

УДК 539.3

Экспериментальное исследование прочности конического заполнителя для трехслойных конструкций

О.М. Устарханов, М.С. Алибеков, Т.О. Устарханов

Дагестанский государственный технический университет, 367015, Махачкала, Российская Федерация, просп. Имама Шамиля, д. 70.

Experimental study of the strength of a conical core in sandwich structures

O.M. Ustarkhanov, M.S. Alibekov, T.O. Ustarkhanov

Daghestan State Technical University, I. ShamyI ave., 70, 367015, Makhachkala, Russian Federation.



e-mail: mithat@yandex.ru



В научной литературе не представлены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность теоретических расчетов параметров дискретных конических заполнителей. В статье описано экспериментальное исследование прочности конического заполнителя для трехслойных конструкций, используемых в авиационной и космической технике, а также в строительстве и машиностроении. Определены параметры дискретного конического заполнителя: модуль упругости, модуль сдвига, пределы прочности при сдвиге и сжатии. Приведен анализ расхождения теоретических и экспериментальных данных. Исследование показало расхождение между теоретическими и экспериментальными данными конического заполнителя в допустимых пределах, что позволяет применять теоретические расчеты при проектировании трехслойных конструкций.

Ключевые слова: конический заполнитель, трехслойная конструкция, сжатие, сдвиг.



Information on experimental studies proving the effectiveness of theoretical calculations of discrete conical aggregate parameters is lacking in the scientific literature. This article deals with the experimental study of the strength of a conical core in sandwich structures used in aerospace, building, and machine building industries. The discrete conical aggregate parameters include the elastic modulus, shear modulus, and shear and compression strength. The obtained theoretical and experimental data are compared and analyzed. The study showed that the discrepancy between the theoretical and experimental data is within the permissible limits, which makes it possible to use theoretical calculations when designing sandwich structures. The results of research improve the knowledge about sandwich constructions design.

Keywords: conical core, sandwich structure, compression, shear.

В настоящее время накоплен значительный опыт испытаний дискретных заполнителей. Стандартом установлены геометрические и прочностные параметры, методы изготовления, обработки и испытания клеевых сотовых заполнителей с шестигранной формой ячейки и

сот [1–10]. При проведении эксперимента с коническим заполнителем можно использовать этот опыт с учетом ряда особенностей, определяемых сложной дискретной пространственной структурой заполнителя и способа его изготовления.

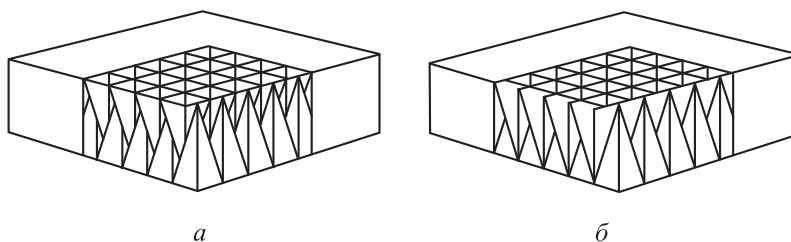


Рис. 1. Дискретный конический наполнитель:

a — обычный наполнитель; *b* — усиленный ребрами жесткости наполнитель

Для проверки теоретических зависимостей прочности, модуля упругости и сдвига, описывающих эти параметры по методике, изложенной в [1], проведено экспериментальное исследование прочности образцов дискретного усиленного конического наполнителя (рис. 1).

Для определения модуля упругости и предела прочности на сжатие были изготовлены образцы дискретного конического наполнителя (квадратные в плане). Поперечное сечение образца состояло из 16 ячеек.

В качестве материала наполнителя использовалась алюминиевая фольга толщиной $t_{ст} = 0,1$ мм и алюминий Д-19 толщиной $t_{ст} = 0,1$ мм. Испытанию подвергались три серии образцов соответственно с размерами основания пирамид 2×2 , 3×3 и 4×4 см и высотой 4, 5 и 6 см. В каждой серии испытывалось по шесть образцов. При испытании образцы устанавливались на нижнюю плиту разрывной машины Р-10. Известно, что машины такого типа имеют большую погрешность отсчета сжимающего усилия на границах поддиапазонов. В связи с этим сжимающая сила измерялась при помощи дополнительных тензодатчиков, которые располагались на диаметрально противоположных сторонах силового датчика, изготовленного из алюминиевого цилиндра диаметром 76 мм, толщиной стенки 0,5 мм и высотой 10 см. Цилиндр размещался между испытуемым образцом и верхней нагрузочной плитой разрывной машины. Датчики подключались по мостовой схеме к усилителю «Топаз-3», к выходу которого подключался самописец «Эндим 621.02». Калибровка измерительного устройства осуществлялась при помощи динамометра ДОС-3. Одновременно с этим производилась калибровка датчика перемещения, изготовленного на основе индикатора перемещений типа индикатор часового типа (ИЧ), установленного на жестком основании. На том же основании крепилась упругая пластина с тензодатчиками в непосредственном контакте со штоком индикатора. Регистрация перемещений осуществлялась самописцем «Эндим 621.02» через усилитель

«Топаз-3». Таким образом, в ходе испытаний непрерывно измерялись величина сжимающей силы P и деформации, см, наполнителя в направлении оси Z . Общий вид установки на сжатие приведен на рис. 2, *a*. По измеренному значению максимальной сжимающей силы рассчитывался предел прочности на сжатие

$$\sigma_{z3} = p_{\max} / F,$$

где F — площадь поперечного сечения образца в плоскости XOY , $F = 16(a \times a)$.

Полученное значение сравнивалось с расчетным пределом прочности на сжатие, определяемого по формуле

$$\sigma_{z3} = K_{пр} \sigma_{кр},$$

где

$$\sigma_{кр} = 0,487 \frac{\pi^2 E_{m3}}{1 - \nu^2} \left(\frac{2t_{ст}}{b} \right)^2 \cos \frac{\alpha}{2};$$

$$K_{пр} = \frac{4t_{ст}}{a} \sqrt{4 + (a/C)^2}; \quad b = \sqrt{(a/2)^2 + C^2};$$

ν — коэффициент Пуассона материала наполнителя.

Зависимость деформации наполнителя ΔW сжимающей силы P позволяет определить модуль сжатия наполнителя.

$$E_{z3} = \frac{PC}{F \Delta W}.$$

Теоретическое значение модуля при сжатии

$$E_{z3} = 4E_{m3} \frac{t_{ст}}{a} \sqrt{4 + (a/C)^2}.$$

Здесь E_{m3} — модуль Юнга материала наполнителя; $t_{ст}$ — толщина стенки конического наполнителя; a — длина стороны основания пирамидального наполнителя; C — высота наполнителя; ΔW — сближение несущих слоев по нормали к срединной поверхности наполнителя; α — угол наклона стенок наполнителя.

Испытание образцов дискретного конического наполнителя на сжатие показано на рис. 2, *a*.

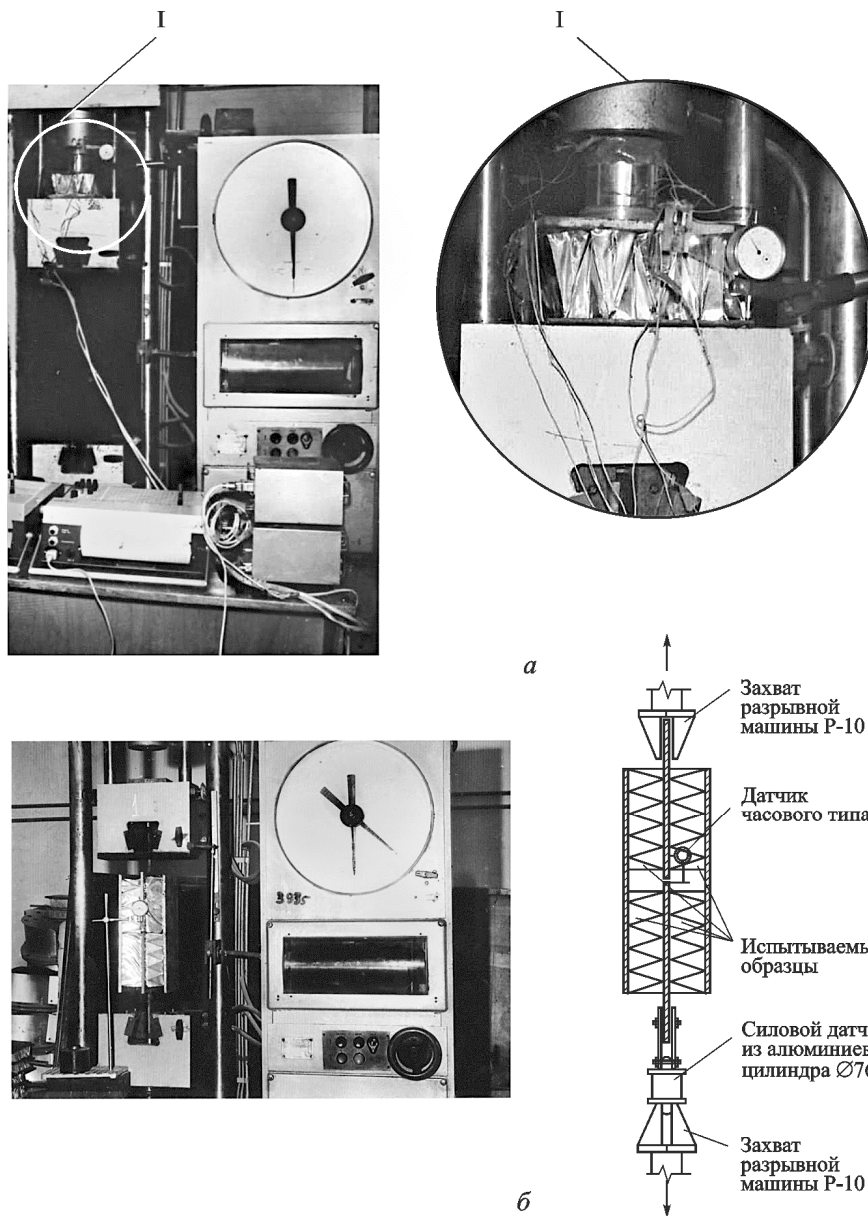


Рис. 2. Установка для испытания:
а — на сжатие; б — на сдвиг

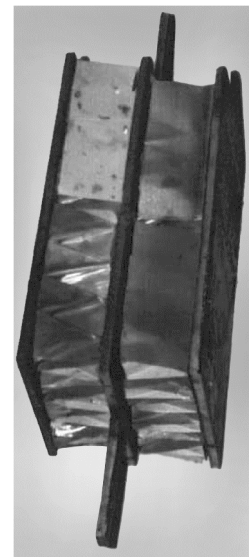


Рис. 3. Образец,
испытываемый на сдвиг

Сравнение данных теоретических исследований с экспериментальными при сжатии образцов приведено в таблице.

Для экспериментального исследования заполнителя на сдвиг образцы испытывались на установке, изображенной на рис. 2, б.

Геометрические характеристики испытываемого образца выбраны согласно рекомендациям, приведенным в работе [1]. Образец, испытываемый на сдвиг, показан на рис. 3.

Образцы для испытаний на сдвиг изготавливались из тех же материалов, что и образцы для испытаний на сжатие. Были изготовлены и испытаны три серии образцов.

При испытании на сдвиг между образцом и верхним захватом устанавливался тот же цилиндр с тензодатчиками, что и при испытании на сжатие, и тот же датчик перемещений. Калибровка датчика растягивающей силы осуществлялась динамометром ДОР-3. В ходе испытаний измерялись растягивающая сила P и расстояние между средними пластинами Δ в направлении оси X .

По измеренной предельной растягивающей силе $P_{\text{пр}}$ рассчитывался предел прочности при сдвиге

$$\tau_{\text{хоз3}} = \frac{P_{\text{пр}}}{4F}.$$

**Теоретические и экспериментальные характеристики прочности
конического заполнителя при сжатии/сдвиге**

Номер варианта заполнителя	Геометрические размеры			Предел прочности заполнителя на сжатие $G_{\text{хоз3}}$, МПа		Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными, %
	$a \times a$, см	c , см	t , см	экспериментальный	теоретический	
<i>Алюминиевая фольга</i>						
1	2×2	4	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	0,230/0,129	0,283/0,145	18,7/11,0
2	3×3	5	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	0,135/0,053	0,108/0,054	20,0/1,8
3	4×4	6	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	0,097/0,051	0,084/0,0516	13,4/1,1
<i>Д-19</i>						
1	2×2	4	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	0,411/0,197	0,488/0,292	15,7/15,0
2	3×3	5	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	0,216/0,099	0,188/0,094	12,9/5,0
3	4×4	6	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	0,177/0,090	0,146/0,089	17,5/1,1
Номер варианта заполнителя	Геометрические размеры			Приведенный модуль упругости заполнителя на сжатие $E_{\text{хоз3}}$, МПа		Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными, %
	$a \times a$, см	c , см	t , см	экспериментальный	теоретический	
<i>Алюминиевая фольга</i>						
1	2×2	4	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	1427,6/426,5	1784,0/510,78	19,9/15,0
2	3×3	5	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	1092,9/330,1	1332,8/374,86	17,9/11,9
3	4×4	6	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	1070,0/310,25	1321,0/371,57	19/16,5
<i>Д-19</i>						
1	2×2	4	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	1723,48/493,68	2140,9/602,08	19,5/18,0
2	3×3	5	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	1487,5/373,35	1599,5/449,8	7/16,9
3	4×4	6	$1,10^{-2}/1,10^{-2}$	1410,91/392,4	1585,2/445,8	11/11,9

Полученное значение сравнивалось с расчетным значением предела прочности при сдвиге, определенного по формуле

$$\tau_{\text{хоз3}} = K_3 K_2 \frac{\pi D}{a^2 2t_{\text{ст}}} \cos \frac{\alpha}{2},$$

где $K_3 = (3t_{\text{ст}}/a) \sqrt{4 + (a/C)^2}$; K_2 — в зависимости от соотношения сторон ромбовидного элемента заполнителя и способов опирания этого элемента принят равным для высоты заполнителя: $C = 4$ см, $K_2 = 7,95$; $C = 5$ см, $K_2 = 7,75$; $C = 6$ см, $K_2 = 7,6$; $D = Et_{\text{ст}}^3/[12(1-\nu^2)]$.

Экспериментальная зависимость перемещения Δ от растягивающей силы позволяет определить модуль сдвига заполнителя в плоскости XOZ:

$$G_{\text{хоз3}} = \frac{PC}{\Delta F}.$$

Теоретическое значение модуля сдвига заполнителя в плоскости XOZ

$$G_{\text{хоз3}} = G_{\text{м.з}} \frac{3t_{\text{ст}}}{a} \sqrt{4 + (a/C)^2}.$$

Здесь $G_{\text{м.з}}$ — модуль сдвига заполнителя.

Сравнительные данные расчетных и экспериментальных значений при сдвиге приведены в таблице. Анализ этих данных показывает, что расхождение значений параметров, определенных из теоретических зависимостей с экспериментальными данными не превышает 20 %.

Таким образом, исследование показало, что расхождение между теоретическими и экспериментальными исследованиями конического заполнителя находится в допустимых пределах. Это позволяет применять теоретические расчеты при проектировании трехслойных конструкций.

Литература

- [1] Кобелев В.Н., Сухинин С.Н., Устарханов О.М., Волхонский А.Е. *Расчет прочности и устойчивости трехслойных конструкций*. Махачкала, ДГТУ, 2004. 154 с.
- [2] Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Экспериментальные исследования влияния клея и размеров ячейки на несущую способность трехслойной балки. *Известия вузов. Северо-кавказский регион. Сер. Технические науки*, 2012, № 2, с. 91–95.
- [3] Устарханов О.М., Кобелев В.Н., Булгаков А.И., Кулиева Ш.С. Экспериментальные исследования трехслойных балок для оценки влияния краевых эффектов на напряженно-деформированное состояние. *Известия вузов. Северо-кавказский регион. Сер. Технические науки*, 2005, с. 75–78.
- [4] Паймушин В.Н. Теория устойчивости трехслойных пластин и оболочек (Этапы развития, современное состояние и направления дальнейших исследований). *Известия РАН, Механика твердого тела*, 2001, № 2, с. 148–162.
- [5] Паймушин В.Н., Бобров С.Н., Иванов В.А., Полякова Т.В. Устойчивость трехслойного кругового кольца под равномерным внешним давлением. *Механика композитных материалов*, 2000, т. 36, № 3, с. 317–328.
- [6] Паймушин В.Н., Бобров С.Н., Голованов А.И. Методы конечно-элементного анализа произвольных форм потери устойчивости трехслойных пластин и оболочек. *Механика композитных материалов*, 2000, т. 36, № 4, с. 473–486.
- [7] Паймушин В.Н., Иванов В.А. Формы потери устойчивости однородных и трехслойных пластин при чистом сдвиге в тангенциальных направлениях. *Механика композитных материалов*, 2000, т. 36, № 2, с. 215–228.
- [8] Паймушин В.Н., Шалашилин В.И. Уточненные уравнения среднего изгиба трехслойных оболочек и сдвиговые формы потери устойчивости. *Доклады РАН*, 2003, т. 392, № 2, с. 195–200.
- [9] Паймушин В.Н., Вялков А.Е. Уточненная геометрически нелинейная теория трехслойных цилиндрических оболочек с трансверсально-мягким наполнителем произвольной толщины. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2002, № 3, с. 10–14.
- [10] Сухинин С.Н. *Прикладные задачи устойчивости многослойных композитных оболочек*. Москва, Физматлит, 2010. 241 с.

References

- [1] Kobelev V.N., Sukhinin S.N., Ustarkhanov O.M., Volkhonskii A.E. *Raschet prochnosti i ustoichivosti trekhslainykh konstruksii* [Calculation of the strength and stability of sandwich constructions]. Makhachkala, DSTU publ., 2004. 154 p.
- [2] Ustarkhanov O.M., Muselemov Kh.M., Ustarkhanov T.O. Eksperimental'nye issledovaniia vliianiia kleia i razmerov iacheiki na nesushchuiu sposobnost' trekhslainoi balki [Experimental investigations of glue and sells sizes influence on the load-carrying capacity of three-layer beams]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of higher education institutions. North Caucasus region. Series: Technical sciences]. 2012, no. 2, pp. 91–95.
- [3] Ustarkhanov O.M., Kobelev V.N., Bulgakov A.I., Kulieva Sh.S. Eksperimental'nye issledovaniia trekhslainykh balok dlia otsenki vliianiia kraevykh effektov na napriazhenno-deformirovannoe sostoianie [Experimental studies of sandwich beams to assess the impact of edge effects on the stress-strain state]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of higher education institutions. North Caucasus region. Series: Technical sciences]. 2005, pp. 75–78.
- [4] Paimushin V.N. Teoriia ustoichivosti trekhslainykh plastin i obolochek (Etapy razvitiia, sovremennoe sostoianie i napravleniia dal'neishikh issledovaniia) [Stability Theory of sandwich plates and shells (stages of development, current status and directions for further research)]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences]. 2001, no. 2, pp. 148–162.
- [5] Paimushin V.N., Bobrov S.N., Ivanov V.A., Poliakova T.V. Ustoichivost' trekhslainogo krugovogo kol'tsa pod ravnomernym vneshnim davleniem [Stability of the three circular ring

- under uniform external pressure]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. 2000, vol. 36, no. 3, pp. 317–328.
- [6] Paimushin V.N., Bobrov S.N., Golovanov A.I. Metody konechno-elementnogo analiza proizvol'nykh form poteri ustoychivosti trekhsloinykh plastin i obolochek [Methods of finite element analysis of arbitrary buckling of sandwich plates and shells]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. 2000, vol. 36, no. 4, pp. 473–486.
- [7] Paimushin V.N., Ivanov V.A. Formy poteri ustoychivosti odnorodnykh i trekhsloinykh plastin pri chistom sdvige v tangentsial'nykh napravleniiakh [Buckling of homogeneous and sandwich plates in pure shear in the tangential directions]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. 2000, vol. 36, no. 2, pp. 215–228.
- [8] Paimushin V.N., Shalashilin V.I. Utochnennye uravneniia srednego izgiba trekhsloinykh obolochek i sdvigovye formy poteri ustoychivosti [Presize Equations of Mean Bending of Sandwich Shells and Shear Forms of Instability]. *Doklady Akademii Nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. 2003, vol. 392, no. 2, pp. 195–200.
- [9] Paimushin V.N., Vialkov A.E. Utochnennaia geometricheski nelineinaia teoriia trekhsloinykh tsilindricheskikh obolochek s transversal'no-miagkim zapolnitelem proizvol'noi tolshchiny [Refined geometrically nonlinear theory of sandwich cylindrical shells with a transversely soft filler of arbitrary thickness]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsonnaia tekhnika* [Russian Aeronautics]. 2002, no. 3, pp. 10–14.
- [10] Sukhinin S.N. *Prikladnye zadachi ustoychivosti mnogoslonykh kompozitnykh obolochek* [Applied problems of stability of multilayered composite shells]. Moscow, Fizmatlit publ., 2010. 241 p.

Статья поступила в редакцию 24.06.2014

Информация об авторах

УСТАРХАНОВ Осман Магомедович (Махачкала) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения». Дагестанский государственный технический университет (367015, Махачкала, Российская Федерация, просп. Имама Шамиля, д. 70).

АЛИБЕКОВ Митхат Султанмахмудович (Махачкала) — ассистент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения». Дагестанский государственный технический университет (367015, Махачкала, Российская Федерация, просп. Имама Шамиля, д. 70, e-mail: mithat@yandex.ru).

УСТАРХАНОВ Тагир Османович (Махачкала) — инженер кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения». Дагестанский государственный технический университет (367015, Махачкала, Российская Федерация, просп. Имама Шамиля, д. 70).

Information about the authors

USTARKHANOV Osman Magomedovich (Makhachkala) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Building Structures and Hydraulic Engineering Constructions» Department. Daghestan State Technical University (DGTU, I. Shamyly ave., 70, 367015, Makhachkala, Russian Federation).

ALIBEKOV Mitkhat Sultanmakhmudovich (Makhachkala) — Assistant of «Building Structures and Hydraulic Engineering Constructions» Department. Daghestan State Technical University (DGTU, I. Shamyly ave., 70, 367015, Makhachkala, Russian Federation, e-mail: mithat@yandex.ru).

USTARKHANOV Tagir Osmanovich (Makhachkala) — Engineer of «Building Structures and Hydraulic Engineering Constructions» Department. Daghestan State Technical University (DGTU, I. Shamyly ave., 70, 367015, Makhachkala, Russian Federation).