V. Kazurov, S. M. Ryzhova, I. V. Sergeev

The paper describes the features of structure formation in the polyimide-fluoropolymer composite materials (CM) for shock-wave treatment (SVR) powder mixtures annular shock front. Found that, depending on the parameters used SVR realized different mechanisms of shock and compaction of the polymer blend structural interaction polyimide-fluoropolymer CM. When the parameter is below the optimal microstructure samples obtained has substantially the same character as that of statically compacted material and hence a low level of physical and mechanical properties of the CM. In the optimal parameters of SVR in the maximum seal polymeric compacts and sealing mechanism is changing from equiaxed to the transverse strain. In the microstructure of such compacts deformation of particles represents the result of a uniform plastic flow at which they are noticeably flattened in the direction of shock compression and flow in the transverse direction. It is shown that the structure of the polyimide obtained by static pressing, is a polymer composed of the amorphous region with uniformly distributed therein portions of the crystalline phase, and Teflon-4 has its characteristic layered structure consisting of alternating amorphous and crystalline regions. Found that SVR resulting structure in the direction of the shock wave over the glassy hard polyimide significantly deformed and becomes a plate shape, and a soft elastomeric fluoroplastic-4 block is deformed to form particles of irregular shape, similar in shape particles obtained by telomerization. At critical parameters of SVR is an abrupt change in the structure in the center of the compact, accompanied by the appearance of nanoscale phase change in the fine structure and an increase in microhardness. Thus formed as separate solid nanometric inclusions ranging in size from 150 to 800 nm, and agglomerates composed of particle size from 50 to 550 nm.

Keywords: polyimide, fluoroplast-4, the composite material, shock-wave treatment, structure formation.

Adamenko Nina — Volgograd State Technical University (400005, Russia, Volgograd, Lenin pr., 28, VSTU), Chair of Materials Science and Composite Materials, DrSci (Eng), professor, e-mail: mvpol@vstu.ru.

Kazurov Andrei — Volgograd State Technical University, Chair of Materials Science and Composite Materials, PhD, associate professor, e-mail: mvpol@vstu.ru.

Ryzhova Svetlana — Volgograd State Technical University, Chair of Materials Science and Composite Materials, master, e-mail: mvpol@vstu.ru.

Sergeev Ivan — Volgograd State Technical University, Chair of Materials Science and Composite Materials, laboratory assistant, e-mail: mvpol@vstu.ru.