



## ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЛОЕВ НА ПРОЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ СВС-КОМПОЗИТОВ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ\*

Хвостунков К.А.<sup>1,2</sup>, Бажин П.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения  
им. А.Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Развитие технологий получения компактных слоистых композитов методом свободного сжатия на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяет создавать произвольные пропорции как геометрии, так и механических свойств слоев материала. В данной работе предлагается развитие модели двухслойного СВС материала до уровня многослойного двухкомпонентного композита с симметричным и периодическим (несимметричным) расположением слоев. Модель строится в рамках таких трех параметров как отношение толщины нижнего слоя ко всей толщине образца, отношение прочностей на изгиб материала нижнего слоя к следующему слою и отношение модулей Юнга. В качестве критерия разрушения был использован критерий максимального растягивающего. Ввиду высокой прочности диффузионного соединения слоев, достигаемой при СВС-технологии, эффекты расслоения в процессе нагружения не учитывались, а жесткость на изгиб таких материалов как борид титана позволила ограничить кинематику задачи рамками модели балки Бернулли-Эйлера. Рассмотрен эффект изменения предельной нагрузки при трехточечном нагружении при смене очередности слоев в результате переворачивания образца. На примере таких материалов слоев как титан и борид титана проведено сравнение прогнозируемой по предлагаемой модели предельной величины нагрузки и экспериментальных данных по разрушению при трехточечном нагружении. Получено хорошее соответствие модели и эксперимента и подтвержден эффект начала разрушения не со внешнего слоя образца, а с нижнего края второго слоя. Показаны варианты в рамках модели многослойного композита, когда разрушение также начинается не со внешнего слоя, что может затруднять визуальный контроль зарождения очагов разрушения, например, на обшивке из слоистого материала.

**Ключевые слова:** трёхточечный изгиб; хрупкое разрушение композитов; многослойный композит; определение предельно допустимой нагрузки

## INFLUENCE OF LAYER SEQUENCE ON THE STRENGTH OF MULTILAYER SHS-COMPOSITES IN THREE-POINT BENDING

Khvostunkov K.A.<sup>1,2</sup>, Bazhin P.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00040,  
<https://rscf.ru/project/22-19-00040/>.

<sup>2</sup>*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

### ABSTRACT

The development of technologies for obtaining compact layered composites by free compression on the basis of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) allows to create arbitrary proportions of both geometry and mechanical properties of material layers. This paper proposes the development of a model of a two-layer SHS material to the level of a multilayer two-component composite with symmetric and periodic (asymmetric) arrangement of layers. The model is constructed in the framework of such three parameters as the ratio of the thickness of the bottom layer to the whole thickness of the specimen, the ratio of the bending strengths of the material of the bottom layer to the next layer and the ratio of Young's moduli. The maximum tensile criterion was used as the failure criterion. Due to the high strength of the diffusion bonding of the layers achieved by SHS technology, the effects of delamination during loading were not taken into account, and the bending stiffness of such materials as titanium boride allowed us to limit the kinematics of the problem to the Bernoulli-Euler beam model. The effect of changing the ultimate load under three-point loading when the order of layers is changed as a result of specimen overturning was considered. On the example of such layer materials as titanium and titanium boride the comparison of the load limit value predicted by the proposed model and experimental data on failure under three-point loading has been carried out. A good agreement between the model and the experiment is obtained and the effect of the beginning of fracture is confirmed not from the outer layer of the specimen, but from the lower edge of the second layer. The variants within the model of multilayer composite are shown, when fracture also starts not from the outer layer, which can complicate visual control of the origin of fracture centers, for example, on the cladding of laminated material.

**Keywords:** three-point bending; brittle fracture of composites; multi-layer composite; limit load determination

### ВВЕДЕНИЕ

Композиты на основе боридов титана обладают уникальными свойствами, такими как низкая плотность, высокая удельная прочность и хорошая коррозионная стойкость, что делает их перспективными материалами для применения в аэрокосмической, автомобильной, оборонной, биомедицинской промышленности [1,2]. Эти материалы обеспечивают наиболее высокую удельную прочность и модуль упругости по сравнению со стальными и никелевыми сплавами, при этом их плотность существенно ниже [3,4].

Основное влияние на свойства композитов оказывают методы их изготовления, доля и структура боридов в объеме материала. Сильное влияние на структуру боридов титана оказывают высокие степени деформации материала, которые приводят к существенному измельчению зерна и образованию текстурированности [5,6]. Также можно отметить, что у композиционных материалов на основе боридов титана с повышением температуры прочностные свойства уменьшаются в меньшей степени по сравнению с монолитными материалами за счет большей жаропрочности волокон моноборида титана.

Однако с каждым годом повышаются требования к физико-механическим и эксплуатационным свойствам композиционных материалов, вследствие их работы в более тяжелых и нагруженных условиях. Одним из перспективных направлений повышения свойств является разработка специального дизайна слоистого композиционного материала (СКМ), состоящего из чередующихся

слоев [1,7]. Для СКМ существенное влияние оказывают границы раздела между слоями, которые способствуют разветвлению трещин и их перезарождению в каждом новом слое. Это приводит к повышению трещиностойкости и усталостных свойств по сравнению с монолитными материалами [8,9]. Кроме того, разработка нового дизайна СКМ способна обеспечить уникальное сочетание механических и эксплуатационных характеристик, которые также не характерны для монолитных материалов [10-12].

Развитие современных технологий самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволяет создавать слоистые композиты с различными пропорциями как упругих, так и прочностных свойств слоев и их геометрических размеров [13]. Метод свободного СВС-сжатия [14-16] относится к прямым методам получения, поскольку позволяет получить компактные слоистые композиционные материалы на основе тугоплавких неорганических соединений в одну стадию на одном оборудовании. Регулируя параметры исходных заготовок и технологические режимы свободного СВС-сжатия, возможно получать слоистые композиты с регулируемой структурой и физико-механическими свойствами [17].

В настоящей статье предложена модель влияния отношения толщин, прочности и упругих свойств слоев на прочность СКМ, полученных методом свободного СВС-сжатия. В рамках модели балки Бернулли-Эйлера в условиях высокой прочности диффузного контакта слоев композита определена очередность разрушения слоев в условиях трехточечного нагружения. Показано существенное влияние прочности следующего после наиболее растягиваемого внешнего слоя на прочность всего композита. Определены условия начала разрушения со внутреннего слоя [18] и исследована зависимость очередности разрушения слоев в трехслойной балке от температуры [19].

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим балку прямоугольного поперечного сечения  $S$  из двух различной толщины слоев из упругих однородных материалов, чередующихся друг за другом симметричным или несимметричным образом, в условиях трехточечного нагружения. Нижний слой, противоположный стороне приложения нагрузки  $P$  обозначим индексом 1, следующий слой – индексом 2, далее 1, затем 2 и т.д.

Направим ось  $x$  горизонтально вдоль оси балки, а  $y$  – ортогонально оси  $x$ , вверх по толщине. Ось  $z$  направлена ортогонально плоскости  $xy$  по ширине  $a$  балки.  $L$  – расстояние между опорами при трехточечном нагружении,  $h_1$  – толщина нижнего слоя,  $h_2$  – толщина следующего снизу вверх слоя.

Толщины слоев из первого и второго материала могут быть различными, но сумма толщин ( $m+1$  для симметричного случая рис.1а или  $m$  для несимметричного случая рис.1б) слоев материала 1 и  $m$  слоев материала 2 равна фиксированной величине толщины балки  $b$ . Здесь  $m$  – это число полных пар слоев из первого и второго материала.

А. Симметричный случай

$$(m+1)h_1 + mh_2 = b, \quad h_1 = h, \quad h_2 = \frac{1}{m}b - \left(1 + \frac{1}{m}\right)h. \quad (1)$$

Б. Несимметричный случай

$$mh_1 + mh_2 = b, \quad h_1 = h, \quad h_2 = \frac{1}{m}b - h. \quad (2)$$

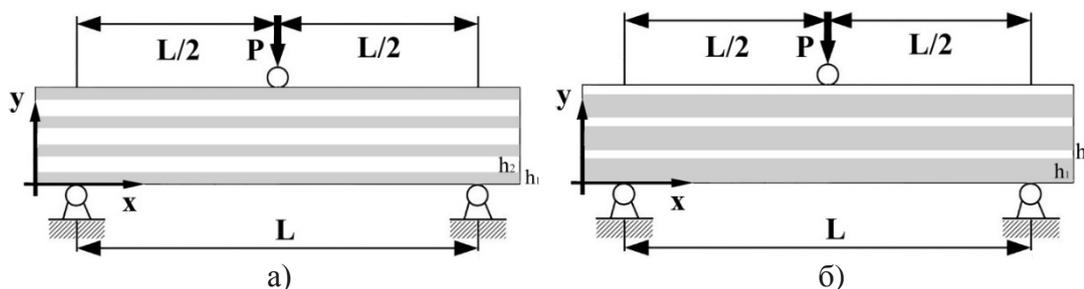


Рис.1. а) симметричный случай; б) несимметричный случай.

Для выбранной системы координат рассмотрим нормальные компоненты  $\sigma(x, y)$  упругих напряжений по сечению в точке  $x$ , ортогональному нейтральной оси, координата которой  $y_0(x)$ .  $E(y)$  модуль Юнга,  $\kappa(x)$  кривизна нейтральной оси. Изменением напряжений по координате  $z$  пренебрегаем. Также полагаем, что отношение расстояния между опорами к толщине балки достаточно велико, чтобы не учитывать влияние касательных компонент напряжений.

Введем три параметра двухслойности – отношение модуля Юнга нижнего слоя к верхнему  $\gamma = E_1/E_2$ , отношение толщины нижнего слоя ко всей толщине балки  $\eta = h_1/b$  и отношение пределов прочности на изгиб нижнего слоя к следующему  $\lambda = \sigma_1^*/\sigma_2^*$ .

Требуется:

1. определить область параметров двухслойности  $\eta, \gamma, \lambda$ , в которой хрупкое разрушение будет начинаться во втором снизу слое раньше, чем в нижнем.
2. определить величину предельной нагрузки для параметров двухслойности  $\eta, \gamma, \lambda$  с учетом изменения порядка слоев в результате переворачивания образца.

## 2. НАХОЖДЕНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Полагаем, что диффузионный контакт слоев прочен и не допускает расслоения. Мы введем безразмерные координаты и параметры

$$\gamma = \frac{E_1}{E_2}, \quad \chi = \frac{x}{L}, \quad \psi = \frac{y}{b}, \quad \xi = \frac{y_0(L/2)}{b}, \quad \eta = \frac{h_1}{b}, \quad \eta_2 = \frac{h_2}{b}, \quad l = \frac{L}{b}, \quad p = \frac{P}{E_2 S}, \quad (3)$$

где  $y_0(x)$  положение нейтральной оси, зависящее от продольной координаты, поэтому безразмерное положение нейтральной оси также будет зависимой от безразмерной координаты  $\xi(\chi)$ .

В силу особой жесткости получаемых СВС материалов уместно будет решать задачу в рамках гипотезы плоских сечений. Это обеспечивает непрерывность поля перемещений, включая продольные компоненты, но допускает разрыв продольных компонент напряжений при кусочно-постоянной зависимости модуля Юнга от поперечной координаты, что не противоречит условиям равновесия

$$\sigma(\chi, \psi) = \kappa(\chi) E(\psi) (\xi(\chi) - \psi), \quad (4)$$

Задавая модуль упругости в виде кусочно-постоянной зависимости в результате решения уравнений равновесия продольных сил и изгибающих моментов, получим в центральном сечении балки  $\chi = 1/2$  и  $\xi = \xi(1/2)$  для обоих случаев.

#### А. Симметричный случай

$$E(\psi) = E_2 \begin{cases} \gamma, \psi \in [1-\eta, 1] \\ 1, \psi \in \left[ k \frac{1-\eta}{m} + \eta, (k+1) \frac{1-\eta}{m} \right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad \eta_2 = (1-\eta)/m - \eta. \\ \gamma, \psi \in \left[ k \frac{1-\eta}{m}, k \frac{1-\eta}{m} + \eta \right) \end{cases}$$

Положение нейтральной оси  $\xi = 1/2$ .

$$\text{Кривизна } \kappa = \frac{3plm}{m + \eta(\gamma - 1)(m + 1)(m\eta^2 + (m + 2)(\eta - 1)^2)}.$$

#### Б. Несимметричный случай

$$E(\psi) = E_2 \begin{cases} 1, \psi \in \left[ \frac{k}{m} + \eta, \frac{k+1}{m} \right] \\ \gamma, \psi \in \left[ \frac{k}{m}, \frac{k}{m} + \eta \right) \end{cases}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad \eta_2 = 1/m - \eta.$$

$$\text{Положение нейтральной оси } \xi = \frac{1}{2} \frac{1 + (\gamma - 1)(m\eta + (m - 1))\eta}{1 + (\gamma - 1)m\eta}.$$

$$\text{Кривизна } \kappa = \frac{3pl(1 + (\gamma - 1)m\eta)m^2}{K(\eta, \gamma, m)},$$

где  $K(\eta, \gamma, m) = m^2 + (\gamma - 1)(1 + \gamma m^4 \eta^4 - (m\eta - 1)^4 + (m^2 - 1)(m^2(\gamma - 1)\eta^2 + 2m\eta))$ .

В итоге мы имеем величины максимальных растягивающих напряжений на нижней стороне нижнего слоя  $\sigma_1$  и на нижней стороне предыдущего слоя  $\sigma_2$ .

#### А. Симметричный случай

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} E_2 \gamma \kappa, \quad \sigma_2 = \frac{1}{2} E_2 \kappa (1 - 2\eta). \quad (5)$$

Если нагрузка  $P$  такая, что на нижнем слое достигается предел прочности  $\sigma_1^*$ , то

$$P_1^* = \frac{2}{3} \frac{\sigma_1^* S}{\gamma l} F(\eta, \gamma, m), \quad (6)$$

где  $F(\eta, \gamma, m) = 1 + (\gamma - 1) \left( \frac{m+1}{m} \right) (m\eta^2 + (m + 2)(1 - \eta)^2) \eta$ .

Если нагрузка  $P$  такая, что на втором слое снизу достигается предел прочности  $\sigma_2^*$ , то

$$P_2^* = \frac{2}{3} \frac{\sigma_2^* S}{l(1 - 2\eta)} F(\eta, \gamma, m). \quad (7)$$

Отношение этих предельных нагрузок выражается зависимостью

$$P_1^*/P_2^* = \lambda(1-2\eta)/\gamma. \tag{8}$$

**Б. Несимметричный случай**

Максимальные растягивающие напряжения на первом и втором слое

$$\sigma_1 = \kappa E_1 \xi, \quad \sigma_2 = \kappa E_2 (\xi - \eta). \tag{9}$$

Если первым разрушается нижний слой, то

$$P_1^* = \frac{2 \sigma_1^* S}{3 \gamma l m^2} \frac{K(\eta, \gamma, m)}{1 + (\gamma - 1)(m\eta^2 + (m - 1)\eta)}. \tag{10}$$

Если первым разрушается второй снизу слой, то

$$P_2^* = \frac{2 \sigma_2^* S}{3 l m^2} \frac{K(\eta, \gamma, m)}{(1 - 2\eta + (\gamma - 1)((m - 1)\eta - m\eta^2))}. \tag{11}$$

Отношение этих предельных нагрузок выражается зависимостью

$$\frac{P_1^*}{P_2^*} = \frac{\lambda}{\gamma} \left( 1 - \frac{\eta}{\xi} \right). \tag{12}$$

При условии  $P_1^*/P_2^* > 1$  величина критической нагрузки для начала разрушения в нижнем слое будет выше, чем критическая нагрузка для второго снизу слоя при одинаковой величине силы при трехточечном изгибе. Это означает, что при данном условии разрушение начнется не с внешнего, а с внутреннего слоя.

**3. АНАЛИЗ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ TiB И Ti**

Для анализа полученной зависимости рассмотрим частный случай материалов слоев, охарактеризованных в Таблице 1. Материал нижнего слоя – Титан, материал второго снизу слоя – Борид Титана.

Таблица 1.

Свойства материалов слоев.

Расстояние между опорами, L, мм	Ширина образца, a, мм	Толщина образца, b, мм	Предел прочности второго слоя TiB, $\sigma_2^*$ , МПа	Предел прочности нижнего слоя Ti, $\sigma_1^*$ , МПа	$E_2$ , ГПа	$E_1$ , ГПа
42,7	3,95	7,1	564	1100	407	110

Графически полученные зависимости (6), (8), (10) и (11) представлены на рис.2 для частного случая материала слоев.

На рис.2 показан случай сочетания упругих и прочностных свойств материалов слоев, когда инициатором разрушения становится второй снизу слой (пунктирная линия на графике). То есть начало разрушения может не детектироваться визуальным контролем по причине сохранения целостности внешнего видимого слоя композита. Причем, при числе слоев более 4 мы имеем исключительно начало разрушения во втором снизу слое для любых относительных толщин слоев.

Для симметричного расположения слоев в случае А максимальная нагрузка определяется из условия равенства (6) и (8), откуда получаем оптимальную  $\eta$

$$\frac{P_1^*}{P_2^*} = \frac{\lambda}{\gamma} (1 - 2\eta) = 1, \quad \eta = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\gamma}{\lambda} \right). \tag{13}$$

Но как видно на рис.2 мы имеем возможность приравнять нагрузки максимум лишь для четырех слоев не для максимального значения параметра  $\eta$ .

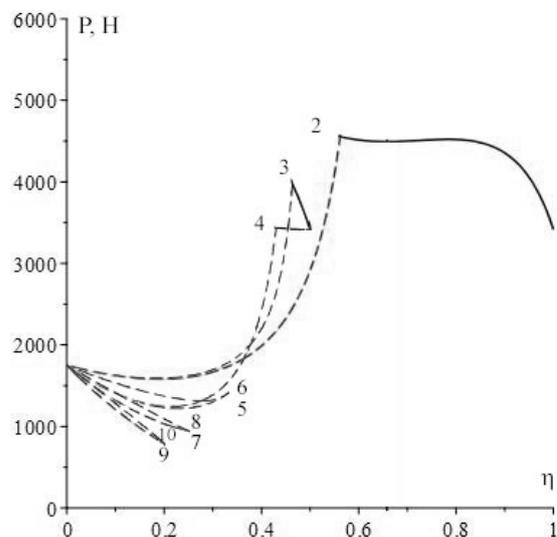


Рис.2. Зависимость предельной нагрузки от числа слоев и относительной толщины нижнего слоя. Номера у кривых характеризуют число слоев в балке. Пунктирная линия – это начало разрушения со второго снизу слоя, сплошная линия – с самого нижнего.

Для пяти и более слоев мы вынуждены брать значения предельной нагрузки на границе максимально допустимого размера относительной толщины нижнего слоя.

Для симметричного случая, частности, для трех слоев  $m = 1$ . Для материала, свойства которого указаны в Таблице 1, мы имеем относительную толщину слоя из первого материала

$$\eta = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\gamma}{\lambda} \right) = 0.435. \quad (14)$$

и максимальная нагрузка, которую выдержит трехслойный композит из этих материалов

$$P = 3445.15 \text{ H}. \quad (15)$$

Для несимметричного расположения слоев из условия равенства нагрузок (10) и (11) получаем условие на три параметра двухслойности для определения оптимальной толщины нижнего слоя для двух и четырех слоев

$$\frac{P_1^*}{P_2^*} = 1, \quad \lambda = \gamma \frac{1 + (\gamma - 1)((m-1)\eta + m\eta^2)}{1 - 2\eta + (\gamma - 1)((m-1)\eta - m\eta^2)}. \quad (16)$$

В частности, для случая двух слоев  $m = 1$

$$\eta = \frac{\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 + (\gamma^2 - \lambda^2)(1 - \gamma)}}{(\gamma + \lambda)(1 - \gamma)}. \quad (17)$$

Для материала, свойства которого приведены в Таблице 1, имеем

$$\eta = 0.576. \quad (18)$$

и максимальная нагрузка, которую выдержит двухслойный композит из этих материалов

$$P = 4620.56 \text{ H}. \quad (19)$$

#### 4. ВЛИЯНИЕ ПОРЯДКА СЛОЕВ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ НАГРУЗКУ

Рассмотрим зависимость предельной нагрузки при переворачивании двухслойного образца, свойства материалов которого приведены в Таблице 1.

На рис.3 приведен пример существенной зависимости прочности образца при трехточечном нагружении от последовательности слоев в случае двухслойной балки. Если нижний слой Ti, то при доле его в общей толщине образца от нуля до 60% разрушение начинается со второго слоя TiB (часть графика выделенная пунктиром) и это оказывает существенное влияние на прочность слоистого композита при трехточечном нагружении. Она падает в два раза по сравнению с композитом, где толщина нижнего слоя из Титана превышает 60%. Но при переворачивании образца, то есть при перемене очередности слоев, мы имеем падение прочности примерно в 4 раза, когда нижний слой состоит из материала TiB, а верхний Ti.

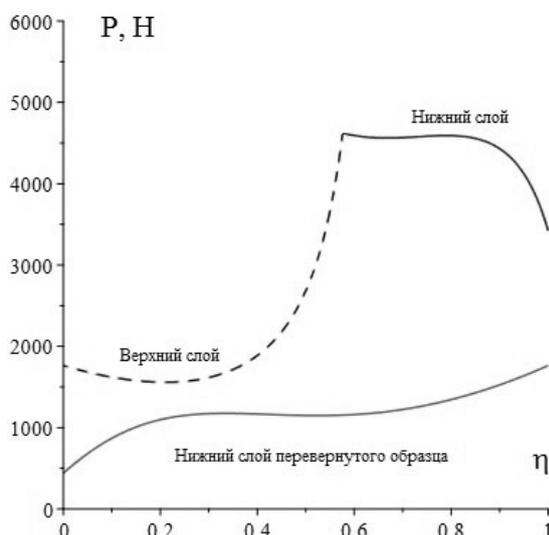


Рис.3. График зависимости предельной нагрузки для двухслойной балки при трехточечном нагружении от отношения толщины нижнего слоя к толщине балки при условии, что нижний слой – Ti, а верхний слой – TiB. Также приведена кривая зависимости для перевернутого образца с нижним слоем из TiB и верхним из Ti.

#### 5. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

На рис.4 приведено сравнение полученных экспериментальных результатов при трехточечном изгибе двухслойных образцов S1-S12 с аналитическими зависимостями прочности от относительной толщины нижнего слоя. Установлено, что для увеличения максимальной нагрузки при разрушении двухслойных образцов необходимо изготавливать образцы с отношением высот ближе к 0,6. Дальнейшее увеличение соотношения высоты слоев не приводит к существенному изменению предельной нагрузки. Начиная с соотношения 0,8 максимальная нагрузка резко снижается. В данном случае это связано с существенным уменьшением высоты металлокерамического слоя.

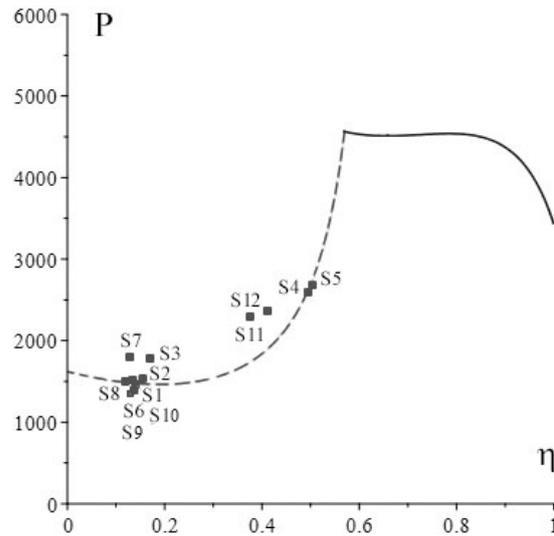


Рис.4. Сравнение экспериментальных данных по разрушению двухслойных образцов S1-S12 с аналитическими зависимостями прочности от относительной толщины нижнего слоя.

Таблица 2.

Данные эксперимента по трехточечному нагружению до разрушения.

Номер образца	Расстояние между опорами, L, мм	Ширина образца, а, мм	Толщина образца, b, мм	Толщина нижнего слоя, h, мм	$\eta = \frac{h_1}{b}$	Макс. усилие, P*, Н	Предел прочности верхнего слоя TiB, $\sigma_2^*$ , МПа	Предел прочности нижнего слоя Ti, $\sigma_1^*$ , МПа	$E_2$ , ГПа	$E_1$ , ГПа
S1	42.70	3.95	7.1	1	0.140	1486.2	564	1100	407	110
S2	42.70	3.95	7.1	1.1	0.155	1534.8	564	1100	407	110
S3	42.70	3.95	7.1	1.2	0.169	1782.4	564	1100	407	110
S4	42.70	3.95	7.1	3.5	0.493	2614.5	564	1100	407	110
S5	42.70	3.95	7.1	3.6	0.507	2651.8	564	1100	407	110
S6	50.65	3.76	7.1	0.98	0.138	1548.6	564	1100	407	110
S7	42.70	3.95	7.1	0.92	0.130	1821.8	564	1100	407	110
S8	42.70	3.95	7.1	0.85	0.120	1525.8	564	1100	407	110
S9	42.70	3.95	7.1	0.85	0.120	1305.7	564	1100	407	110
S10	42.70	3.95	7.1	0.92	0.130	1399.0	564	1100	407	110
S11	42.70	3.95	7.1	2.70	0.380	2316.1	564	1100	407	110
S12	42.70	3.95	7.1	3.00	0.423	2400.0	564	1100	407	110

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В заключение приведем сводный график предельных нагрузок для ряда числа слоев.

На рис.5 показан эффект, что при переворачивании образца изменяется последовательность начала разрушения слоев. Также видно, что при росте числа слоев предельная нагрузка существенно снижается.

Показано, что при определенных отношениях упругих свойств слоев и их прочностей, например, как приведенных в Таблице 1, многослойный композит начинает разрушаться при трехточечном изгибе со второго снизу слоя, что может быть скрыто от визуального контроля целостности изделия.

Последовательность расположения слоев и отношений их свойств существенно влияют как на порядок разрушения слоев, так и на предельную нагрузку при изгибе слоистого композита в целом – до 400% (см. рис.5. графики 2 и 2r при  $\eta = 0.6$ ).

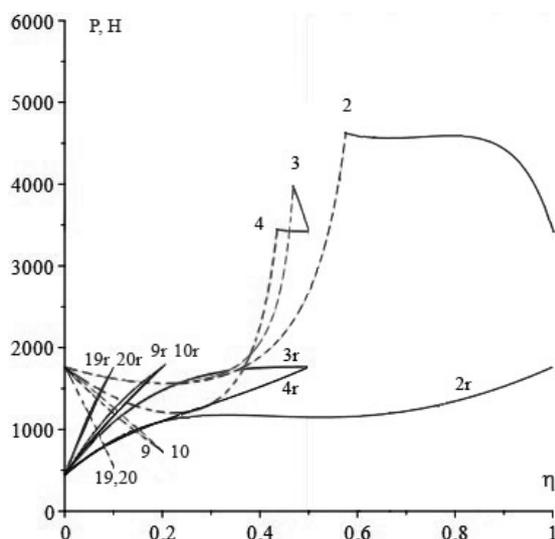


Рис.5. Зависимость предельной нагрузки для различного числа слоев, указанного рядом с графиком цифрой. Индекс r соответствует перевернутому образцу с указанным числом слоев. Пунктирная линия обозначает начало разрушения со внутреннего слоя, второго снизу. Сплошная линия – начало разрушения со внешнего нижнего слоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hasan M., Zhao J., Jiang Z. *Micromanufacturing of Composite Materials: A Review* // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2019. – No.1. – 012004.
2. Hayat M.D., Singh H., He Z., Cao P. *Titanium metal matrix composites: an overview* // Compos. Part A Appl. Sci. – 2019. – Vol.121. – Pp.418-438.
3. Jiashu Wei, Fang Yang, Miao Qi, Chenzeng Zhang, Cunguang Chen, Zhimeng Guo. *The “pinning” effect of in-situ TiB whiskers on the hot deformation behavior and dynamic recrystallization of (10 vol%) TiB/Ti-6Al-4V composites* // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol.22. – Pp.1695-1707.
4. Shuhua Liang, Weizhen Li, Yihui Jiang, Fei Cao, Gezhi Dong, Peng Xiao. *Microstructures and properties of hybrid copper matrix composites reinforced by TiB whiskers and TiB<sub>2</sub> particles* // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol.797. – Pp.589-594.
5. Konstantinov A.S., Bazhin P.M., Stolin A.M., Kostitsyna E.V., Ignatov A.S. *Ti-B-based composite materials: Properties, basic fabrication methods, and fields of application (review)* // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Vol.108. – Pp.79-88.
6. Shuai Wang, Lujun Huang, Rui Zhang, Qi An, Fengbo Sun, Fanchao Meng, Lin Geng. *Effects of rolling deformation on microstructure orientations and tensile properties of TiB/(TA15-Si) composites* // Materials Characterization. – 2022. – Vol.194. – No.12. – 112425.

7. Bazhin P.M., Konstantinov A.S., Chizhikov A.P., Pazniak A.I., Kostitsyna E.V., Prokopets A.D., Stolin A.M. *Laminated cermet composite materials: The main production methods, structural features and properties (review)* // *Ceramics International*. – 2021. – Vol.47. – No.2. – Pp.1513-1525.
8. Cao Z.H., Sun W., Ma Y.J. et al. *Strong and plastic metallic composites with nanolayered architectures* // *Acta Materialia*. – 2020. – Vol.195. – Pp.240-251.
9. Mo T., Chen J., Chen Z., He W., Liu Q. *Microstructure Evolution During Roll Bonding and Growth of Interfacial Intermetallic Compounds in Al/Ti/Al* // *Laminated Metal Composites*. The Minerals Metals & Materials Society. – 2019. – No.12. – Pp.4769-4777.
10. Nasakina E.O., Sudarchikova M.A., Demin K.Yu. et al. *The effect of the titanium surface layer thickness on the characteristics of a layered composite material* // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – No.1281(1). – 012057.
11. Chen Z., Zheng Y., Löfler L. et al. *Atomic insights on intermixing of nanoscale nitride multilayer triggered by nanoindentation* // *Acta Materialia*. – 2021. – No.214. – 117004.
12. Prokopets A.D., Bazhin P.M., Konstantinov A.S., Chizhikov A.P., Antipov M.S., Avdeeva V.V. *Structural features of layered composite material TiB<sub>2</sub>/TiAl/Ti6Al4V obtained by unrestricted SHS-compression* // *Materials Letters*. – 2021. – No.300. – 130165.
13. Bazhina A., Konstantinov A., Chizhikov A., Bazhin P., Stolin A., Avdeeva V. *Structure and mechanical characteristics of a layered composite material based on TiB/TiAl/Ti* // *Ceramics International*. – 2022. – Vol.48. – No.10. – Pp.14295-14300.
14. Bazhin P., Konstantinov A., Chizhikov A., Prokopets A., Bolotskaia A. *Structure, physical and mechanical properties of TiB-40 wt.%Ti composite materials obtained by unrestricted SHS compression* // *Materials Today Communications*. – 2020. – Vol.25. – No.101484.
15. Бажин П.М., Столин А.М., Константинов А.С., Чижиков А.П., Прокопец А.Д., Алымов М.И. *Особенности строения слоистых композиционных материалов на основе боридов титана, полученных методом свободного СВС-сжатия* // Доклады Академии наук. – 2019. – Т.488. – №3. – С.263-266.
16. Bazhina A., Chizhikov A., Konstantinov A., Khomenko N., Bazhin P., Avdeeva V., Chernogorova O., Drozdova E. *Structure, phase composition and mechanical characteristics of layered composite materials based on TiB/xTi-Al/ $\alpha$ -Ti ( $x = 1, 1.5, 3$ ) obtained by combustion and high-temperature shear deformation* // *Materials Science & Engineering A*. – 2022. – No.858 – 144161.
17. Bazhin P., Chizhikov A., Bazhina A., Konstantinov A., Avdeeva V. *Titanium-titanium boride matrix composites prepared in-situ under conditions combining combustion processes and high-temperature shear deformation* // *Materials Science & Engineering A*. – 2023. – No.874. – 145093.
18. Khvostunkov K.A., Bazhin P.M., Ni Q.-Q. et al. *Influence of layer-thickness proportions and their strength and elastic properties on stress redistribution during three-point bending of tib/ti-based two-layer ceramics composites* // *Metals* – 2023. – Vol.13. – No.8. – 1480.
19. Хвостунков К.А., Великов М.В., Бажин П.М. *Зависимость предельной нагрузки для трехслойной балки интерметаллид-керамика-металл при трёхточечном изгибе от геометрии, модуля упругости и температуры* //

Механика композиционных материалов и конструкций. – 2024. – Т.30. – №2.  
– С.181-197.

## REFERENCES

1. Hasan M., Zhao J., Jiang Z. *Micromanufacturing of Composite Materials: A Review*. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, Vol.1, 012004.
2. Hayat M.D., Singh H., He Z., Cao P. *Titanium metal matrix composites: an overview*. Compos. Part A Appl. Sci., 2019, Vol.121, Pp.418-438.
3. Jiashu Wei, Fang Yang, Miao Qi, Chenzeng Zhang, Cunguang Chen, Zhimeng Guo. *The “pinning” effect of in-situ TiB whiskers on the hot deformation behavior and dynamic recrystallization of (10 vol%) TiB/Ti-6Al-4V composites*. Journal of Materials Research and Technology, 2023, Vol.22, Pp.1695-1707.
4. Shuhua Liang, Weizhen Li, Yihui Jiang, Fei Cao, Gezhi Dong, Peng Xiao. *Microstructures and properties of hybrid copper matrix composites reinforced by TiB whiskers and TiB<sub>2</sub> particles*. Journal of Alloys and Compounds, 2019, Vol.797, Pp.589-594.
5. Konstantinov A.S., Bazhin P.M., Stolin A.M., Kostitsyna E.V., Ignatov A.S. *Ti-B-based composite materials: Properties, basic fabrication methods, and fields of application (review)*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, Vol.108, Pp.79-88.
6. Shuai Wang, Lujun Huang, Rui Zhang, Qi An, Fengbo Sun, Fanchao Meng, Lin Geng. *Effects of rolling deformation on microstructure orientations and tensile properties of TiB/(TA15-Si) composites*. Materials Characterization, 2022, Vol.194, No.12, 112425.
7. Bazhin P.M., Konstantinov A.S., Chizhikov A.P., Pazniak A.I., Kostitsyna E.V., Prokopets A.D., Stolin A.M. *Laminated cermet composite materials: The main production methods, structural features and properties (review)*. Ceramics International, 2021, Vol.47, No.2, Pp.1513-1525.
8. Cao Z.H., Sun W., Ma Y.J. et al. *Strong and plastic metallic composites with nanolayered architectures*. Acta Materialia, 2020, Vol.195, Pp.240-251.
9. Mo T., Chen J., Chen Z., He W., Liu Q. *Microstructure Evolution During Roll Bonding and Growth of Interfacial Intermetallic Compounds in Al/Ti/Al*. Laminated Metal Composites. The Minerals Metals & Materials Society, 2019, No.12, Pp.4769-4777.
10. Nasakina E.O., Sudarchikova M.A., Demin K.Yu. et al. *The effect of the titanium surface layer thickness on the characteristics of a layered composite material*. Journal of Physics: Conference Series, 2019, No.1281(1), 012057.
11. Chen Z., Zheng Y., Löfler L. et al. *Atomic insights on intermixing of nanoscale nitride multilayer triggered by nanoindentation*. Acta Materialia, 2021, No.214, 117004.
12. Prokopets A.D., Bazhin P.M., Konstantinov A.S., Chizhikov A.P., Antipov M.S., Avdeeva V.V. *Structural features of layered composite material TiB<sub>2</sub>/TiAl/Ti6Al4V obtained by unrestricted SHS-compression*. Materials Letters, 2021, No.300, 130165.
13. Bazhina A., Konstantinov A., Chizhikov A., Bazhin P., Stolin A., Avdeeva V. *Structure and mechanical characteristics of a layered composite material based on TiB/TiAl/Ti*. Ceramics International, 2022, Vol.48, No.10, Pp.14295-14300.
14. Bazhin P., Konstantinov A., Chizhikov A., Prokopets A., Bolotskaia A. *Structure, physical and mechanical properties of TiB-40 wt.%Ti composite materials obtained*

- by unrestricted SHS compression. *Materials Today Communications*, 2020, Vol.25, No.101484.
15. Bazhin P.M., Stolin A.M., Konstantinov A.S., Chizhikov A.P., Prokopets A.D., Alymov M.I. *Osobennosti stroeniya sloistykh kompozitsionnykh materialov na osnove boridov titana, poluchennykh metodom svobodnogo SVS-szhatiya [Features of structure of layered composite materials based on titanium borides obtained by free SHS compression method]*. *Doklady Akademii nauk*, 2019, Vol.488, No3, Pp.263-266.
  16. Bazhina A., Chizhikov A., Konstantinov A., Khomenko N., Bazhin P., Avdeeva V., Chernogorova O., Drozdova E. *Structure, phase composition and mechanical characteristics of layered composite materials based on TiB/xTi-Al/ $\alpha$ -Ti ( $x = 1, 1.5, 3$ ) obtained by combustion and high-temperature shear deformation*. *Materials Science & Engineering A*, 2022, No.858, 144161.
  17. Bazhin P., Chizhikov A., Bazhina A., Konstantinov A., Avdeeva V. *Titanium-titanium boride matrix composites prepared in-situ under conditions combining combustion processes and high-temperature shear deformation*. *Materials Science & Engineering A*, 2023, No.874, 145093.
  18. Khvostunkov K.A., Bazhin P.M., Ni Q.-Q. et al. *Influence of layer-thickness proportions and their strength and elastic properties on stress redistribution during three-point bending of tib/ti-based two-layer ceramics composites*. *Metals*, 2023, Vol.13, No.8, 1480.
  19. Khvostunkov K.A., Velikov M.V., Bazhin P.M. *Zavisimost' predel'noj nagruzki dlya trekhslonnoj balki intermetallid-keramika-metall pri tryokhtochechnom izgibe ot geometrii, modulya uprugosti i temperatury [Dependence of the ultimate load for a three-layer intermetallic-ceramic-metal beam in three-point bending on geometry, young's modulus and temperature]*. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2024, Vol.30, No.2, Pp.181-197.

Поступила в редакцию 14 октября 2024 года.

---

Сведения об авторах:

Хвостунков Кирилл Анатольевич – к.ф.-м.н., доц., Кафедра теории пластичности Механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: [kirill.khvostunkov@math.msu.ru](mailto:kirill.khvostunkov@math.msu.ru)

Бажин Павел Михайлович – д.т.н., зам.дир., ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, Россия; e-mail: [bazhin@ism.ac.ru](mailto:bazhin@ism.ac.ru)