

Прочность тонколистового элемента конструкции из композиционного материала при ударном растяжении*

Г. В. Степанов^а, В. И. Зубов^а, В. М. Токарев^а, А. В. Дроздов^а, Я. Р. Клепачко^б

^а Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

^б Лаборатория физики и механики материалов, Метц, Франция

Кратко описаны методика и результаты исследования прочности тонколистового элемента конструкции толщиной 2 мм из ударостойкого композиционного материала РАБ при ударном растяжении. Экспериментальные исследования включают испытания на статическое и ударное растяжение образцов с укороченной рабочей частью и с острыми симметричными боковыми надрезами. Методом акустической эмиссии при статическом растяжении обнаружены акустические сигналы, свидетельствующие о развитии повреждений в материале при нагрузке, значительно ниже разрушающей. Методики испытаний аналогичны использованным ранее для испытания тонколистовых металлов на растяжение. Проанализирован волновой процесс при ударном растяжении образцов по вязкоупругой модели материала. Установлено влияние вязкости на ширину фронта волны, определяющей скорость роста напряжений при ее распространении. Согласно результатам испытаний, переход от квазистатического растяжения к ударному незначительно (слабо) изменяет уровни максимальных напряжений. При ударном растяжении образцов с острыми надрезами в первой волне нагрузки, ниже разрушающей, наблюдается снижение напряжений с течением времени, которое может быть обусловлено как проявлением эффектов вязкости, так и повреждениями вблизи острых надрезов.

Ключевые слова: статическое и ударное растяжение, акустическая эмиссия, вязкоупругая модель, продольная и поперечная волна, максимальные напряжения, численный расчет.

Введение. Для изготовления корпусных элементов транспортных средств широко используются тонколистовые металлы и композиционные материалы. Наиболее перспективными являются высокопрочные композиционные материалы на основе высокомодульных волокон и связующего. Однако их поведение и прочностные характеристики при динамическом нагружении изучены недостаточно.

В работе приведены результаты испытаний листового композиционного материала РАБ, созданного в Институте композиционных материалов (Германия). Физико-механические характеристики опытной партии этого материала приведены в табл. 1 (данные предприятия-изготовителя). Образцы и методики испытаний аналогичны использованным ранее [1] для испытаний тонколистовых металлических материалов. Поскольку поведение исследуемого материала соответствует вязкоупругой модели (в неповрежденном материале после нагружения отсутствует остаточная деформация), особое внимание обращено на проявление эффектов вязкости. Возможное влияние последних на напряженное состояние анализировали по резуль-

* Работа выполнена по программе INTAS-96-2141.

татам численного моделирования напряженного состояния в образце в виде узкой полосы при распространении продольной волны растягивающих напряжений. Поведение материала описывается вязкоупругой моделью.

Т а б л и ц а 1

Физико-механические характеристики опытной партии композиционного материала РА6

Арти-кул	Поверхностная плотность, г/м ²	Число нитей на 1 см		Основа, текс	Уток, текс	Толщина, мм	Тип переплетения	Содержание волокна в матрице, мм ² /см	
		основа	уток					основа	уток
W7421	170	6,5	6,5	127	127	0,35	Полотно	0,57	0,57

Для регистрации повреждений при нагружении образцов использовали метод акустической эмиссии (АЭ), обладающий высокой чувствительностью. Основным источником АЭ при деформировании металлов является движение дислокаций и формирование трещин. АЭ непрерывного типа, возникающая при движении дислокаций, имеет низкую амплитуду. Нагружение композиционных материалов, содержащих хрупкие волокна (кремниевые или углеродные), сопровождается интенсивной АЭ яркого выраженного дискретного типа [2]. Анализ акустической эмиссии в композиционном материале, не имеющем остаточных деформаций, позволяет получить дополнительную информацию для оценки кинетики повреждений.

Методики испытаний. Для определения прочности тонколистового элемента конструкции из композиционного материала при ударном растяжении использовали образцы с укороченной рабочей частью длиной l и шириной b и удлиненной динамометрической частью (динамометр) длиной 240 мм (на рис. 1 тип 1). Размеры образцов из тонколистового композиционного материала и результаты испытаний на растяжение представлены в табл. 2.

При выбранных размерах рабочей части образца для ударного растяжения в ней обеспечивается близкое к однородному напряженно-деформированное состояние.

Использование образцов с удлиненной динамометрической частью обеспечивает надежную регистрацию продольной нагрузки по упругой деформации.

Статические испытания на растяжение проводили на аналогичных образцах, а также на образцах с увеличенной рабочей частью (табл. 2), что позволяло судить о возможном влиянии на прочность размеров образца.

Для оценки влияния острых надрезов при статическом и ударном растяжении испытывали образцы в виде полос с симметричными боковыми надрезами (на рис. 1 тип 2). Длина динамометрической части таких образцов составляла 240 мм, что достаточно для неискаженной регистрации продольной нагрузки в течение заданного промежутка времени по упругой деформации в полосе, вызванной прохождением прямой продольной волны до прихода волны, отраженной от закрепленного конца динамометра. Испы-

тывали полосы-образцы (номинальная ширина b) с симметричными надрезами, суммарная длина которых составляет величину ширины рабочей части полосы.

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний композиционного материала РА6

Тип образца	№ образца	$B \times b \times l \times h$, мм	v_0 , м/с	P_{\max} , кН	σ_{\max} , МПа	$\varepsilon_{\max} / \varepsilon_f$, %	ε_1 , %
1	о3	23,0 × 7,6 × 30,0 × 2,0	$2,2 \cdot 10^{-5}$	5,96	390,1	–	–
	о5	23,0 × 7,6 × 30,0 × 2,0	$2,2 \cdot 10^{-5}$	6,00	394,7	–	–
	о11	23,0 × 7,6 × 30,0 × 2,0	$5,3 \cdot 10^{-5}$	5,39	354,6	0,50/0,50	–
	о17	7,7 × 3,6 × 30,0 × 2,0	$2,2 \cdot 10^{-5}$	2,35	326,4	0,66/0,66	–
2	о19	7,9 × 3,6 × 8,0 × 2,0	12,5	–	(450,9)	0,71/0,67	–
	о6	48,0 × 15,5 × 2,0 × 2,0	$2,2 \cdot 10^{-5}$	8,23	265,5	–	–
	о9	48,0 × 15,5 × 2,0 × 2,0	$5,3 \cdot 10^{-5}$	7,55	243,5	0,51/0,51	–
	о12	48,0 × 15,5 × 2,0 × 2,0	12,5	–	(437,0)	0,48/0,37	0,26
	о4	23,0 × 7,6 × 2,0 × 2,0	$2,2 \cdot 10^{-5}$	4,35	286,2	–	–
	о16	23,0 × 7,6 × 2,0 × 2,0	$5,3 \cdot 10^{-5}$	4,88	321,1	0,50/0,50	–
	о10	23,0 × 7,6 × 2,0 × 2,0	12,5	–	(355,9)	0,40/0,32	0,26

Примечания: 1. ε_f – деформация разрушения; ε_1 – максимальная деформация в первой волне. 2. В скобках указано максимальное напряжение, рассчитанное по максимальной деформации ε_{\max} с использованием динамического модуля упругости.

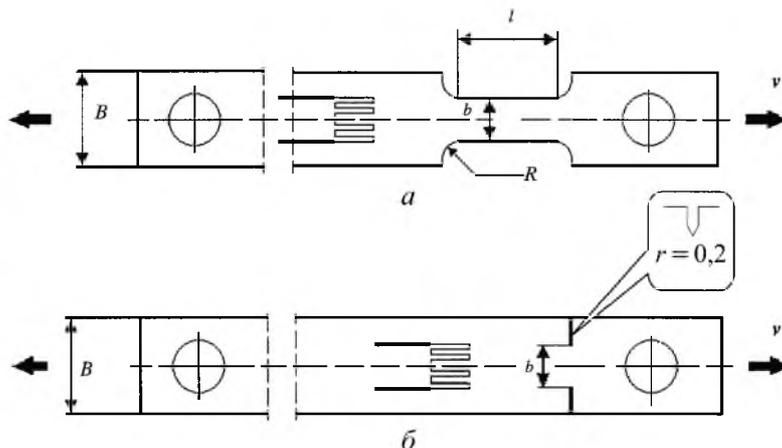


Рис. 1. Образцы типов 1 (а) и 2 (б) для испытаний на растяжение.

Испытания при статическом растяжении проводили на стандартной испытательной машине ИР 5047-50 с графической записью диаграмм нагрузка P – время t и деформация в динамометрической части образца ε – время t .

Упругую деформацию регистрировали тензорезисторами, наклеенными на динамометр в области его равномерной упругой деформации (на удалении примерно 30 и 60 мм от границы с рабочей частью или надрезом).

Диапазон линейной зависимости между деформацией и изменением сопротивления используемых проволочных резисторов, по данным изготовителя, равен 0,5%. Диаграмму деформация – время записывали в блок памяти цифрового осциллографа и в дальнейшем обрабатывали с помощью пакета прикладных программ EXCEL-97. Схема обработки зарегистрированных диаграмм не отличается от описанной ранее [1].

Сигналы АЭ при статическом нагружении регистрировали пьезоэлектрическим датчиком (диапазон рабочих частот 0,3...0,5 МГц) с выносным предварительным (диапазон частот пропускания 0,3...1,0 МГц) и основным усилителями. Общий коэффициент усиления составлял 60 дБ. Амплитуды сигналов АЭ измеряли с использованием инструментальной платы ADA-1292В (Holit Data System, Украина), которую устанавливали в свободный слот компьютера. Датчик АЭ посредством упругого зажима крепили к поверхности образца вблизи оси на расстоянии 15–20 мм от границы с рабочей частью или надрезом.

Для регистрации амплитуды АЭ дискретного типа разработано программное обеспечение, позволяющее непрерывно измерять ее сигналы при нагружении испытуемых образцов с максимально возможной для данной инструментальной платы частотой опроса (4 мкс), проводить их анализ и накопление в интервале времени 10 мс. В этом интервале времени определяли максимальную амплитуду сигнала АЭ, величину которой вводили в память компьютера. Необходимо отметить, что используемый метод АЭ и алгоритм обработки сигналов учитывает дискретный характер образования повреждений в композиционных материалах, однако не исключает возможности наложения сигналов АЭ, вызванных одновременными или близкими по времени элементарными процессами разрушения (например, разрывами отдельных волокон), что особенно вероятно на конечной стадии нагружения образцов.

Испытания на ударное растяжение со скоростью 12,5 м/с проводили на вертикальном копре [3]. Удар свободно падающей тяжелой массы со скоростью $v_0 = 6,25$ м/с по легкой наковальне, закрепленной на торце нагружающего стержня-волновода длиной 2 м, вызывает распространение по стержню упругой продольной волны растягивающих напряжений. Отражение этой волны от второго торца стержня, соединенного с головкой образца, вызывает растяжение последнего с номинальной скоростью v , равной $\sim 2v_0$. При ударном растяжении записывали только диаграмму деформация динамометрической части образца $\varepsilon - t$.

Характерные диаграммы $\varepsilon - t$ при статическом и ударном растяжении образцов с укороченной рабочей частью и острыми симметричными боковыми надрезами приведены на рис. 2 и 3. По результатам обработки диаграмм $P - t$ и $\varepsilon - t$ при статическом растяжении установлена близкая к линейной зависимость между напряжением и деформацией в динамометрической части образца, а следовательно, между деформацией и напряжением в композиционном материале при деформациях до 0,7%.

Напряжение в рабочей части образца с площадью поперечного сечения S рассчитывали по регистрируемой нагрузке $\sigma = P / S$. Напряжение в динамометрической части образца в момент разрушения $\sigma_d = P_{\max} / S_d$ (S_d –

площадь сечения динамометрической части образца) и соответствующая этому моменту деформация ε_{\max} позволили оценить эффективный модуль Юнга $E_{\text{eff}} = \sigma_d / \varepsilon_{\max}$ и характерную среднюю скорость продольной волны $a_s = (E_{\text{eff}} / \rho)^{1/2}$, где $\rho = 1270 \text{ кг/м}^3$ – усредненная плотность материала. Экспериментальная величина $E_{\text{eff}} = 23,2 \pm 1,2 \text{ ГПа}$ примерно соответствует известным данным для таких материалов [4, 5], средняя скорость распространения продольной волны $a_s = 4270 \pm 100 \text{ м/с}$.

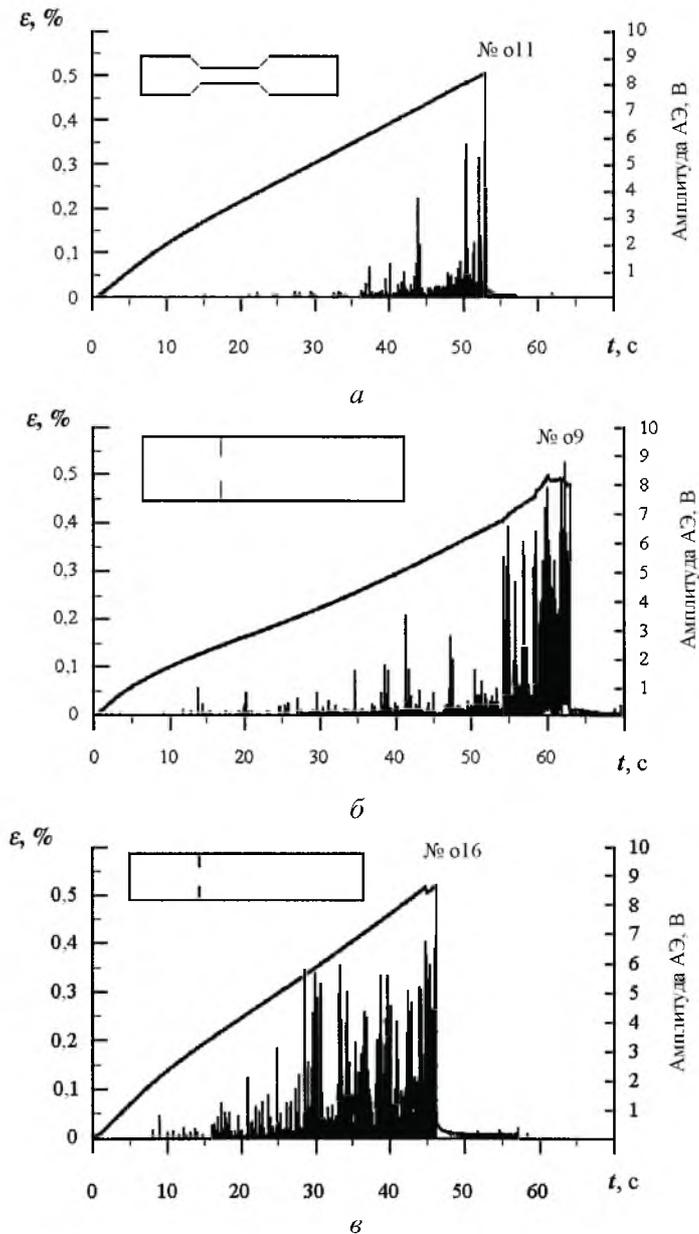


Рис. 2. Характерные диаграммы деформирования и АЭ при статическом растяжении.

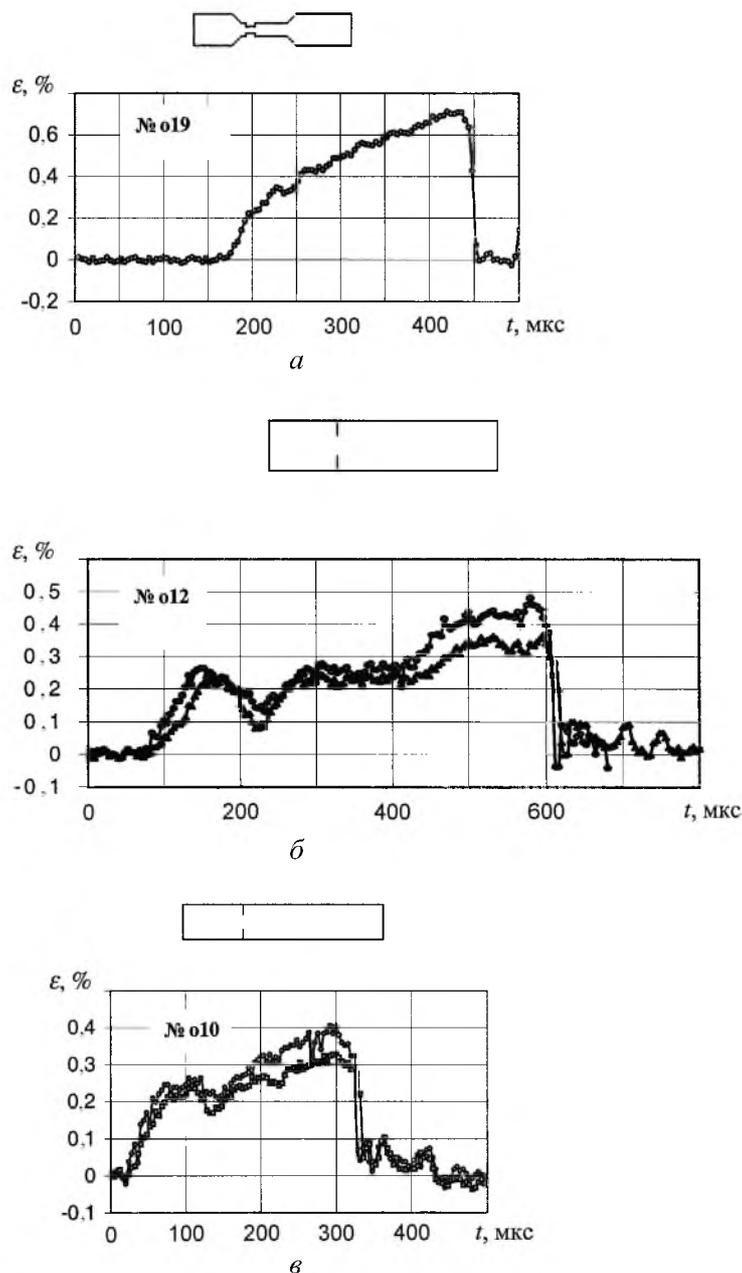


Рис. 3. Характерные диаграммы деформирования при ударном растяжении динамометрической части образца, зарегистрированные одним (а) и двумя (б, в) датчиками.

При ударном растяжении со скоростью v в полосе из упругого материала в первой волне нагрузки максимальный уровень напряжений (за фронтом продольной волны) $\sigma = \rho av$ сохраняется до момента воздействия на датчик отраженной от закрепленного торца образца волны догрузки. При этом величина продольной деформации определяется как $\epsilon = u/a$, что позволяет вычислить эффективную скорость распространения продольной волны упругих напряжений, $a = v/\epsilon$. Скорость волны, рассчитанная по

упругой деформации за фронтом волны, $a = 4810$ м/с, выше значения, найденного по кривой при статическом растяжении (соответствующий модуль Юнга $E = 29,4$ ГПа). Следует отметить близость определенного таким образом модуля по максимальной деформации в первой волне в образцах типа 2 с шириной динамометрической части 23 и 48 мм.

Основные параметры материала и характеристики прочности, определенные по результатам экспериментов, приведены в табл. 2, где 1 – образец с укороченной рабочей частью, 2 – образец с симметричными боковыми надрезами.

Анализ результатов испытаний. Статическое растяжение. При статическом растяжении образца с укороченной рабочей частью диаграмма нагрузка–время характеризуется слабонелинейным нарастанием нагрузки во времени, что качественно соответствует принятым представлениям о кинетике деформирования композиционных полимерных материалов с волокнистым наполнителем и обусловлено особенностями взаимодействия между связующим и волокном.

При растяжении образца с боковыми надрезами диаграмма нагрузка–время аналогична диаграмме, полученной при испытании образцов с укороченной рабочей частью. Отличие заключается в изменении длительности процесса нагружения до полного разрушения, вызванного изменением области интенсивных напряжений.

Поскольку композиционный материал характеризуется структурными несовершенствами, в процессе нагружения развиваются локальные повреждения, приводящие к полному разрушению. Первые регистрируемые методом акустической эмиссии повреждения наблюдаются при нагрузке, составляющей менее половины максимальной (разрушающей). Плотность акустических сигналов (рис. 2) быстро возрастает с увеличением нагрузки, особенно интенсивно перед полным разрушением.

При растяжении образцов с надрезами начало интенсивного повреждения сдвигается в область начального нагружения, что может быть вызвано повышенным уровнем напряжений у вершин надрезов.

При нагружении образцов типа 1 и 2 общим было то, что АЭ регистрировали задолго до полного разрушения образцов. Однако для каждого типа образца АЭ имела свои характерные особенности. Наиболее короткий промежуток времени от начала нагружения до регистрации первых сигналов АЭ наблюдался при нагружении узкой полосы с боковыми надрезами, а наиболее длинный – для образца с укороченной рабочей частью. Амплитуда отдельных импульсов АЭ и их общее количество при нагружении до 80–85% максимальной нагрузки минимальны для образца с укороченной рабочей частью (тип 1), значительно выше для широкого образца с надрезами, и наконец, максимальны для узкого образца с надрезами (тип 2). При деформировании широкого образца с надрезами на конечной стадии его нагружения наблюдали отчетливо выраженный лавинообразный характер появления сигналов АЭ, что может быть связано с ускоренным накоплением повреждений (разрывов волокон) в исследуемом композиционном материале.

Ударное растяжение. Ударное растяжение образцов с короткой рабочей частью при номинальной скорости $v = 12,5$ м/с характеризуется монотонным нелинейным ростом нагрузки во времени (диаграммы $\varepsilon - t$) вплоть до максимальной величины (рис. 3,а). Максимальные напряжения при ударном растяжении выше, чем при статическом, и составляют 450,9 МПа (табл. 2). С увеличением средней скорости деформации, определяемой как $\dot{\varepsilon} = v / l$, повышается уровень максимальных напряжений.

В образце с симметричными надрезами за фронтом первой продольной волны следует понижение продольной деформации (снижение нагрузки), регистрируемой датчиком в динамометрической части образца. Среди возможных причин такого понижения следует отметить влияние уменьшения интенсивности упругой волны в стержне-волноводе, специфические особенности распространения продольной волны в полосе из вязкоупругого материала и развитие повреждений в областях концентрации напряжений.

Анализ параметров нагружающей системы по приведенной ранее [3] схеме показывает, что снижение интенсивности волны в стержне-волноводе не превышает 5% и, значит, не может объяснить понижение нагрузки за фронтом волны в полосе при ударном растяжении. Из представленного ниже расчета процесса распространения продольной волны в тонкой полосе из вязкоупругого материала следует, что осцилляции продольной деформации возникают вследствие влияния волн боковой разгрузки. Амплитуда этих осцилляций мала, затухает при распространении волны и не может служить причиной спада регистрируемой нагрузки.

Следовательно, наиболее вероятно – развитие микроповреждений в области концентрации напряжений. Такой вывод подтверждается появлением сигналов АЭ при нагрузке, значительно ниже максимальной. Подход к датчику волны догрузки от закрепленного торца образца вызывает увеличение деформации и сдвиг во времени диаграмм, зарегистрированных двумя датчиками, расположенными на расстояниях $L_1 = 30$ мм и $L_2 = 60$ мм от линии надрезов (рис. 3). Расчетное напряжение в рабочей части образца при ударном растяжении (табл. 2) определено по регистрируемой деформации в динамометре при модуле Юнга, равном его величине при динамическом растяжении.

После 3–5 пробегов волны, в частности к моменту разрушения, влияние волновых процессов в динамометре на распределение деформаций снижается, а усилие в динамометре примерно соответствует усилию в рабочей части образца.

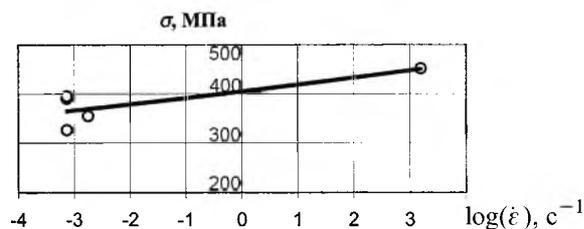


Рис. 4. Зависимость прочности композиционного материала РА6 при растяжении от скорости деформации.

Зависимость незначительного (не более 25%) увеличения прочности композиционного материала от скорости деформации представлена на рис. 4 для образцов с укороченной рабочей частью. Общей закономерностью для всех типов образцов является несущественное повышение максимальных средних напряжений в материале при переходе от статического растяжения к ударному.

Компьютерное моделирование напряженного состояния в полосе при ударном растяжении. Компьютерное моделирование процесса распространения продольной волны в полосе из композиционного материала при продольном ударном нагружении выполнено для вязкоупругого материала со следующими параметрами: модуль Юнга $E = 0,294 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0,05$; коэффициент линейной вязкости $\mu = 5000$ Па · с; плотность $\rho = 1270$ кг/м³.

Связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций при плоском напряженном состоянии описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \varepsilon_{xx} \frac{E}{1-\nu^2} + \varepsilon_{yy} \frac{E\nu}{1-\nu^2} + 2\mu\dot{\varepsilon}_{xx}; \\ \sigma_{yy} &= \varepsilon_{xx} \frac{E\nu}{1-\nu^2} + \varepsilon_{yy} \frac{E}{1-\nu^2} + 2\mu\dot{\varepsilon}_{yy}; \\ \sigma_{yx} &= \varepsilon_{yx} \frac{E}{2(1+\nu)} + \mu\dot{\varepsilon}_{yx}.\end{aligned}$$

Схема расчета параметров полей скоростей, скоростей деформации, деформаций и напряжений аналогична использованной ранее для расчета одномерной задачи [6]. При расчете использовали равномерную сетку с разбиением по осям $n_x = 50$ и $n_y = 9$, образованную ортогональными линиями. Скорость деформации, а по ней деформации и напряжения рассчитывали в центре каждой прямоугольной ячейки по скорости в узлах ячейки. Последнюю рассчитывали по напряжениям в центрах прилегающих ячеек. Шаг по времени, удовлетворяющий условию устойчивости Куранта, не обеспечивает устойчивости счета, поэтому принят уменьшенным в два раза. Введение вязкости подавляет возникшую неустойчивость, аналогичную резонансу.

Результаты численного моделирования распространения продольной волны в полосе шириной 24 мм, вызванной ударным воздействием на нагружаемом торце со скоростью $v = 12,5$ м/с, приведены на рис. 5 (размеры ячеек расчетной сетки: $\delta x = \delta y = 0,003$ м; шаг по времени $\delta t = 0,2$ мкс).

Продольное ударное нагружение полосы из тонколистового материала приводит к распространению упругой продольной волны, за фронтом которой возникает поперечное движение материала, обусловленное волнами боковой разгрузки (рис. 5). В области, прилегающей к фронту волны, эта разгрузка вызывает существенное отклонение поля напряжений от одноосного. В результате наложения поперечного движения материала возникает колебание продольной деформации на оси полосы. Амплитуда этих

колебаний затухает при распространении продольной волны и на значительном удалении от нагружаемого торца становится несущественной. Однако при удалении фронта волны от нагружаемого торца в полосе из вязкоупругого материала расширяется протяженность фронта нарастания нагрузки (продольной деформации) – рис. 6, что ведет к искажению импульса нагрузки.

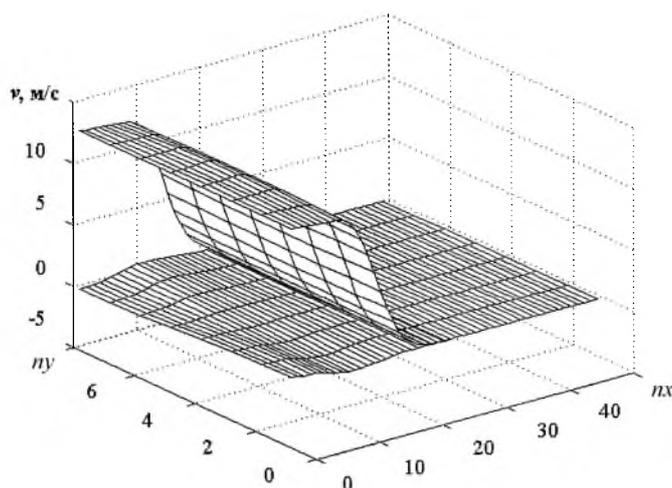


Рис. 5. Распределение продольной (верхняя поверхность) и поперечной (нижняя поверхность) скорости в материале полосы при ударном нагружении в момент времени 20 мкс.

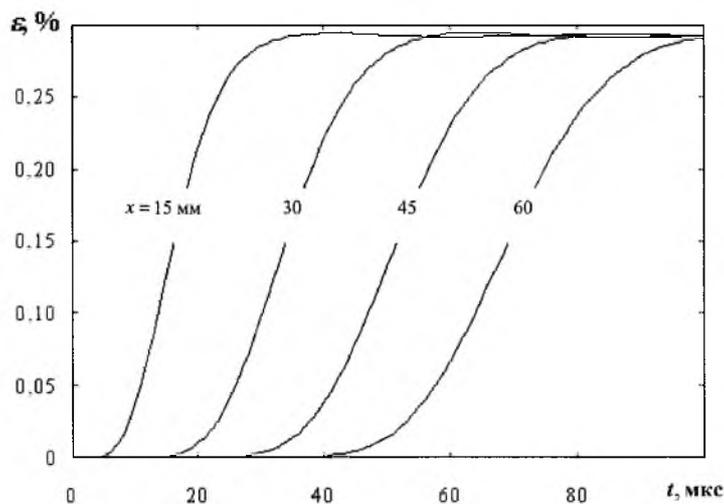


Рис. 6. Изменение продольной деформации во времени в точках на оси полосы, удаленных от нагружаемого торца на разное расстояние x .

Заключение. По результатам регистрации сигналов акустической эмиссии при статическом растяжении установлено, что развитие повреждений в материале возникает при нагрузке, намного ниже разрушающей.

Переход от статического растяжения к ударному вызывает незначительное (не более 25%) повышение уровня максимальных напряжений.

Испытания на статическое растяжение композиционного материала с высокомодульными волокнами показали, что наличие надрезов существенно влияет на уровень средних напряжений, в то время как при ударном растяжении влияние надрезов уменьшается.

Резюме

Коротко описано методику і результати досліджень міцності тонколистового елемента конструкції товщиною 2 мм з ударостійкого композиційного матеріалу РА6 при ударному розтязі. Експериментальні дослідження включають випробування на статичний й ударний розтяг зразків з укороченою робочою частиною і з гострими симетричними боковими надрізами. Методом акустичної емісії при статичному розтязі виявлено акустичні сигнали, що свідчить про розвиток пошкоджень у матеріалі при навантаженні, значно нижчому за руйнівне. Методики випробувань аналогічні тим, що використовувалися раніше для випробувань тонколистових матеріалів на розтяг. Проаналізовано хвильовий процес при ударному навантаженні зразків за допомогою в'язкопружної моделі матеріалу. Встановлено вплив в'язкості на ширину фронту хвилі, що визначає швидкість росту напружень при її розповсюдженні. Згідно з результатами випробувань, перехід від квазістатичного розтягу до ударного несуттєво (слабо) змінює рівень максимальних напружень. При ударному розтязі зразків із гострими надрізами в першій хвилі навантаження, яка нижча за руйнівну, спостерігається зниження напружень з часом, що може бути зумовлене як проявом ефектів в'язкості, так і пошкодженнями поблизу гострих надрізів.

1. Степанов Г. В., Зубов В. И., Олисов А. Н., Токарев В. М. Прочность тонколистовых металлов при ударном растяжении // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 62 – 69.
2. Licht T. Acoustic Emission // Bruel and Kjaer Techn. Rev. – 1979. – N 2. – P. 3 – 36.
3. Степанов Г. В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.
4. Прочность и разрушение композиционных материалов / Тр. второго совет.-амер. симп. / Под ред. Дж. К. Си, В. П. Тамуж. – Рига: Зинанте, 1983. – 320 с.
5. Яценко В. Ф. Прочность и ползучесть слоистых пластиков. – Киев: Наук. думка, 1966. – 204 с.
6. Степанов Г. В. Распространение волны сдвига в полубесконечной пластине из упруговязкопластичного материала // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 124 – 130.

Поступила 21. 02. 2000