



УДК 620.22: 621.762.666.3/.7. 678.5-419.8

Нешпор А.В., Вишняков Л.Р., Мазная А.В.

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Научно-технический центр "Композиционные материалы" при ИПМ НАН Украины. Украина, Киев

УДАРОПРОЧНЫЕ СЛОИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЛОЕВ

Анотація

На основі аналізу літературних джерел та проведених авторами експериментів розглянуто вплив ударного імпульсного навантаження на опір композиційних матеріалів, що містять керамічні та полімерні композиційні шари. Запропоновані шляхи оптимізації структури та властивостей як композиційних матеріалів, так і захисних конструкцій за рахунок використання керамічних елементів з реакційно спеченого карбіду кремнію та полімерних волокнистих композиційних матеріалів.

Abstract

The authors have performed analysis of papers and experiments to study the effect of impact pulsed loading on the resistance of composite materials comprising ceramic and polymer composite layers. The ways how to optimize the structure and the properties both composite materials and protective structures have been suggested due to the use of ceramic elements made of reaction sintered silicon carbide and polymer fiber composite materials.

Состояние вопроса

Керамические композиты. Известно, что состав, структура, порядок чередования различных функциональных слоев, а также адгезионное взаимодействие на межфазных границах существенно влияют на эксплуатационные характеристики ударозащитных композитов [1].

В защитных конструкциях, состоящих из керамических пластин, объединенных с подложками на основе полимерных композитов, как показывает практика, главным образом используются керамические материалы на основе карбида кремния, карбида бора, оксида алюминия, нитрида кремния и некоторые другие [1–3]. Из сравнительных характеристик керамических материалов (табл. 1) видно, что при наименьшей плотности достаточно высокие механические свойства имеет карбид бора B_4C . Однако дорогостоящая и сложная технология изготовления этой керамики (горячее прессование в высокопрочной графитовой оснастке и высокая стоимость карбида бора) ограничивает использование изделий из B_4C .

Таблица 1

Свойства керамических материалов, используемых в ударопрочных конструкциях

Материал	ρ , г/см ³	$\sigma_{изг}$, МПа	H_v , ГПа	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
B_4C	2,48–2,52	200–250	29,0–31,0	2,0–3,7
SiC	3,12–3,28	326–400	22,3–22,4	3,0–4,9
Al_2O_3	3,65–3,75	200–300	16,0–20,0	3,5–5,0
Si_3N_4	3,2–3,45	690–830	16,2–18,6	6,5–9,0

Примечание: Керамика получена горячим прессованием

Достаточно высокие механические свойства, возможность изготовления изделий разной формы и относительно низкая стоимость Al_2O_3 позволяет использовать его в составе защитных материалов [4, 5]. В тоже время относительно высокая плотность алюмооксидной керамики может ограничивать ее применение в защитных средствах, где важен вес конструкции.

Следует отметить, что применение керамики на основе Si_3N_4 в качестве ударопрочных защитных материалов ограничено сложностью получения низкопористой керамики из нитрида кремния и, соответственно, с ее высокой стоимостью, превышающей стоимость горячепрессованного B_4C . Однако ряд исследований говорят об эффективности горячепрессованных композитов на основе Si_3N_4 с добавками оксидов MgO, Al_2O_3 , Y_2O_3 , нитридных кристаллов SiC либо микросфер Al_2O_3 по сравнению с алюмооксидной керамикой [6].

По показателям плотности, себестоимости, доступности сырья в том числе отечественного

производства, а также в связи с высокими защитными свойствами для защитных материалов весьма перспективным является карбид кремния [7], в частности, реакционноспеченный (самосвязанный) карбид кремния. Метод реакционного спекания является более технологичным и производительным по сравнению с горячим прессованием, поэтому он стал основой промышленного производства изделий [8]. Следует учитывать, что однофазный материал из карбида кремния получить практически не удается, поэтому обычно этим методом получают двухфазные (SiC–Si) и трехфазные (SiC–Si–C) материалы с максимальным содержанием основной фазы (SiC) 94–96% [9].

Поскольку на свойства реакционноспеченного карбида кремния влияют структура и фазовый состав материала, чрезвычайно важным при изготовлении ударопрочных защитных элементов является получение керамики определенной структуры, а именно достижение определенных размеров зерна и однородного распределения фаз. Следует отметить, что использование с этой целью технологии горячего прессования, существенно ограничивает возможности получения изделий сложной формы.

В настоящее время ведется поиск и разработка новых методов получения керамики на основе SiC. Так, при разработке метода активированного спекания для активации процессов спекания карбида кремния предлагается использовать порошки оксидов Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO и др. [10, 11]. При этом необходимо учитывать возможность взаимодействия SiC с оксидами при высоких температурах, которое сопровождается выделением CO, что вызывает нежелательное порообразование в условиях свободного жидкофазного спекания. Например, авторы [11] процесс спекания керамики на основе SiC активировали за счет введения оксидов Al_2O_3 и Y_2O_3 , взятых в стехиометрическом соотношении, что создало условия образования на промежуточных стадиях спекания иттрий-алюминиевого граната ($3Y_2O_3 \cdot 5Al_2O_3$). Гранат обладает химической стойкостью при контакте с SiC до температуры плавления ($1860^\circ C$), при этом оказалось, что расплав граната практически полностью смачивает монокристаллы SiC, а полученная таким образом керамика достигает высокой прочности ~ 400 МПа.

С целью повышения плотности керамики на основе SiC в состав керамической шихты вводили также оксиды системы $SiO_2-Al_2O_3-Y_2O_3$ в количестве до 10% [12–14]. Плотность таких материалов, полученных при температурах $\approx 1800^\circ C$, достигала 95% от теоретической.



Одним из способов повышения диссипативных свойств керамики на основе SiC является ее дисперсное упрочнение и армирование нитевидными кристаллами [15–17]. При этом определенные преимущества могут иметь нитевидные кристаллы карбида кремния [18], поскольку высокие механическая прочность, модуль упругости, температура плавления одновременно с низкой плотностью, инертностью по отношению к матрице и коррозионной стойкостью нитевидных кристаллов SiC дают возможность значительного повысить физико-механические свойства таких композитов.

Полимерные композиты. Для повышения эффективности сопротивления ударным нагрузкам керамических защитных элементов важное значение имеют также и полимерные композиционные материалы (ПКМ), особенно волокнистые композиты, используемые в качестве подложки (подпоров) для керамики. Эти материалы обладают малой плотностью и высокими удельными механическими характеристиками за счет армирования органическими и неорганическими волокнистыми наполнителями в виде волокон, лент, жгутов, тканей и нетканых материалов.

В качестве полимерных матриц ударопрочных ПКМ используются эпоксидные, феноформальдегидные, полиэфирные, меламиновые смолы, полиуретан, полиэтилен, полипропилен, полиамиды и др. [19–20]. Весьма важен выбор компонентов ПКМ с комплексом необходимых функциональных требований. Они включают в себя высокие механические характеристики волокнистого каркаса, при этом прочность, модуль упругости и модуль сдвига волокон должны быть существенно больше, чем соответствующие характеристики полимерного связующего ($\sigma_b > \sigma_m$; $E_b > E_m$; $G_b > G_m$). Желательно, чтобы коэффициенты Пуассона для волокон и матрицы были достаточно близки, а удлинение при разрыве волокон несколько меньше, чем связующего ($\epsilon_b < \epsilon_m$).

Повышению уровня свойств армированных полимерных композитов способствует, главным образом, высокая адгезия между волокном и матрицей и хорошая смачиваемость волокон связующим [19, 21]. Практика показала, что в качестве армирующего волокнистого наполнителя в ударопрочных ПКМ чаще всего используют: высокомодульные арамидные волокна и нити, например, типа *СВМ*, *армос*, *русар*, *терлон*, *тварон*, *кевлар*, полиэтиленовые волокна, например, *спектра*, *дайнима* и ткани на их основе, а также волокна на основе ароматических полиэфиров [22]. По уровню механической прочности упрочняющие ПКМ нити можно разместить в такой ряд: *армос*, *русар* > *кевлар-129* (*кевлар-Нт*) > *тварон-микрофиламент* > *СВМ* > *технора* (*спектра*,

дайнима) [22, 23]. Следует заметить, что несмотря на более высокие механические характеристики нитей *армос* и *русар*, в конструкциях на основе нитей типа *кевлар* и *тварон* создается более высокий уровень защитных свойств за счет большого количества элементарных волокон (500–1000 волокон в волокне), что в 2–5 раза больше, чем у, например, комплексных нитей *СВМ*. Использование тканей на основе нитей *тварон-микрофиламент* дает возможность повысить показатель диссипации кинетической энергии на 20% по сравнению с тканями на основе стандартного *тварона* [24].

Разработка ударопрочных ПКМ на основе высокомодульных органических волокон в основном ведется в направлении повышения механических свойств существующих промышленных волокон и нитей. Разрабатываются также и новые виды высокопрочных нитей, имеющих сложную химическую природу и технологию изготовления. Так, к числу перспективных органических волокон можно отнести полиэтиленовые волокна, волокна на основе ароматических полиэфиров (*вектран* и *эканол*) и лиотропных жидкокристаллических полимеров (*PBZ-волокна*).

В практике создания ударопрочных композитов с повышенной прочностью при сжатии и межслоевом сдвиге получили применение гибридные полимерные композиты, которые содержат несколько видов волокон с различными механическими характеристиками, комбинированные (переплетенные между собой) волокна, например, стекловолоконные и органические [25] или полиэтиленовые и углеродные волокна [26]. Кроме того, применяют гибридные ПКМ, содержащие отдельные слои волокон или тканей разных видов. В таких композитах слои стекловолокна чередуются, например, со слоями из арамидных волокон [27] или гибридный пластик содержит слои углеродных, полиэтиленовых и арамидных волокон [28]. Таким образом, удается создать такую структуру ПКМ, которая учитывает механизмы разрушения и диссипации энергии (ударного нагружения) различных по природе волокон и обеспечивает необходимые эксплуатационные свойства.

Следует также отметить, что эксплуатационные свойства ударопрочных ПКМ зависят и от конструктивных параметров применяемых в композитах текстильных материалов (их прочностных и деформативных характеристик, плотности размещения нитей, типа переплетения и др.). Так, поверхностная плотность ткани, а именно количество переплетений нитей основы и утка, принимающих участие в перераспределении энергии, влияют на способность ПКМ противостоять ударным нагрузкам. В литературе этот аспект исследован недостаточно, однако патентная

информация [29–34], указывает на то, что конструктивные параметры тканых материалов в настоящее время остаются предметом исследования и имеют потенциальные возможности улучшения защитных свойств тканых и комбинированных материалов.

Известно, что существенным недостатком арамидных волокон и ПКМ на их основе является относительно низкая стойкость к действию ультрафиолетового излучения и влажности. Поэтому с целью увеличения эксплуатационного срока ПКМ на основе органических волокон уделяется много внимания разработке нового поколения волокон, стойких к действию климатических факторов, а также исследованию процессов их деструкции в различных средах [35–38].

Как указывалось выше, на эксплуатационные свойства армированного полимерного материала оказывает влияние адгезионное взаимодействие волокон и связующего на поверхности раздела волокно-связующее.

Матрицы (связующие):	Армирующие волокна:
Эпоксидная	СВМ, амос
Фенольная	ПФТА (терлон)
Ацетатная	ПВС (винол)
Полиэфирная	Гидратцеллюлозное
Полиимидная	Полиамидное (ПА 6)
Полиамидная	Углеродное
Полипропиленовая	ПЭТФ (лавсан)
	Полипропиленовое
	Полиэтиленовое

Волокна и компоненты связующего в процессе получения композитов, а иногда и в готовых ПКМ, могут взаимодействовать друг с другом как на границе раздела фаз, так и в приграничном слое, при этом их свойства могут заметно изменяться. В зависимости от выбора компонентов ПКМ, адгезия для различных матриц и волокон изменяется и может быть представлена в следующем ряду (стрелкой указано направление снижения адгезии) [19].

Таким образом, видно, что для изготовления ударопрочных ПКМ с высокими диссипативными свойствами, целесообразно использовать высоко-модульные параарамидные наполнители и термо-реактивные связующие (эпоксидные, эпокси-фенольные, фенолоформальдегидные, полиамидные и другие модифицированные связующие).

Защитные конструкции. В состав ПКМ, входящих в ударопрочные защитные конструкции вводят также демпфирующие слои. Высокими демпфирующими свойствами обладают, например, простые и сложные эфиры поливинилового спирта (поливинилацетат, поливинилбутират, поливинилбутираль и др.), тангенс угла механических

потерь которых составляет $\text{tg}\delta \approx 2,0+2,4$. Распространенными материалами для демпфирующих защитных конструкций являются синтетические каучуки и резины ($\text{tg}\delta \approx 1,0+1,4$) [39, 40]. Более низкими демпфирующими свойствами обладают полиэтилен, полиэтилентерефталат, эпоксидные смолы ($\text{tg}\delta \approx 0,1+0,5$), однако их модифицирование дает возможность значительно повысить их вибропоглощающие способности материалов [41–43]. Примерами новых типов полимеров для демпфирующих слоев являются гибридные связующие на основе полиуретанов [44, 45]. Таким образом, демпфирующими слоями, привлекательными для перспективных защитных конструкций, могут быть эфиры поливинилового спирта (поливинилбутираль), различные каучуки и гибридные полимерные матрицы (полиуретановые).

Разработка слоистых конструкций на основе сделанного анализа и имеющего у авторов практического опыта можно заключить, что при разработке ударопрочных конструкций из композиционных материалов на основе керамических и полимерных композиционных слоев целесообразно использование следующих материалов. В первую очередь, в качестве защитной керамики следует развивать работы по спеченному карбиду кремния. Так, технология реакционного спекания изделий из карбида кремния со свойствами $\rho = 3,03-3,10 \text{ г/см}^3$; $\sigma_{\text{изг}} = 170-200 \text{ МПа}$; $H_v = 14-20 \text{ ГПа}$ – имеет ряд преимуществ, поскольку позволяет получать относительно недорогие изделия, в том числе габаритные и сложной формы. Наши эксперименты свидетельствуют, что повысить физико-механические и диссипативные свойства керамики на основе карбида кремния возможно путем введения в состав исходной шихты ультрадисперсных частиц углерода, а также нитевидных кристаллов или волокон SiC, которые способствуют образованию вторичного карбида кремния с наследственной структурой введенных частиц. Определенный интерес для перспективной керамики представляет и применение карбидокремниевых частиц, синтезируемых из растительного сырья, морфология которых наследует структуру предшественников, например рисовой шелухи и соломы.

Для конструкций подпоров в защитных конструкциях, как было установлено на практике, целесообразно использовать градиентные слоистые материалы, в которых в качестве фронтального слоя следует применять высокоплотный ПКМ, например, на основе термоактивного связующего, а в качестве тыльного слоя – демпфирующий ПКМ на основе термопластичного связующего. Такие полимерные слои смогут в большей степени учитывать особенности и условия работы и разрушения ПКМ при сохранении



целостности конструкции [46]. Следует отметить, что в последнее время наряду с параарамидными волокнами в таких конструкциях могут применяться и высокопрочные стеклянные волокна и ткани, например, типа 3S. Нашими экспериментами было показано, что композитные подпоры из стеклопластика для ряда применений не уступают таковым, изготовленным из органопластиков, в том числе и по весовым параметрам, которые реализуются в комбинированных защитных конструкциях.

Вывод

Таким образом, тенденции развития ударопрочных слоистых материалов и конструкций, в том числе защищающих от высокоскоростных ударных нагрузок, связаны с продолжением исследований в области получения реакционно-спеченной высокопрочной карбидокремниевой керамики и полимерных градиентных слоев. Объединяя в составе защитных изделий керамические элементы и композиты на основе арамидных, стеклянных и других волокон и тканей, можно обеспечить достаточно высокий уровень диссипативных свойств.

Литература

1. *Вишняков Л.Р., Мазная А.В., Нешпор О.В., Коханий В.О., Олексюк О.Н.* Дослідження конструктивно-технологічних факторів для розробки високоенергостійких бронееlementів на основі кераміки// Проблемы прочности, 2004. — №6.— С. 43–46.
2. *Viechnicki D.* Development and Current of Armour Ceramics// Ceramic Bulletin. — 1991. — V.70. — № 6. — P. 1035–1039.
3. *Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд. Т.2, кн.1: А-О: Материалы и технологии/ А.А. Адамовский, В.М. Ажажа, Г.А. Баглюк и др.* — Киев: Наук. думка, 2008.— 856 с.
4. *Medvedovski E.* Alumina Ceramics for Armour Application// Amer. Ceram. Soc. Bull. — 2002. — V.81. — № 3. — P. 27–32.
5. *Medvedovski E.* Alumina Ceramics for Armour Application// Amer. Ceram. Soc. Bull. — 2002. — V.81. — № 4. — P. 45–50.
6. *Келина И.Ю., Добринский Ю.И.* Эффективность применения нитридокремниевой керамики в качестве бронезащитного материала// Огнеупоры и техническая керамика, 1997. — № 6. — С. 9–12.
7. *Ray D.* Hardness/Toughness Relationship for SiC Armor// Ceramic Engineering and Science Proceedings. — 2003 — V. 24. — № 3. — P. 401–410.
8. *Гнесин Г.Г.* Карбидокремниевые материалы. — М: Металлургия, 1977. — 216 с.
9. *Гаршин А.П., Вильк Ю.Н.* Влияние некоторых технологических параметров на формирование структуры материалов на основе реакционно-спеченного карбида кремния//Огнеупоры и техническая керамика, 1996. — № 8. — С. 2–8.
10. *Орданьян С.С., Арцутанов Н.Ю., Чупов В.Д.* Активирование спекания на основе SiC и ее механические свойства//Огнеупоры и техническая керамика, 2000. — № 11. — С. 8–11.
11. *Дзядыкевич Ю.В.* Пути повышения физико-механических свойств карбидокремниевой керамики (обзор)//Сверхтвердые материалы, 1992. — № 1. — С. 26–33.
12. *Dijen F.K., Mayer E.* Liquid phase sintering of silicon carbide//J. Eur. Ceram Soc. — 1996. — V.16. — P.413–420.
13. *Marchi J., Bressiani J.C., Bressiani A.H.* Experimental Design Applied to Silicon Carbide Sintering//J. Am. Ceram. Soc. — 2003. — V. 86. — № 7. — P. 1208–1210.
14. *Hwang S.L., Chen I.W.* Reaction Hot Pressing of α - and β -SIALON Ceramics// J. Am. Ceram. Soc. — 1994. —V77. — 1. — P. 165–171.
15. *Becher P., Hsueh Ch-Нв., Angelini P., Tiegs T.N.* Toughening Behavior in Whisker-Reinforced Ceramic Matrix Composites// Amer. Ceram. Soc. — 1988 — V. 71. — № 12. — P. 1050–1061.
16. *Келина И.Ю., Ершова Н.И., Плясункова Л.А.* Эффект армирования нитридокремниевой матрицы нитевидными кристаллами карбида кремния// Огнеупоры и техническая керамика, 2000. — № 9. — С. 14.
17. *Келина И.Ю., Ершова Н.И., Плясункова Л.А., Яковенко Е.И., Аракчеев А.В.* Особенности поведения дискретных и непрерывных волокон SiC и C в нитридокремниевой матрице в условиях горячего прессования//Огнеупоры и техническая керамика, 2000. — № 11. — С. 37–44.
18. *Chu H.S.* Development of a Pressureless-Sintered SiC Monolith and Special-Shaped SiC (Wisker)-Reinforced SiC Matrix Composite for Lightweight Armour Application.// Ceramic Engineering and Science Proceedings. — 2003. — V. —P. 359–364.
19. *Перепелкин К.Е.* Полимерные волокнистые композиты, их основные виды, принципы получения и свойства. Часть 1. Основные компоненты волокнистых композитов, их взаимодействие и взаимовлияние//Химические волокна, 2005. — № 4. — С. 7–22.
20. *Михайлин Ю.А., Кербер М.Л., Горбунова И.Ю.* Связующие для полимерных композиционных материалов//Пластические массы, 2002. — № 2. — С. 14–21.
21. *Берлин А.А., Вольфсон С.А.* Принципы создания композиционных полимерных материалов. — М.: Химия, 1990. — 240 с.
22. *Будницкий Г.А.* Армирующие волокна для композиционных материалов//Химические волокна, 1990. — № 2. — С. 5–13.

23. *Перепелкин К.Е.* Волокна и волокнистые материалы для армирования композитов с экстремальными характеристикам//Механика композиционных материалов, 1992. — № 3. — С. 291–306.
24. *Мачалаба Н.Н., Будницкий Г.А., Щетинин А.М., Френкель Г.Г.* Тенденции в области развития синтетических волокон для баллистических материалов//Химические волокна, 2001. — № 2. — С. 31–40.
25. *PCT, пат. № 94/23262*, МКИ⁵ F41H1/02, 5/04. Бронированный материал и способ изготовления такого материала и брони. Оpubл. 13.10.94.
26. *СССР, пат. № 17040967*, МКИ⁵ F41H1/02 Пулезащитный материал. Оpubл. 15.06.92.
27. *СССР, пат. № 1704968*, МКИ⁵ F41H1/02 Пулезащитный материал. Оpubл. 15.06.92.
28. *США, пат. № 5180880*, МКИ⁵ F41H5/12 Материал для бронезилета. Оpubл. 19.01.93.
29. *Україна, пат. № 38267*, МКИ⁷ F41H1/02 Шаруватий кулезахисний матеріал. Оpubл. 15.05.2001.
30. *PCT, пат. № 92/08604*, МКИ⁵ B32B5/00, 7/00, F41H1/00 Конструкция пуленепробиваемых материалов повышенной эффективности. Оpubл. 29.05.92.
31. *PCT, пат. № 92/08607*, МКИ⁵ B32B0/00, F41H1/00, 5/00, 7/00 Конструкция пуленепробиваемых материалов повышенной эффективности. Оpubл. 29.05.92.
32. *PCT, пат. № 94/21450*, МКИ⁵ B32B5/06, D03D15/04, D04B1/00 Пуленепробиваемый материал. Оpubл. 29.09.94.
33. *PCT, пат. № 94/23262*, МКИ⁵ F41H1/02, 5/04 Бронированный материал и способ изготовления такого материала и брони. Оpubл. 13.10.94.
34. *Україна, пат. № 10951*, МКИ⁵ F41H1/02, A62B17/00 Слоїстий матеріал для захисного одягу Оpubл. 25.12.96.
35. *Мазная А.В., Грудина Т.В., Коханый В.А.* и др. Влияние климатических факторов на механические свойства полимерных композиционных материалов на основе арамидных тканей //Вісник інженерної академії України, 2006. — № 2. — С. 79–82.
36. *Перепелкин К.Е., Пакивер Э.А., Андреева И.В.* и др. Термические характеристики высокопрочных и термостойких ароматических нитей//Химические волокна, 2005. — № 5. — С. 27–31.
37. *Перепелкин К.Е., Мачалаба Н.Н., Кварацхелия В.А.* Свойства параарамидных нитей армос в условиях эксплуатационных воздействий. Сравнение с другими параарамидами// Химические волокна, 2001. — № 2. — С. 22–29.
38. *Тихонов И.В.* Новые органические материалы с улучшенными потребительскими свойствами и изделия из них//Химические волокна, 1998. — № 5. — С. 27–33.
39. *Смотрова С.А.* Анализ вибропоглощающих свойств полимерных материалов с целью оценки возможного их применения в конструкциях демпферов и динамически подобных моделей//Пластические массы, 2002. — № 3. — С. 39–45.
40. *Лапицкий В.А., Крицук А.А.* Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков. — К.: Наукова думка, 1986. — 45 с.
41. *Зеленев Ю.В.* Исследование взаимосвязи состава, строения, структуры и физических свойств блок-сополимеров на основе гибких жесткоцепных компонентов//Пластические массы, 2002. — № 3. — С. 11–18.
42. *Позамонтир А.Г.* Основные направления и методы модификации свойств вибропоглощающих полимерных материалов./Применение средств вибропоглощения и вибропогашения в промышленности и на транспорте. — Л.: ЛДНТП, 1984. — С. 11–14.
43. *Дяченко С.В., Корягин С.И., Яковлев А.П.* Демпфирующие свойства листовых материалов с нанесенными армированными полимерными покрытиями//Проблемы прочности, 1986. — № 4. — С. 114–118.
44. *Померанцев В.И., Панкова Г.А., Ильина И.Е.* Сополимеры и их роль в создании новых вибропоглощающих материалов//Пластические массы, 1996. — № 1. — С. 9–11.
45. *Липатов Ю.С., Росовицкий В.Ф., Дацко П.В.* и др. Перспективы создания вибропоглощающих полимерных материалов на основе полиуретанов/Опыт применения виброзвукопоглощающих полимерных материалов. — Л.: ЛДНТП, 1986. — С. 23–27.
46. *Нешпор А.В., Вишняков Л.Р., Мазная А.В.* Ударопрочные слоистые полимерные композиционные материалы//Технологические системы, 2009. — № 3. — С. 61–66.