

УДК 539.3; 621.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГИБРИДНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ Т- И L-ОБРАЗНЫХ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГАЕМЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Э. Селахи

Филиал Исламского университета Азад в г. Мервдешт, Мервдешт, Иран  
E-mails: selahi@miau.ac.ir

С помощью метода конечных элементов выполнено численное моделирование разрушения гибридных вертикальных Т- и L-образных болтовых соединений, подвергаемых воздействию подводной ударной волны. В качестве соединяемых материалов использовались ортотропные волокнистые композиты, болты и клеевые слои, изготовленные из изотропных материалов. Установлено, что гибридные вертикальные Т- и L-образные болтовые соединения существенно прочнее клеевых Т- и L-образных соединений.

**Ключевые слова:** болтовые соединения, подводная ударная волна, композиты, разрушение, Т- и L-образные соединения.

DOI: 10.15372/PMTF20200417

**Введение.** В композитных конструкциях наименьшая прочность имеет место в областях соединения материалов. Как правило, в таких конструкциях используются клеевые соединения, обладающие большой прочностью на сдвиг, но достаточно легко расслаивающиеся. Для предотвращения расслаивания применяются слоистые клеевые соединения, усиленные болтовыми соединениями.

В работе [1] с использованием метода конечных элементов исследовано трехмерное напряженное состояние в клеевых соединениях внахлест. В [2] приведены результаты численного моделирования напряженного состояния в клеевых соединениях внахлест при наличии клеевого слоя большой толщины. Эти результаты обобщены на случай нелинейных клеевых соединений [3].

В работе [4] проведено численное и экспериментальное моделирование разрушения под действием растягивающей нагрузки Т-образных соединений композитов при наличии клеевого соединения из бисмалеимидной смолы марки Т700. В [5] численно и экспериментально исследованы напряженное состояние, повреждаемость и типы разрушения клеевых вертикальных L-образных соединений алюминиевых и композитных деталей.

Выполнен ряд исследований клеевых соединений, усиленных болтовыми соединениями (болтами). В работе [6] методом конечных элементов изучено напряженное состояние в слоистых композитах при наличии болтовых, клеевых и гибридных соединений. В [7]

с использованием полуаналитического метода исследовано напряженное состояние в композитных гибридных соединениях внахлест при действии как поперечных, так и продольных нагрузок. В [8] методом конечных элементов выполнено моделирование напряженного состояния в клеевых и гибридных соединениях, изготовленных с использованием эластичного клея. В работе [9] с помощью метода конечных элементов и пакета ANSYS исследовано разрушение в гибридных одно- и двусторонних соединениях внахлест слоистых композитов при воздействии осевых, сдвиговых и изгибающих нагрузок.

Результаты изучения реакции морских сооружений на воздействие подводных взрывов используются при конструировании и строительстве морских судов. В работе [10] проведено сравнение реакции на воздействие подводных взрывов конструкций из усиленных стекловолокнами слоистых композитов, изготовленных способом литьевого или ручного пресования. В работе [11] численно и экспериментально исследована повреждаемость круглых пластин из эпоксидного Е-стеклопластика (эпоксидная смола, армированная стеклотканью из Е-стекла) при воздействии на них ударной волны, возникающей при подводном взрыве.

В работе [12] экспериментально изучена реакция цилиндрических оболочек из Е-стеклопластика на подводный взрыв, а также исследовано влияние полимочевинного покрытия на прочность соединений. В [13] выполнено численное моделирование реакции прочного корпуса подводной лодки на подводный взрыв.

В настоящей работе проводится анализ прочности гибридных болтовых Т- и L-образных композитных соединений и стандартных вертикальных болтовых соединений при воздействии на них ударной волны, возникающей при бесконтактном подводном взрыве. Насколько известно авторам данной работы, ранее такие исследования не проводились.

**1. Материалы и методы исследования.** На рис. 1 приведены геометрические размеры (в миллиметрах) образцов с гибридными болтовыми L- и Т-образными соединениями. В соединениях этих двух типов подложка (склеиваемый материал) состоит из слоистого композита, слои которого уложены симметрично в следующей последовательности: [однонаправленный стеклопластик / тканевый углепластик / однонаправленный углепластик]<sub>сим.</sub> Слои в накладках уложены следующим образом: [однонаправленный стеклопластик / тканевый углепластик / однонаправленный стеклопластик]. В таких гибридных соединениях увеличение веса по отношению к весу склеиваемых соединений составляет 33 % для вертикальных Т-образных соединений и 34 % для вертикальных L-образных соединений. Механические свойства слоистых композитов, эпоксидной смолы, металлических болтов и гаек приведены в табл. 1 (индексы 1, 2, 3 соответствуют продольному, поперечному направлениям и направлению по толщине;  $S_{ut}$ ,  $S_{uc}$  — пределы прочности при растяжении и сжатии соответственно;  $S_y$  — предел текучести;  $\rho$  — плотность;  $h$  — толщина пластины (для углепластика и стеклопластика) или слоя (для эпоксидной смолы)).

На границах между слоями композита и на границе между клеевым слоем и подложкой ставились условия жесткого сцепления. Эти условия моделируются с использованием функции “многоточечных ограничений”. На границах между болтами и отверстиями, между композитом и гайками, а также между композитом и головками болтов задавались условия трения. При реализации условий трения использовался метод штрафных функций. Задача формулировалась с учетом больших деформаций.

Анализ напряженного состояния проводился в следующей последовательности:

1) задавались предварительные растягивающее усилие  $F$  и крутящий момент  $T$ :

$$T = \mu F D_b$$

( $F = 1000$  Н;  $\mu = 0,2$  — коэффициент трения;  $D_b$  — диаметр болта);

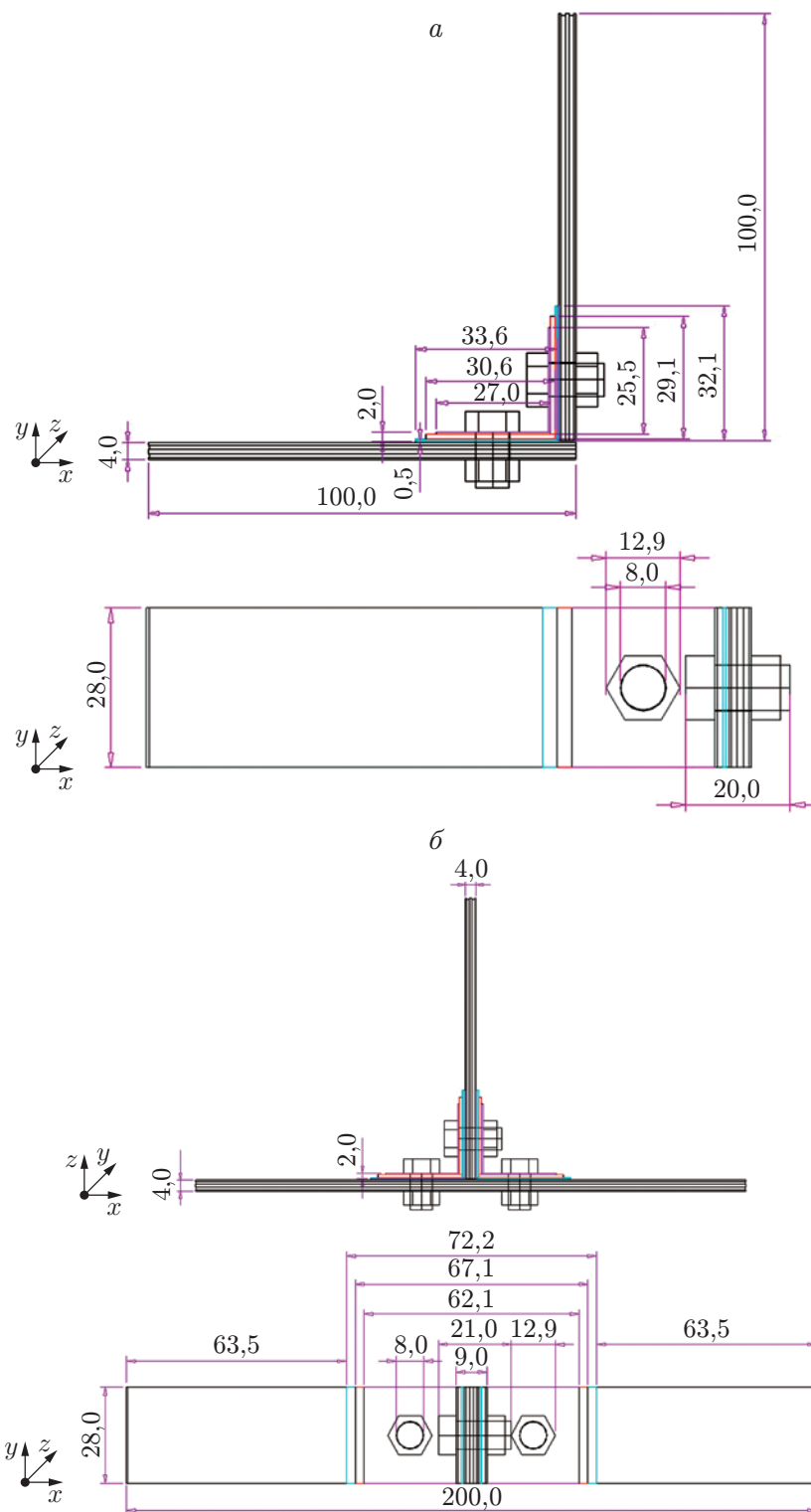


Рис. 1. Геометрия гибридных болтовых вертикальных L-образного (а) и Т-образного (б) соединений

Таблица 1

Механические характеристики слоистого композита, связующего, болтов и гаек

Материал	Механические характеристики
Однонаправленный углепластик	$E_1 = 123,3$ ГПа, $E_2 = E_3 = 7,78$ ГПа, $G_{12} = G_{13} = 5,0$ ГПа, $G_{23} = 3,08$ ГПа, $v_{12} = v_{13} = 0,27$ , $v_{23} = 0,42$ , $S_{ut-1} = 1632$ МПа, $S_{ut-2} = S_{ut-3} = 34$ МПа, $S_{uc-1} = -704$ МПа, $S_{uc-2} = S_{uc-3} = -68$ МПа, $S_{12} = S_{13} = 80$ МПа, $S_{23} = 55$ МПа, $\rho = 1518$ кг/м <sup>3</sup> , $h = 0,5$ мм
Тканевый углепластик	$E_1 = E_2 = 59,16$ ГПа, $E_3 = 7,5$ ГПа, $G_{12} = 17,5$ ГПа, $G_{13} = G_{23} = 2,7$ ГПа, $v_{12} = 0,04$ , $v_{13} = v_{23} = 0,3$ , $S_{ut-1} = S_{ut-2} = 513$ МПа, $S_{ut-3} = 50$ МПа, $S_{uc-1} = S_{uc-2} = -437$ МПа, $S_{uc-3} = -150$ МПа, $S_{us-12} = 120$ МПа, $S_{us-13} = S_{us-23} = 55$ МПа, $\rho = 1451$ кг/м <sup>3</sup> , $h = 1,0$ мм
Однонаправленный стеклопластик	$E_1 = 45$ ГПа, $E_2 = E_3 = 10$ ГПа, $G_{12} = G_{13} = 5,0$ ГПа, $G_{23} = 3,85$ ГПа, $v_{12} = v_{13} = 0,3$ , $v_{23} = 0,4$ , $X_T = 1100$ МПа, $Y_T = Z_T = 35$ МПа, $X_C = -675$ МПа, $Y_C = Z_C = -120$ МПа, $S_{12} = S_{13} = 80$ МПа, $S_{23} = 46$ МПа, $\rho = 2000$ кг/м <sup>3</sup> , $h = 0,5$ мм
Эпоксидная смола	$E = 3780$ МПа, $G = 1400$ МПа, $\nu = 0,35$ , $S_{ut} = 54,6$ МПа, $\rho = 1160$ кг/м <sup>3</sup> , $h = 0,5$ мм
Сталь (болты и гайки)	$E = 200$ ГПа, $G = 77$ ГПа, $\nu = 0,3$ , $S_{ut} = 460$ МПа, $S_y = 250$ МПа, $\rho = 7850$ кг/м <sup>3</sup> , $D_b = 8$ мм

2) задавались смещения, соответствующие предварительной нагрузке (предполагалось, что края подложек неподвижны);

3) задавалось давление на горизонтальную подложку  $P$  ударной волны, возникающей в результате бесконтактного взрыва:

$$P = P_{\max} e^{-(t-t_1)/\theta}.$$

Здесь  $P_{\max} = K_1(W^{1/3}/R)^{A_1}$  — максимальное давление в ударной волне;  $\theta = K_2W^{1/3}(W^{1/3}/R)^{A_2}$  — коэффициент затухания давления;  $W$  — вес заряда;  $R$  — расстояние от заряда до мишени; константы  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  зависят от типа взрыва и определяются экспериментально (в американской системе единиц  $K_1 = 22\,505$ ,  $K_2 = 0,058$ ,  $A_1 = 1,18$ ,  $A_2 = -0,185$  [14]).

Рассматривались три типа разрушения гибридного соединения: разрушение адгезионного слоя, разрушение подложки и разрушение болта. При этом использовались следующие критерии разрушения Хашина:

1) критерий разрушения волокна при растяжении ( $\sigma_1 \geq 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_1}{S_{ut-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{sh-12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{sh-13}}\right)^2 = f_1; \quad (1)$$

2) критерий разрушения волокна при сжатии ( $\sigma_1 < 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_1}{S_{uc-1}}\right)^2 = f_2; \quad (2)$$

3) критерий разрушения матрицы при растяжении ( $\sigma_2 \geq 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_2}{S_{ut-2}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{sh-12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{sh-13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{sh-23}}\right)^2 = f_3; \quad (3)$$

4) критерий разрушения матрицы при сжатии ( $\sigma_2 < 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_2}{2S_{sh-23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{sh-12}}\right)^2 + \left(\left(\frac{Y_C}{2S_{sh-23}}\right)^2 - 1\right)\left(\frac{\sigma_2}{S_{uc-2}}\right) + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{sh-23}}\right)^2 = f_4; \quad (4)$$

5) критерий расслоения ( $\sigma_2 \geq 0$ )

$$\left(\frac{\sigma_3}{S_{ut-3}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{sh-13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{sh-23}}\right)^2 = f_5. \quad (5)$$

В (1)–(5)  $S_{sh}$  — предел прочности при сдвиге;  $f_i = 1/n_i^2$ ;  $n_i$  — коэффициенты безопасности для соответствующего типа разрушения. Очевидно, что разрушение происходит, если  $n \leq 1$ . Использовались также следующие критерии разрушения адгезионного слоя:

— критерий отслоения

$$\sigma_{peel}/S_{ut} = 1/n_6;$$

— критерий разрушения в результате сдвига

$$\tau_{max}/S_{sh} = 1/n_7;$$

— критерий разрушения болта

$$\sigma_{V.M}/S_y = 1/n_8.$$

**2. Результаты исследования и их обсуждение.** Ниже приводятся результаты численного моделирования.

2.1. *Апробация метода.* Полученные результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными и известными результатами численного моделирования для соединений двух типов: 1) одностороннего соединения внахлест; 2) вертикального Т-образного соединения.

В первом случае сравнивались распределения сдвиговых напряжений и напряжений отслаивания в адгезионном слое в гибридном (болтовом и клеевом) одностороннем соединении внахлест (рис. 2), полученные методом конечных элементов, с распределениями, полученными в работе [7]. В качестве подложек использовались слоистые композиты из трансверсально-изотропного материала, болты и гайки были изготовлены из изотропного материала.

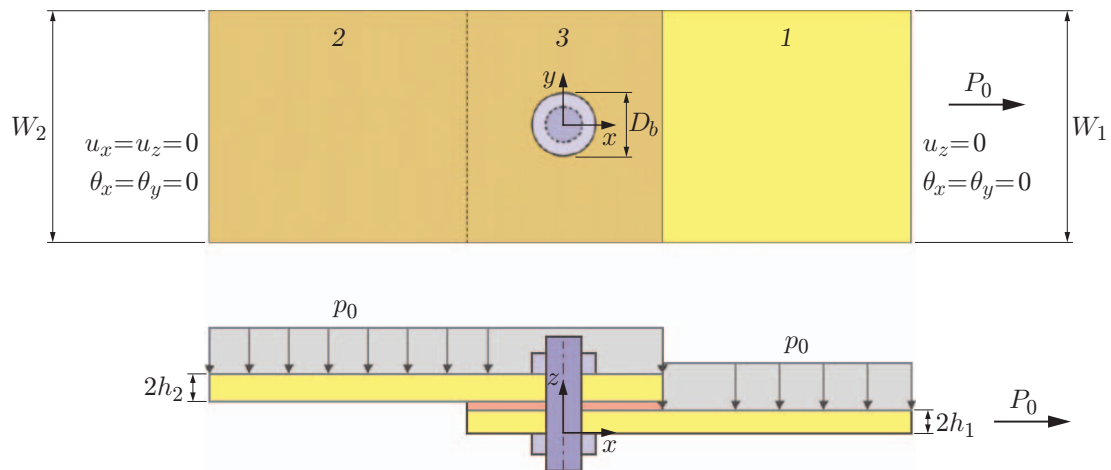


Рис. 2. Схема болтового одностороннего соединения внахлест [7]:  
1 — слой 1, 2 — слой 2, 3 — область соединения

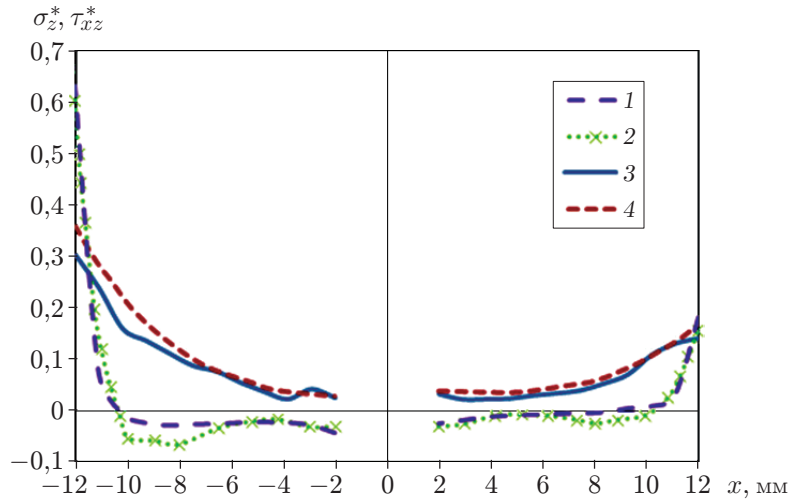


Рис. 3. Распределения растягивающих  $\sigma_z^*$  (1, 2) и сдвиговых  $\tau_{xz}^*$  (3, 4) напряжений в клеевом слое:

1, 3 — данные настоящей работы, 2, 4 — данные [7]

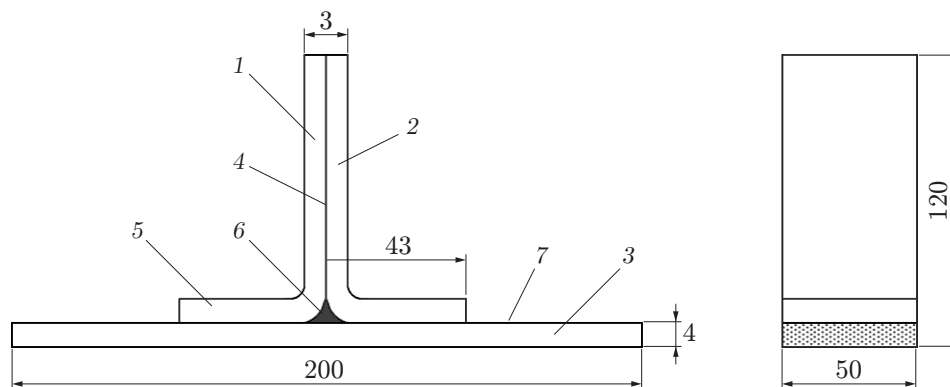


Рис. 4. Схема клеевого вертикального Т-образного соединения [4]:

1 — лист 1, 2 — лист 2, 3 — лист 3, 4 — центральная пластина, 5 — накладка, 6 — галтель, 7 — подложка

На гибридное соединение действуют осевая сила  $P_0 = 24$  кН и поперечное давление  $p_0 = 500$  кПа. На рис. 3 приведены распределения напряжений сдвига и напряжений отслаивания. Видно, что результаты, полученные в данной работе, хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [7].

Во втором случае численно моделировалось разрушение под действием растягивающего усилия в клеевом Т-образном соединении (рис. 4). Значения нагрузки, при которых происходит разрушение, сравнивались с экспериментальными значениями [4]. Склеиваемые листы представляли собой волокнистый композит, основой которого является бисмалеимидная смола QY8911, армированная нитями из углерода марки T700. Слои в листах 1, 2 уложены в следующем порядке:  $[-45/0/45/90/-45/0/90/0/45/90/-45/0/45]$ . В листе 3 укладка слоев симметричная:  $[45/0/-45/90/0/45/0/-45/90/0/45/0/-45/0/45/-45]_{\text{сим}}$ .

Расслоению подложки соответствует нагрузка  $Q = 1228$  Н, разрушению —  $Q = 1287$  Н, отслоению подложки от галтели —  $Q = 1564$  Н. Этим нагрузкам соответствуют экспериментальные значения  $Q = 1200, 1348, 1602$  Н [4]. Максимальное различие экспериментальных значений нагрузок и значений, полученных в результате численного моделирования, не превышает 4,5 %, что свидетельствует о точности численного решения.

Таблица 2

Результаты численного решения задачи о напряженно-деформированном состоянии гибридного Т-образного соединения при воздействии осевой нагрузки, равной 100 Н, и различном числе конечных элементов

Число конечных элементов	$\Delta_{x \max}$ , мм	$\sigma_{shear \max}$ , МПа	$\sigma_{V.M \max}$ , МПа	$f_{ad \max}$
2950	0,239	15,4	13,87	0,392
5022	0,228	13,5	12,46	0,341
8889	0,212	11,1	10,48	0,295
17 265	0,218	11,7	10,74	0,302

2.2. *Разрушение Т-образного соединения.* В табл. 2 приведены результаты численного моделирования (при различном числе конечных элементов) разрушения гибридного Т-образного соединения при воздействии на него осевой нагрузки, приложенной на свободном крае вертикальной подложки и равной 100 Н ( $\Delta_{x \max}$  — максимальное смещение подложки,  $\Delta_{shear \max}$  — максимальное напряжение сдвига в клеевом слое,  $\sigma_{V.M \max}$  — максимальное напряжение Мизеса в болте,  $f_{ad \max}$  — максимальное относительное удлинение подложки при разрушении). В соответствии с результатами, приведенными в табл. 2, при численном моделировании использовалось 8889 элементов.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициентов безопасности от времени для различных типов разрушения гибридного Т-образного соединения, находящегося на расстоянии 40 м от заряда мощностью 10 кг в тротиловом эквиваленте, и клеевого Т-образного соединения, находящегося на расстоянии 119 м от заряда.

Разрушение гибридного Т-образного соединения под действием бесконтактного подводного взрыва заряда мощностью 10 кг в тротиловом эквиваленте происходит при максимальном давлении в ударной волне, равном 1660 кПа, в то время как расслоение клеевого Т-образного соединения под действием ударной волны, возникающей при взрыве заряда такой же мощности, происходит при максимальном давлении в ударной волне, равном 457 кПа.

2.3. *Разрушение L-образного соединения.* В табл. 3 приведены результаты численного моделирования (при различном числе конечных элементов) разрушения гибридного L-образного соединения при воздействии осевой нагрузки, равной 65 Н. В соответствии с данными, приведенными в табл. 3, при численном моделировании использовался 13 751 элемент.

Ниже приводятся результаты численного моделирования разрушения клеевого и гибридного L-образных соединений при воздействии на них ударной волны, возникающей при взрыве подводного заряда мощностью 10 кг в тротиловом эквиваленте. На рис. 6 представлены зависимости коэффициентов безопасности от времени для гибридного L-образного соединения, находящегося на расстоянии 73 м от взрыва, и для клеевого L-образного соединения, находящегося на расстоянии 100 м от взрыва.

Разрушение вследствие расслоения в гибридном L-образном соединении, находящемся на расстоянии от заряда 73 м, происходит при максимальном давлении в ударной волне, равном 819 кПа. В клеевом L-образном соединении, находящемся на расстоянии от заряда 100 м, разрушение вследствие расслоения происходит при максимальном давлении в ударной волне, равном 560 кПа.

В табл. 4 приведены результаты численного моделирования разрушения соединений различного типа при воздействии на них ударной волны, возникающей при взрыве подводного заряда мощностью 10 кг в тротиловом эквиваленте. Анализ данных, приведенных

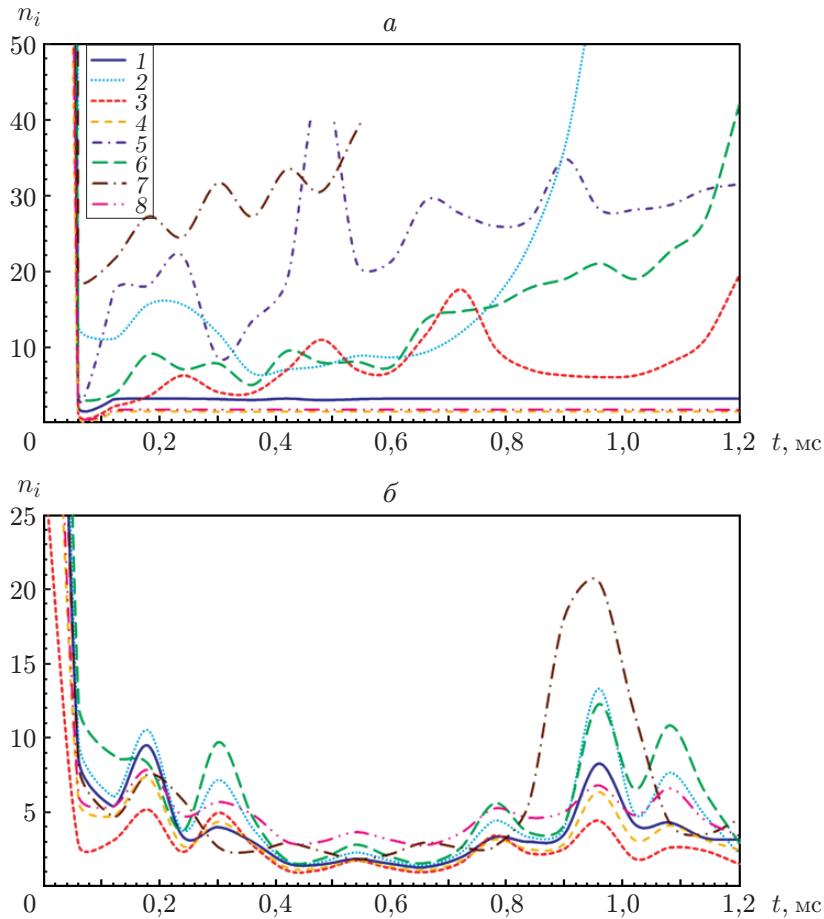


Рис. 5. Зависимость коэффициентов безопасности от времени:  
*a* — гибридное Т-образное соединение, находящееся на расстоянии 40 м от взрыва; *б* — клеевое Т-образное соединение, находящееся на расстоянии 119 м от взрыва; 1 — разрушение волокон в подложке при растяжении, 2 — разрушение клеевого слоя при сдвиге, 3 — расслоение композита, 4 — разрушение матрицы при растяжении, 5 — разрушение болта при максимальном напряжении Мизеса, 6 — отделение клеевого слоя, 7 — разрушение волокон в подложке при сжатии, 8 — разрушение матрицы при сжатии

Таблица 3

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния гибридного L-образного соединения при воздействии осевой нагрузки, равной 65 Н

Число конечных элементов	$\Delta_{x \max}$ , мм	$\sigma_{shear \max}$ , МПа	$\sigma_{V.M \max}$ , МПа	$f_{ad \max}$
2385	2,824	2,53	45,72	0,604
5775	2,820	2,42	45,70	0,603
9941	2,817	1,73	37,46	0,446
13 751	2,770	1,74	36,72	0,440
18 246	2,785	1,61	34,45	0,443



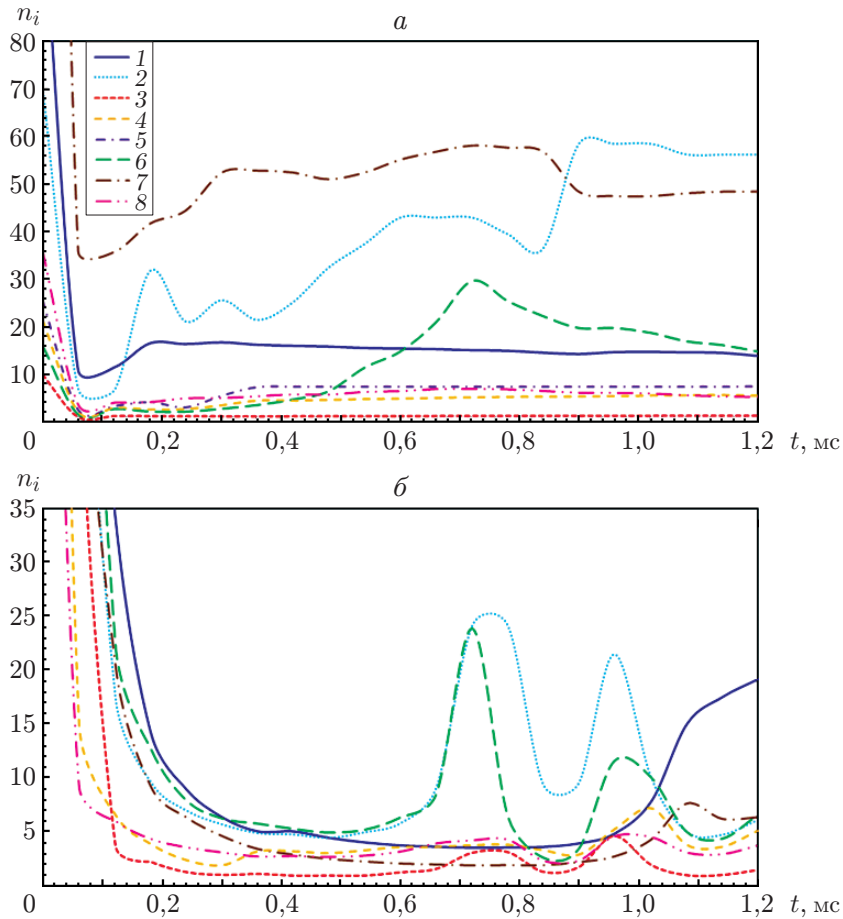


Рис. 6. Зависимость коэффициентов безопасности от времени:  
*a* — гибридное L-образное соединение, находящееся на расстоянии 73 м от взрыва;  
*б* — клеевое L-образное соединение, находящееся на расстоянии 100 м от взрыва;  
 остальные обозначения те же, что на рис. 5

Таблица 4

Типы разрушения гибридных и клеевых Т-образных соединений,  
 а также гибридных и клеевых L-образных соединений  
 при взрыве заряда мощностью 10 кг в тротиловом эквиваленте

Тип соединения	$R$ , м	$P_{\max}$ , кПа	Тип разрушения
Гибридное Т-образное	40	1660	Разрушение подложки
Клеевое Т-образное	119	457	Расслоение
Гибридное L-образное	73	819	Расслоение
Клеевое L-образное	100	560	Расслоение

в табл. 4, позволяет сделать следующие выводы. В случае действия ударной волны, возникающей при подводном взрыве, замена клеевого Т-образного соединения на гибридное Т-образное приводит к увеличению несущей способности соединения на 263 %, замена клеевого L-образного соединения на гибридное L-образное позволяет увеличить несущую способность соединения на 46 %. Основным типом разрушения клеевых и гибридных вертикальных соединений при воздействии на них ударной волны является расслоение.

**Заключение.** С использованием пакета ANSYS выполнено численное моделирование трехмерного напряженного состояния и разрушения гибридных и клеевых Т- и L-образных вертикальных соединений композитных листов, на которые действует ударная волна, возникающая при подводном взрыве заряда.

Проведено сравнение полученных результатов численных расчетов с экспериментальными данными и известными результатами численного моделирования. Изучены типы разрушения различных соединений. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы. Основной формой разрушения вертикальных соединений под действием ударной волны является расслоение. Замена клеевых Т- и L-образных соединений на гибридные Т- и L-образные соединения приводит к существенному увеличению их несущей способности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Bogdanovich A. E., Kizhakkethara I.** Three-dimensional finite element analysis of double-lap composite adhesive bonded joint using submodeling approach // *Composites. Pt B: Engineering*. 1999. V. 30. P. 537–551.
2. **Selahi E., Tahani M., Yousefsani S. A.** Analytical solutions of stress field in adhesively bonded composite single-lap joints under mechanical loadings // *Intern. J. Engng.* 2014. V. 27. P. 475–486.
3. **Selahi E., Kadivar M. H.** Non-linear analysis of adhesive joints in composite structures // *Intern. J. Adv. Design Manufactur. Technol.* 2016. V. 9, N 1. P. 101–110.
4. **Wu H., Xiao J., Wen S., et al.** Numerical and experimental investigation into failure of T700/bismaleimide composite T-joints under tensile loading // *Composite Structures*. 2015. V. 130, N 15. P. 63–74.
5. **Domingues N. R. E., Campilho R. D. S. G., Carbas R. J. C., da Silva L. F. M.** Experimental and numerical failure analysis of aluminium/composite single-L joints // *Intern. J. Adhes. Adhes.* 2016. V. 64. P. 86–96.
6. **Chan W. S., Vedhagiri S.** Analysis of composite bonded/bolted joints used in repairing // *J. Composite Materials*. 2001. V. 35. P. 1045–1061.
7. **Barut A., Madenci E.** Analysis of bolted-bonded composite single-lap joints under combined in-plane and transverse loading // *Composite Structures*. 2009. V. 88. P. 579–594.
8. **Hoang-Ngoc C. T., Paoissien E.** Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive // *Intern. J. Adhes. Adhes.* 2010. V. 30. P. 117–129.
9. **Selahi E.** Failure study of hybrid bonded-bolted composite single and double lap joints // *J. Stress Anal.* 2019. V. 3, N 2. P. 37–46.
10. **Mouritz A. P.** The effect of processing on the underwater explosion shock behaviour of GRP laminates // *J. Composite Materials*. 1995. V. 29, N 18. P. 2488–2503.
11. **LeBlanc J., Shukla A.** Dynamic response and damage evolution in composite materials subjected to underwater explosive loading: An experimental and computational study // *Composite Structures*. 2010. V. 92, N 10. P. 2421–2430.

12. **Gauch E., LeBlanc J., Shukla A.** Near field underwater explosion response of polyurea coated composite cylinders // Composite Structures. 2018. V. 202, N 15. P. 836–852.
13. **Fathallah E., Qi H., Tong L., Helal M.** Numerical investigation of the dynamic response of optimized composite elliptical submersible pressure hull subjected to non-contact underwater explosion // Composite Structures. 2015. V. 121. P. 121–133.
14. **Ucar H.** Dynamic response of a catamaran-hull ship subjected to underwater explosions: M. Sc. Thesis. Monterey: Naval Postgraduate School, 2006.

*Поступила в редакцию 11/XI 2019 г.,  
после доработки — 23/XII 2019 г.  
Принята к публикации 27/I 2020 г.*

---