

Паламарчук Т. А., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Яланский А. А., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Бобро Н. Т., магистр,
Селезнев А. М., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Паламарчук Т. А., д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,
Яланський А. О., д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,
Бобро М. Т., магістр,
Селезньов А. М., магістр
(ІГТМ НАН України)

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЧНИХ ТЕОРІЙ МІЦНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Palamarchuk T. A., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher,
Yalanckiy A. A., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher,
Bobro N. T., M.S (Tech.),
Seleznev A. M., M.S (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

FEATURES OF MECHANICAL STRENGTH THEORIES OF COMPOSITION MATERIALS

Аннотация. Цель исследований – выявление наиболее эффективных методов различных теорий прочности для описания композиционных материалов. В результате анализа и обобщения механических теорий прочности и их экспериментальной апробации установлены особенности и возможности их применения для описания прочностных свойств композиционных материалов. Показано, что чем шире диапазон свойств материалов, выбранных для испытаний, тем надежнее оказывается проверка, тем более уверенными будут выводы о достоверности и применимости тех или иных условий прочности. На этой основе разработаны варианты анкерного стяжного крепления, которые снижают расслоение пород, обеспечивают их объемное сжатие, что, в конечном итоге, предупреждает возникновение сдвиговых деформаций. Разработаны также способы анкерного крепления массива горных пород, в которых предусмотрено предварительное изменение свойств закрепляемых пород, что позволяет создавать более монолитные и устойчивые конструкции из композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы, теории прочности, напряженно-деформированное состояние, предел прочности, анкерное крепление.

В настоящее время многие условия прочности анизотропных материалов применяются для расчета прочности композиционных материалов в частных случаях сложного напряженного состояния.

Характерная особенность композиционных материалов – асимметрия пределов прочности при сжатии, растяжении и чистом сдвиге – в расчетных формулах или не учитывается в связи с предположением, что влияние не велико, или учитывается частично с использованием в качестве одной из констант предела прочности при чистом сдвиге τ_{45} , который определяется из опыта при двухосном, равном растяжении – сжатии (А. К. Малмейстер, 1980; Л. М. Седоков, 1975; В. Ф. Яценко, 1988).

Конкретных рекомендаций о возможности использования условий прочности при расчетах для частных случаев сложного напряженного состояния композиционных материалов нет, однако анализ сопоставления экспериментальных и теоретических данных позволяет все же сделать выводы о достоверности некоторых условий прочности в отдельных случаях.

Для прогнозирования прочности при сложном напряженном состоянии изотропных асимметричных по прочности материалов (в том числе и композиционных) могут использоваться классические теории прочности, учитывающие различные прочности при растяжении и сжатии.

Наиболее просто применение первой классической теории прочности (табл. 1).

Таблица 1 – классификация основных теорий прочности для описания композиционных материалов

Классические теории прочности				
первая теория прочности при $\left. \begin{array}{l} \sigma_1 > \sigma_2 < \sigma_3 > 0 \quad \sigma_1 < \sigma_p; \\ \sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < 0 \quad \sigma_1 > \sigma_c; \end{array} \right\}$ где $\sigma_p > 0$ и $\sigma_c < 0$ – соответственно значения пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии	обобщение второй классической теории прочности развития практически не получило, главным образом, из-за неудовлетворительного соответствия результатов опытов	третья теория прочности $\tau_{\max} = f(\sigma)$	развитие классической теории прочности (О. Мора) $\sigma_1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_c} \sigma_3 \leq \sigma_p$	
Обобщение энергетических теорий прочности				
теория прочности Шлейхера $V = \sigma_{cp} + b$, где V – удельная потенциальная энергия	теория прочности Баландина $V_\phi = a\sigma_{cp} + b$, где V_ϕ – удельная потенциальная энергия формоизменения	расчетная формула по теории прочности Шлейхера-Баландина $A(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + B(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3) + C(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 1$	теория прочности Ягня-Бурцинского $V_\phi + cV_{об} = a\sigma_{cp} + b$, где $V_{об}$ – удельная потенциальная энергия изменения объема	обобщенный вид уравнения энергетической теории прочности $\sigma_i = f(\sigma_{cp})$, где $\sigma_i = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_{cp}$
Развитие энергетических теорий прочности				
условие прочности Захарова $\sum_{i,k=1}^6 a_{ik} \omega_i \omega_k + \sum_{i=1}^6 \beta_i \omega_i + \gamma = 0$, где $\omega_1 = \sigma_{11}$, $\omega_2 = \sigma_{22}$, $\omega_3 = \sigma_{33}$, $\omega_4 = \sigma_{12}$, $\omega_5 = \sigma_{13}$, $\omega_6 = \sigma_{23}$; a_{ik} , β_i , γ – постоянные коэффициенты	условие прочности Писаренко и Лебедева при $\sigma_{11} > \sigma_{22}, \sigma_{33}$ $L + D_1 \sigma_{11} = 1$; при $\sigma_{22} > \sigma_{11}, \sigma_{33}$ $L + D_2 \sigma_{22} = 1$; при $\sigma_{33} > \sigma_{11}, \sigma_{22}$ $L + D_3 \sigma_{33} = 1$		условие прочности Гольденблата и Копнова $\Pi_{ik} \sigma_{ik} + \sqrt{\Pi_{iklm} \sigma_{ik} \sigma_{lm}} < 1$, где $i, k, l, m = 1, 2, 3$	

Примечание: коэффициенты, входящие в приведенные формулы, определяются из соответствующих граничных условий

Следует отметить, что экспериментальные данные о разрушении хрупких материалов показывают, что эта теория может давать при двухосном растяжении результаты, близкие к опытным.

Возможность обобщения третьей классической теории прочности была рассмотрена еще Ш. Кулоном, отметившим, что максимальное касательное напряжение в момент разрушения зависит от нормального напряжения на площадке, по которой действует максимальное касательное напряжение (см. табл. 1).

Дальнейшее развитие этой идеи и классическое решение вопроса о прочности при сложном напряженном состоянии асимметричных по прочности изотропных материалов было дано в конце XIX в. О. Мором, теория прочности которого построена на основании анализа геометрических представлений простых и сложных напряженных состояний. Критерий разрушения (или начала образования пластической деформации), по этой теории, так же как и по теории Кулона, – наибольшее касательное напряжение, но в отличие от критерия в третьей классической теории прочности это касательное напряжение зависит от нормального напряжения, действующего по той же площадке.

В связи с этим О. Мором была принята гипотеза о том, что напряжение не влияет на возникновение предельного состояния. Неучет среднего по величине напряжения является одним из недостатков теории прочности Мора, которая широко распространена в инженерной практике, особенно при расчете прочности в случае плоского напряженного состояния.

В качестве критерия в теории прочности Мора принята следующая функциональная зависимость, приведенная в таблице 1.

Предел прочности при чистом сдвиге по упрощенной теории прочности Мора можно определить, предполагая, что $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau$. Тогда

$$\tau = \frac{\sigma_p \sigma_c}{\sigma_p + \sigma_c}. \quad (1)$$

Допущения, принятые в теории прочности Мора, ограничивают применимость ее в областях напряженных состояний, близких к всестороннему равному растяжению или сжатию. Использование ее при плоском напряженном состоянии приводит к погрешностям до 20-25 % по сравнению с экспериментальными данными (Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев, 1976).

Обобщения энергетических теорий прочности развивалась в том же направлении, что и обобщение теории наибольших касательных напряжений: учитывалось влияние главных нормальных напряжений на используемые энергетических теориях критериальные характеристики материала – полную удельную потенциальную энергию деформации и удельную потенциальную энергию формоизменения.

В теории прочности Шлейхера предполагается, что полная удельная потенциальная энергия деформации линейно зависит от среднего напряжения. Условие разрушения по этой теории приведено в таблице 1.

Предел прочности при чистом сдвиге ($\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau$):

$$\tau = \sqrt{\frac{\sigma_3 \sigma_c}{2(1 + \nu)}}. \quad (2)$$

Условие прочности Шлейхера в расчетах используется редко из-за недостатков энергетической теории прочности Бельтрами, к которой оно сводится при переходе к полностью изотропному материалу при $\sigma_p = \sigma_c$.

Если в качестве критерия разрушаемости использовать линейную зависимость удельной потенциальной энергии формоизменения от среднего напряжения (теория прочности Баландина), то условие разрушения примет вид, приведенный в таблице 1.

В теории прочности Баландина используются также только две константы прочности материала. Предел прочности при чистом сдвиге по этой теории

$$\tau = \sqrt{\frac{\sigma_p \sigma_c}{3}}. \quad (3)$$

Уравнение Шлейхера–Баландина, приведенное в таблице 1, имеет вполне определенный физический смысл при принятой гипотезе о линейной зависимости удельной потенциальной энергии деформации от среднего напряжения. Это уравнение представляет собой расчетную формулу, полученную на основании критерия прочности Бурцинского, в котором используется неполная удельная потенциальная энергия деформации, состоящая из удельной потенциальной энергии формоизменения V_ϕ и части удельной потенциальной энергии изменения объема $V_{об}$.

По В. Бурцинскому условие разрушения имеет вид, приведенный в таблице 1.

Для определения коэффициентов a , b и c используются пределы прочности материала при одноосном растяжении, одноосном сжатии и чистом сдвиге.

К уравнению Шлейхера–Баландина пришел несколько позже и Ю. И. Ягн, формулируя критерий разрушения на основании геометрических представлений о форме предельной поверхности и полагая, что уравнение поверхности разрушаемости может быть задано в виде полинома второй степени, симметричного по отношению к главным нормальным напряжениям.

Для реальных материалов отношение σ_p/σ_c находится в пределах от 0 до 1, а отношение τ/σ_p – в пределах от 0,5 до 1. Контур разрушаемости при плоском напряженном состоянии при указанных отношениях σ_p/σ_c и τ/σ_p изображается кривой второго порядка – эллипсом, имеющим одну ось симметрии, проходящую через начало координат, то есть центр эллипса смещен относительно начала координат, так же как и в контурах разрушаемости по теориям Шлейхера и Баландина.

Рассмотренные три теории, основанные на использовании классических энергетических теорий прочности, были предложены еще в 20-30 годы прошлого столетия и неоднократно проверялись экспериментально, преимущественно

при двuosном напряженном состоянии. Опытная проверка их почти в течение полувека позволила оценить достоверность расчетных формул и установить, для каких материалов и при каких напряженных состояниях целесообразно применение теорий прочности Шлейхера, Баландина и Ягня-Бурцинского (Л. М. Седоков, 1975; Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев, 1976; И. И. Гольденблат, 1977).

Последующая разработка теорий прочности этого класса материалов в основном заключалась в установлении феноменологическим путем функциональных зависимостей между компонентами тензора напряжения или его инвариантами, преследуя цель добиться лучшего соответствия опытным данным хотя бы для определенных групп материалов. Количество используемых характеристик прочности материала принималось равным двум (σ_p, σ_c), трем (σ_p, σ_c, τ) и более. Развитие энергетических теорий прочности, как правило, сводилось к формулировке критерия для определенного состояния в виде

$$\tau_{cp} = f(\sigma_{cp}). \quad (4)$$

Критерий (4) аналогичен критерию Мора, однако он учитывает влияние всех трех главных нормальных напряжений при возникновении предельного состояния.

В ряде критериев разрушаемости в новых энергетических теориях прочности используется условие для предельного состояния (см. табл. 1).

Для большинства новых энергетических теорий расчетные формулы прочности можно получить, используя в качестве критерия любые величины, формально эквивалентные удельной потенциальной энергии формообразования. Подобный анализ этих теорий прочности можно найти в (Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев, 1976), однако широкого распространения в расчетной практике они не получили.

Анализ многих теорий прочности (а их предложено для рассматриваемого класса материалов около сорока) показывает, что разработка их сводится к отысканию уравнения предельной поверхности прочности в виде функции главных нормальных напряжений

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0, \quad (5)$$

наименее отклоняющейся от опытных данных, полученных при разрушении или в начале образования пластических деформаций в условиях сложного напряженного состояния.

Для оценки прочности при сложном напряженном состоянии изотропных, асимметричных по прочности материалов, разрабатывались также деформационные теории прочности, статистические теории, основанные на моделировании механизма разрушения, комбинированные, в которых используются основные положения различных классических теорий прочности.

В большинстве рассмотренных механических теорий прочности предельная поверхность прочности описывается одним уравнением. Однако предельная

поверхность может быть задана системой уравнений, каждое из которых справедливо для определенного диапазона главных нормальных напряжений. Это так называемый способ кусочных аппроксимаций предельной поверхности. Форма предельной поверхности при этом может быть сложнее, чем заданная одним уравнением, но основные характерные особенности предельной поверхности (плавность, выпуклость, замкнутость, симметрия относительно оси, равнонаклонной к осям координат) должны быть сохранены. Такой подход использован в работах (Л. М. Седоков, 1975; В. Ф. Яценко, 1988), где условие разрушаемости формулируется в виде набора функциональных зависимостей, справедливых в пределах одного октанта прямоугольной декартовой системы координат $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ при объемном (пространственном) напряженном состоянии или в пределах одного квадранта при плоском напряженном состоянии.

В (В. Ф. Яценко, 1988) в качестве критерия разрушаемости используется квадратичная функциональная зависимость компонентов напряжений – пластический потенциал Мизеса. В дальнейшем будем называть этот критерий разрушаемости квадратичным. В условия разрушаемости и в расчетных формулах по этому критерию учитывается, что в соответствии с основными требованиями к механической теории прочности композиционного материала предельная поверхность при сложном напряженном состоянии должна быть плавной и выпуклой.

Критерий разрушаемости в тензорных обозначениях имеет вид

$$A_{iklm}\sigma_{ik}\sigma_{lm} = 1, \quad (6)$$

где $i, k, l, m = 1, 2, 3$ (напряжения осей); σ_{ik} и σ_{lm} – нормальные и касательные напряжения; A_{iklm} – компоненты тензора прочности, которые могут быть выражены через пределы прочности материала при одноосном растяжении, одноосном сжатии и чистом сдвиге.

Соображения, положенные в основу энергетических теорий прочности изотропных материалов, нашли свое развитие и при формулировке ряда теорий прочности анизотропных композиционных материалов.

Выбрав в качестве критерия неполную удельную энергию деформации, частично учитывающую энергию изменения формы и объема и линейно зависящую от среднего нормального напряжения, К. В. Захаров (А. К. Малмейстер, 1980; Е. К. Ашкемази, 1980; И. И. Гольденблат, 1977) предложил следующее условие прочности (см. табл. 1).

В условиях прочности Захарова и Марина зависимость предела прочности при чистом сдвиге в диагональном направлении от знака касательных напряжений в явном виде не учитывается. В расчетных формулах используется только предел прочности при продолжительном чистом сдвиге и т.д., а пределы прочности при отрицательном чистом сдвиге определяются теоретически, то есть предполагается взаимосвязь между пределами прочности при положительном и отрицательном чистых сдвигах.

Г. С. Писаренко и А. А. Лебедев (Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев, 1976; В. Ф. Яценко, 1988), считая, что предельная поверхность формируется коническими

поверхностями, уравнения которых могут быть получены путем обобщения условия (6) на класс анизотропных материалов, имеющих различное сопротивление растяжению и сжатию, предлагают для случая, когда главные оси тензора напряжений совпадают с главными осями анизотропии, формулировать условие разрушаемости в виде трех уравнений (см. табл. 1).

Учитывая, что пределы прочности при чистом сдвиге, так же как и при одноосном растяжении и сжатии, должны являться независимыми объективными параметрами, характеризующими прочность материала, И. И. Гольденблат и В. А. Копнов предложили условие прочности композиционных материалов при сложном напряженном состоянии, основанное на представлении уравнения, описывающего поверхность прочности (разрушаемости) в виде полинома, составленного из тензоров напряжений и тензоров прочности (И. И. Гольденблат, 1977). В качестве критерия прочности принята функциональная зависимость, записанная в тензорно-инвариантной форме в виде разложения по степеням инвариантов.

Конкретизируя предложенную функциональную зависимость, И. И. Гольденблат и В. А. Копнов предлагают условие прочности для композиционных материалов (см. табл. 1).

По этому условию уравнение предельной поверхности прочности представляет собой уравнение поверхности второго порядка, коэффициенты которого – компоненты тензоров прочности – определяются на основании таких же опытов, как и при определении коэффициентов в условии прочности Захарова. Конкретная форма предельной поверхности может быть установлена в результате анализа опытных данных о пределах прочности, входящих в выражении компонент тензоров прочности.

Для описания поверхности разрушаемости композиционных материалов А. К. Малмейстером (А. К. Малмейстер, 1980) было предложено уравнение в виде полинома:

$$A_{ik}\sigma_{ik} + A_{iklm}\sigma_{ik}\sigma_{lm} + A_{iklmns}\sigma_{ik}\sigma_{lm}\sigma_{ns} + \dots, \quad (7)$$

где σ_{ik} , σ_{lm} , σ_{ns} – компоненты тензора напряжений; A_{ik} , A_{iklm} , A_{iklmns} – тензоры второго, четвертого и высших четных рангов, определяющие поверхность разрушаемости в шестимерном пространстве напряжений. Компоненты тензоров прочности определяются на основании опытных данных, как и в других условиях прочности.

Методика выбора условий прочности, основанная на использовании необходимого числа характерных прочностей, приводит к сложным расчетным формулам при плоском и объемном напряженном состояниях, содержащим, кроме пределов прочности материала при простых видах напряженного состояния много пределов прочности для частных случаев сложного напряженного состояния. Само определение этих дополнительных пределов прочности представляет трудоемкую экспериментальную задачу, практически не реализованную ни для одного композиционного материала.

В квадратичном условии прочности в качестве исходных данных используются критерий и условие прочности Мизеса для анизотропных материалов, пределы прочности которых не зависят от знака нормальных и касательных напряжений. Квадратичное условие прочности для класса композиционных материалов (В. Ф. Яценко, 1988) представляет обобщение теории прочности Мизеса способом кусочных аппроксимаций.

Поверхности прочности (разрушаемости), построенные по различным условиям прочности, между собой отличаются и могут не соответствовать истинной поверхности для конкретного композиционного материала. Изучение достоверности условий прочности – основная задача экспериментальных исследований прочности при сложном напряженном состоянии.

Так как реальные композиционные материалы имеют спектр анизотропии и асимметрии основных механических характеристик прочности, то целесообразно экспериментальные исследования по изучению достоверности условий прочности проводить для отдельных групп композиционных материалов, формируя эти группы по степени анизотропии и асимметрии пределов прочности.

Интерес к изучению как теоретических, так и экспериментальных аспектов особенностей поведения композиционных материалов при разрушении по-прежнему остается весьма ощутимыми. За последнее время опубликован ряд фундаментальных монографий, в том числе и за рубежом [1–6]. Кроме того, все больше появляется работ, в которых авторы при решении задач, связанных с композиционными материалами, применяют статистический подход [7].

Экспериментальная проверка условия прочности сводится к разрушению композиционного материала при заданных сложных напряженных состояниях и сопоставлению предельных значений компонент тензора напряжений с вычисленными по рассматриваемому условию прочности. Результаты сопоставления статистически обрабатываются и устанавливаются показатели, характеризующие достоверность условия прочности.

Поскольку при сложном напряженном состоянии возможно бесконечно большое число соотношений между компонентами тензора напряжений, то постановка экспериментальных исследований по проверке достоверности условий прочности должна планироваться с учетом характерных прочностей и опыты должны, в первую очередь, дать сведения о прочности композиционного материала при соотношениях компонентов тензора напряжений, которые позволяют получить экспериментально участок поверхности прочности вблизи этих характерных точек.

В общем случае объемного напряженного состояния экспериментальное исследование поверхности прочности представляет чрезвычайно трудоемкую задачу. Поэтому обычно экспериментально изучаются частные случаи сложного напряженного состояния, имеющие практическое значение. Например, при трехосном напряженном состоянии существенную информацию о достоверности условия прочности дают опыты при гидростатическом нагружении, при двухосном – при равном сжатии или растяжении, при плоском напряженном состоянии – исследования анизотропии пределов прочности при одноосном

растяжении или сжатии, чистом сдвиге и т.д.

Успешное проведение экспериментальных исследований прочности композиционных материалов при сложном напряженном состоянии зависит от правильной разработки испытательных установок и выбора рациональных форм образцов для испытаний.

Важное значение при оценке достоверности условий прочности имеет учет эксплуатационных факторов, отражающих реальные условия работы материала в конструкции. Из этих факторов наибольший интерес представляют время действия нагрузки и температура. Их учет экспериментальных исследований приводит к значительным трудностям главным образом в связи с необходимостью создания испытательных установок, обеспечивающих возможность поддержания сложного напряженного состояния в течение длительного времени при нормальных и повышенных (или пониженных) температурах.

Единой стандартной методики исследования прочности композиционных материалов при сложном напряженном состоянии пока нет.

В результате экспериментального исследования и сопоставления теоретических и опытных данных о прочности могут быть сделаны выводы о достоверности и надежности того или иного условия прочности и даны практические рекомендации по использованию условий прочности в расчетах реальных элементов конструкций.

Ясно, что оценка достоверности и надежности условия прочности может подтверждать или опровергать условие прочности не вообще, а лишь по отношению к испытываемым композиционным материалам и только для апробированных видов сложного напряженного состояния. Поэтому, чем больше композиционных материалов будет испытано, чем разнообразнее они будут по структуре, по применению исходных компонентов, по технологии изготовления, тем достовернее окажется информация о возможностях использования условий прочности в различных случаях сложного напряженного состояния и применительно к тем или иным материалам.

Если исходить из практики, то наиболее часто в инженерных конструкциях используются регулярно армированные высокопрочными волокнами ортотропные композиционные материалы, работающие в условиях плоского (чаще всего двухосного) напряженного состояния.

При планировании эксперимента по проверке достоверности и применимости условий прочности, в первую очередь, необходимо основываться на выборе материалов, отличающихся между собой по степени анизотропии и асимметрии основных характеристик прочности. К основным характеристикам прочности следует относить не только пределы прочности в направлении площадок симметрии ортотропного композиционного материала, но и в направлении площадок, наклоненных к площадкам симметрии под углом 45° .

Выбор композиционных материалов для экспериментальных исследований при двухосном напряженном состоянии должен основываться на анализе различия между пределами прочности в двух главных направлениях действия нагрузок. Если принять в качестве определяющего различия анизотропию проч-

ности, то для опытов следует выбирать материалы со слабо выраженной анизотропией, то есть с пределами прочности в направлениях осей симметрии, отличающимися не более, чем на 10–20 %, и с резко выраженной анизотропией с пределами прочности, отличающимися не менее чем в пять-десять раз.

Аналогично оценивается при выборе материалов и асимметрия прочности. Наряду с материалами, прочности которых при растяжении и сжатии в одном и том же направлении почти совпадают, необходимо планировать испытание и таких композиционных материалов, у которых пределы прочности в одном направлении на растяжение и на сжатие отличаются в несколько раз.

Выбор материалов с различными соотношениями между основными характеристиками прочности целесообразен также и потому, что в условии прочности, выраженной функциональной зависимостью между компонентами предельных напряжений, характер функции определяют соотношения между пределами прочности, а не их абсолютные значения.

Разнообразие должно быть и в структуре испытываемых материалов, в исходных компонентах композиционных материалов (в первую очередь арматуры), в технологии изготовления. Чем шире диапазон свойств материалов, выбранных для испытаний, тем надежнее оказывается проверка, тем более уверенными будут выводы о достоверности и применимости тех или иных условий прочности.

На этой основе разработаны варианты анкерного стяжного крепления, которые снижают расслоение пород, обеспечивают их объемное сжатие, что, в конечном итоге, предупреждает возникновение сдвиговых деформаций (патенты Украины № 79459, 79546, 80353, 80354, 80760, 80806, 81959, 84638, 88675).

Разработаны способы анкерного крепления массива горных пород, в которых предусмотрено предварительное изменение свойств закрепляемых пород, что позволяет создавать более монолитные и устойчивые конструкции из композиционных материалов (патенты Украины № 65678, 71177, 83427, 86110, 86303, 87561).

Разработаны композиционные и сталеполимерные анкера, позволяющие обеспечить надежное сцепление с породным массивом на всей их длине, что необходимо для «сшивания» пород сложной структуры в самых труднодоступных и опасных зонах (патенты Украины № 65823, 69379, 69492, 70236, 71126, 73203, 77286).

Для диагностики состояния сложно-структурного породного массива и средств крепления с участием авторов разработан геомеханический мониторинг подземных геотехнических систем [8], позволяющий не только их контролировать, но и осуществлять прогноз опасных проявлений горного давления.

Выводы. Таким образом, в результате анализа и обобщения механических теорий прочности и их экспериментальной апробации установлены особенности и возможности их применения для описания прочностных свойств композиционных материалов. На этой основе разработаны средства и способы анкерного крепления массива горных пород, учитывающие как композиционную структуру самого массива, так и предложенных средств крепления.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Aboudi J. *Micromechanics of Composite Materials* / J. Aboudi, S. M. Arnold, B. A. Bednarczyk. – Butterworth-Heinemann, 2012. – 984 p.
2. Autar K. K. *Mechanics of composite materials* / K. K. Autar. – Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 457 p.
3. Harris B. (Ed.) *Fatigue in composites: Science and technology of the fatigue response of fibrereinforced plastics* / B. Harris. – CRC Press, Woodhead Publishing Ltd., 2003. – 742 p.
4. Koliar L. P. *Mechanics of composite structures* / L. P. Koliar. – Cambridge: University Press, 2003. – 480 p.
5. Механика композитных материалов и элементов конструкций / А. Н. Гузь, Л. П. Хорошун, Г. А. Ванін [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1982. – Том 1. Механика материалов. – 368 с.
6. Прикладная механика упруго-наследственных сред: в 3 т. / А. Ф. Булат, В. И. Дырда, Е. Л. Звягильский, А. С. Кобец. – Киев: Наук. думка, 2011. – Т.1. Механика деформирования и разрушения эластомеров. – 367 с.
7. Паньков А. А. *Статистическая механика пьезокомпозитов* / А. А. Паньков. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2009. – 480 с.
8. Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем / А. В. Анциферов, С. І. Скіпочка, А. О. Яланський, Т. А. Паламарчук [та ін.]. – Донецьк: «Ноулідж», 2010. – 253 с.

REFERENCES

1. Aboudi, J., Arnold, S. M. and Bednarczyk, B. A. (2012), *Micromechanics of Composite Materials*, Butterworth-Heinemann, USA.
2. Autar, K. K. (2006), *Mechanics of composite materials*, Taylor & Francis Group, LLC, France.
3. Harris, B. (2003), *Fatigue in composites: Science and technology of the fatigue response of fibrereinforced plastics*, CRC Press, Woodhead Publishing Ltd, USA.
4. Koliar, L. P. (2003), *Mechanics of composite structures*, Cambridge: University Press, G.B.
5. Guz, A. N., Khoroshun, L. P. and Vanin, G. A. (1982), *Mekhanika kompozitnykh materialov i elementov konstruksiy. T.1: Mekhanika materialov* [Mechanics of composite materials and elements of constructions. T. 1: Mechanics of materials], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
6. Bulat, A. F., Dyrda, V. I., Zvyagilskiy, E. L. and Kobets, A. S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. V. 1: Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya elastomerov* [Applied mechanics of the elastic-inherited medium. V.1: Mechanics of deformation and destruction of elastic materials], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
7. Pankov, A. A. (2009), *Statisticheskaya mekhanika pezokompozitov* [Statistical mechanics of piesocomposite], Izdatelstvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Perm, Russia.
8. Antsiferov, A. V., Skipochka, S. I., Yalanckiy, A. A. and Palamarchuk, T. A. (2010), *Geomekhanicheskiy monitoring podzemnykh geotekhnicheskikh system* [Geomechanical monitoring of the underground geotechnical systems], Noulidzh, Donetsk, Ukraine.

Об авторах

Паламарчук Татьяна Андреевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, tp208_2008@ukr.net

Яланский Анатолий Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, tp208_2008@ukr.net

Бобро Николай Трофимович, магистр, ведущий специалист в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, office.igtm@nas.gov.ua

Селезнев Анатолий Михайлович, магистр, ведущий специалист в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, office.igtm@nas.gov.ua

About the authors

Palamarchuk Tatyana Andreevna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, tp208_2008@ukr.net

Yalanckiy Anatoliy Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, tp208_2008@ukr.net

Bobro Nikolay Trofimovich, Master of Science, Principal Specialist in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, office.igtm@nas.gov.ua

Seleznev Anatoliy Mikhaylovich, Master of Science, Principal Specialist in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, office.igtm@nas.gov.ua

Анотація. Мета досліджень – виявлення найефективніших методів різних теорій міцності для опису композиційних матеріалів. В результаті аналізу і узагальнення механічних теорій міцності та їх експериментальної апробації встановлено особливості і можливості їх застосування для опису міцностних властивостей композиційних матеріалів. Показано, що чим ширше діапазон властивостей матеріалів, вибраних для випробувань, тим надійніше виявляється перевірка, тим більше упевненими будуть висновки про достовірність і застосовність тих або інших умов міцності. На цій основі розроблено варіанти анкерного стяжного кріплення, які знижують розшарування порід, забезпечують їх об'ємне стиснення, що, зрештою, попереджає виникнення зсувних деформацій. Розроблено також способи анкерного кріплення масиву гірських порід, в яких передбачена попередня зміна властивостей закріплюваних порід, що дозволяє створювати більш монолітні і стійкі конструкції з композиційних матеріалів.

Ключові слова: композиційні матеріали, теорії міцності, напружено-деформований стан, межа міцності, анкерне кріплення.

Abstract. The purpose of researches is the generalization of the most effective methods of different theories of strength for description of composition materials. As a result of analysis and generalization of mechanical theories of strength and their experimental approbation features and possibilities of their application for description of composition materials strength properties are set. It is shown, than range of properties of the materials chosen for the tests is wider, the more reliable verification turns out, conclusions about authenticity and applicability of those or other strength condition will be the more so sure. On this basis the variants of the anchor swiped support, which lower stratification of rocks, are developed, their compression by volume is provided, that, in the end, is warned by the origin of shearing deformations. The methods of the anchor supporting of rock massif, which foresee the preliminary change of properties of the supporting rocks are developed, that permit to create constructions more monolithic and steady from composition materials.

Keywords: composition materials, theories of strength, stress-deformed state, tensile strength, anchor support.

Стаття поступила в редакцію 4.08.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.И. Скипочкой