

## Метод оценки механических характеристик плетеных шнуров типа сердечник-оплетка из синтетических мультифиламентных нитей

М. П. Земцов, В. И. Скрипченко

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Рассмотрен новый подход к расчетной оценке прочности и деформационной способности шнуров типа сердечник-оплетка, изготовленных из мультифиламентных полиамидных нитей. Предлагаемый метод, известный в механике композиционных материалов как правило смесей, позволяет на основе известных геометрических параметров структурных компонентов шнура определить его механические характеристики с учетом взаимодействия составляющих элементов. Результаты экспериментальных исследований показывают, что взаимодействие отдельных структурных компонентов шнура в процессе растяжения существенно влияет на определяемые при разрушении характеристики прочности и деформационной способности. Относительная, приведенная к суммарной площади поперечного сечения волокон, прочность сердечника с увеличением диаметра шнура от 5 до 18 мм снижается на 10%. Перспективным представляется использование правила смесей для оценки прочности плетеных шнуров, сердечник и оплетка которых изготовлены из разномодульных материалов.*

**Ключевые слова:** правило смесей, полимерные волокна, плетеный шнур, растяжение, прочность, деформационная способность, разрушение.

**Введение.** В настоящее время гибкие силовые элементы – шнуры, канаты, ленты, изготовленные из синтетических (полиамидные, полиэфирные, полипропиленовые, параарамидные) волокон, широко используются во многих отраслях промышленности, в строительстве, на транспорте как элементы такелажа, как обязательный компонент грузоподъемного оборудования для перемещения грузов и снаряжения при выполнении высотно-верхолазных работ и т.п. Уникальные свойства этих изделий, включающие высокую прочность и малые весовые характеристики, обуславливают целесообразность и высокую эффективность их применения с гарантией высокой надежности и безопасности. Как правило, для подтверждения первоначального запаса прочности разрывные характеристики гибких силовых элементов определяют экспериментально, так как расчетная оценка их конструкционной прочности на основе известных механических характеристик комплексной синтетической нити представляет сложную задачу, решение которой весьма затруднительно даже современными численными методами [1]. В настоящей работе рассматривается новый подход, известный в механике композиционных материалов как правило смесей, для расчетной оценки прочности и деформационной способности шнуров типа сердечник-оплетка, изготовленных из мультифиламентных полиамидных нитей, а также изучается влияние структуры шнура на механические характеристики изделия и взаимодействие составляющих его элементов.

Механические свойства полимеров существенно зависят от технологии их производства. Максимальной прочностью и минимальной деформативностью обладают мультифиламентные нити, состоящие из нескольких сотен волокон диаметром 1–3 мкм, полученных методом экструзии. Механические свойства полимерных материалов в зависимости от структуры могут существенно различаться. Прочность полиамидных мультифиламентных нитей превышает 600 МПа, в то время как предел прочности литого полиамида составляет 70 МПа [2] (табл. 1). Высокая прочность и малая деформативность элементарных волокон обусловлены ориентацией молеку-

лярных цепочек в направлении действия прикладываемых нагрузок. Преимущества механических свойств мультифиламентных нитей проявляются при сравнении с таковыми традиционных конструкционных материалов в терминах удельной прочности (значение предела прочности, отнесенное к удельному весу) [3, 4]. Другими словами, величина удельной прочности, или “разрывная длина” [5] численно равна максимальной длине нити, вес которой она способна выдержать без разрушения.

Т а б л и ц а 1

Сравнение механических характеристик различных материалов

Материал	$\sigma_b$ , МПа	$E$ , ГПа	$\delta$ , %	Разрывная длина нити, км
Сталь 45	610	200	16	7,8
Сталь 30ХГСА	1100	210	10	14,1
Сплав ВТ5	770	107	8,5	17,1
Сплав Д16	500	71	7	18,5
Полиамид (литье)	35...70	1,4...2,0	> 100	3,1...6,2
Полиамид (нить ПА6)	645	4,33	19	56,6

**Примечание.**  $\sigma_b$  – предел прочности;  $E$  – модуль упругости;  $\delta$  – деформация при разрушении.

**Образцы и методика испытаний.** Плетеный шнур рассматриваемой конструкции состоит из двух структурных компонентов – сердечника и оплетки (рис. 1). Сердечник выполняет основную – несущую функцию шнура, а оплетка предохраняет сердечник от внешних механических повреждений и ультрафиолетовых лучей. Сердечник, как правило, состоит из нескольких параллельно уложенных стренг (прядей). Шнуры всех диаметров имели в оплетке 16 нитей, однако весовое соотношение волокон в оплетке и сердечнике было различным (табл. 2). Для оценки вклада отдельных структурных компонентов в суммарную прочность плетеных шнуров, а также учета влияния их взаимодействия на прочность испытаниям подвергали оплетку, сердечник и отдельные стренги шнуров.

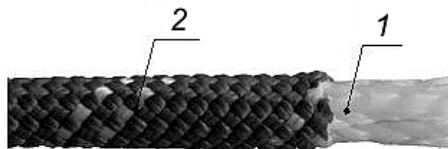


Рис. 1. Общий вид шнура “кабельной” структуры: 1 – сердечник; 2 – оплетка.

Механические испытания шнуров и составляющих их структурных компонентов на разрыв проводили с использованием улиточных захватов (рис. 2), позволяющих получить объективные данные о разрывных нагрузках исследуемых объектов. Как правило, разрыв образца происходит в рабочей зоне либо на сходе шнура с улитки из-за того, что усилие в испытываемом образце убывает по закону Эйлера по мере увеличения угла охвата шнуром цилиндрической поверхности улитки:  $T_2 = T_1 e^{\alpha f}$ , где  $f$  – коэффициент трения;  $\alpha$  – угол охвата улитки (рад);  $T_1$  – усилие удержания образца в улитке;  $T_2$  – усилие в рабочей части образца [6].

Т а б л и ц а 2

## Характеристики исследованных шнуров

Диаметр шнура, мм	Обозначение шнура	Компонент	Плотность шнура, текс	Суммарная площадь сечения нитей, мм <sup>2</sup>
3	ПА3	Шнур	5690	5,00
4	ПА4	»	9550	8,38
5	ПА5	Шнур	13637	16,88
		Оплетка	17142	15,03
		Сердечник	2110	1,85
6	ПА6	Шнур	22403	19,57
		Оплетка	20187	17,70
		Сердечник	2128	1,870
8	ПА8	Шнур	38390	33,54
		Оплетка	31933	28,01
		Сердечник	6309	5,53
10	ПА10	Шнур	65137	34,00
		Оплетка	17142	15,00
		Сердечник	21689	19,00
14	ПА14	Шнур	108276	94,39
		Оплетка	78839	69,15
		Сердечник	28770	25,24
16	ПА16	Шнур	155943	135,95
		Оплетка	126318	110,81
		Сердечник	28665	25,14
18	ПА18	Шнур	191727	167,41
		Оплетка	161520	141,69
		Сердечник	29327	25,72

**Примечание.** Шнуры диаметром 3 и 4 мм не имели сердечника.

Для уменьшения неравномерности распределения напряжений в образце шнура в точке его схода с улитки контролировали отношение диаметра барабана улитки к диаметру шнура (эта величина должна быть не менее 10 [7]). В процессе нагружения образцов записывали диаграммы изменения нагрузки по времени на ПК. Погрешность ее измерения не превышает 1%. Удлинение образцов в процессе нагружения измеряли оптическим методом с помощью фото- и видеосъемки по нанесенным маркером меткам на шнуре. Длину рабочей части образцов определяли по точкам схода шнура с улиточных захватов (составляет не менее  $200 \pm 5$  мм). Скорость перемещения подвижной траверсы испытательной установки равна 1 мм/с. По окончании испытания диаграмма нагрузка–время и видеозапись синхронизировались по моменту разрушения образца, и по полученным данным строилась диаграмма деформирования.

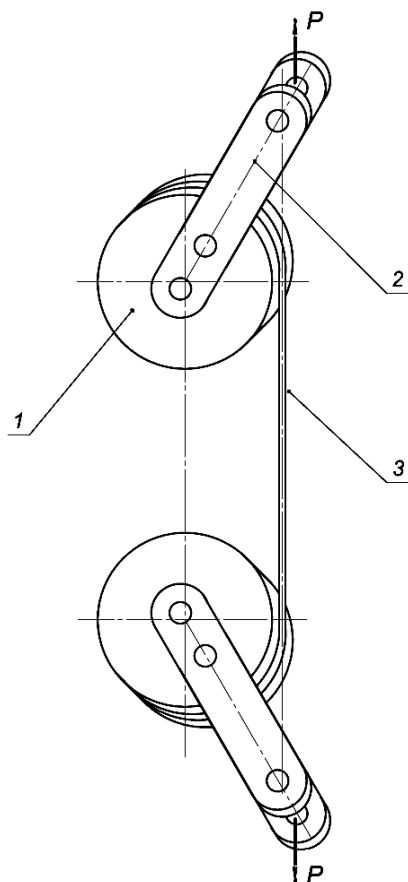


Рис. 2. Приспособление для испытания образцов шнура: 1 – захват типа “улитка”; 2 – балансирующий рычаг; 3 – шнур.

Сравнение прочности шнуров разных диаметров проводили на основе усредненных разрушающих напряжений, определяемых по значениям разрывных нагрузок шнуров и суммарной площади поперечного сечения сердечника и оплетки, по формуле [4]  $\sigma = P\rho/T$ , где  $P$  – среднее значение разрывной нагрузки;  $\rho$  – плотность полиамида;  $T$  – линейная плотность волокон, текс (г/км).

**Обсуждение результатов.** Ввиду особенностей структуры нити сердечника и оплетки в процессе нагружения деформируются неравномерно. Оплетка представляет собой цилиндрическую поверхность, образованную переплетенными по винтовой линии нитями, которые расположены под одинаковым углом (примерно  $45^\circ$ ) к продольной оси шнура. В процессе растяжения шнура величина угла уменьшается, при этом происходит сужение поперечного сечения, обуславливающее значительное обжатие волокон сердечника в радиальном направлении. С ростом нагрузки радиальные напряжения могут достигать значительной величины, что подтверждают испытания на растяжение отдельно взятой оплетки шнура с цилиндрическими вставками различного диаметра из твердой породы древесины. Остаточные деформации древесины при обжатии вставок в радиальном направлении достигают 15% (предел прочности дуба при сжатии поперек волокон составляет 15 МПа). Поскольку жесткость оплетки существенно меньше жесткости сердечника, напряжения в его волокнах возрастают более интенсивно и достигают предельных значений раньше, чем в волокнах оплетки.

Рассмотрим процесс разрушения плетеного шнура с сердечником при растяжении исходя из полученных данных о его разрушении. Из-за неравномерной укладки стренг сердечника происходит их разрушение с достижением предельного напряжения. В месте их разрыва наблюдается локальное сужение оплетки, угол наклона нити оплетки к оси образца уменьшается. При этом из-за нарушения структуры шнура перераспределяются напряжения в нитях оплетки и сердечника. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разрушению в следующем “слабом” звене сердечника шнура и последующему “залечиванию” места разрушения. На диаграмме растяжения такие процессы проявляются в виде небольших срывов нагрузки (рис. 3). После каждого такого локального разрушения и срыва нагрузка продолжает монотонно увеличиваться. Вследствие значительных обжимающих усилий оплетки при ее растяжении с сердечником трение между структурными компонентами шнура достигает значений, достаточных для передачи усилий в месте разрушения. Этот предполагаемый многостадийный процесс разрушения подтверждается множественным разрушением стренг в разрушенных шнурах. Среднее значение предельной деформации отдельно испытанных стренг при разрушении достигает 18%, а шнуров варьируется в диапазоне 36...45%. По-видимому, такое расхождение в предельных деформациях шнуров разных диаметров обусловлено различной степенью заполнения стренгами внутреннего пространства оплетки шнуров. Разрушение стренг подтверждает обоснованность высказанного предположения о перераспределении растягивающего усилия между стренгами и оплеткой за счет сил трения, возникающих в местах разрыва стренг.

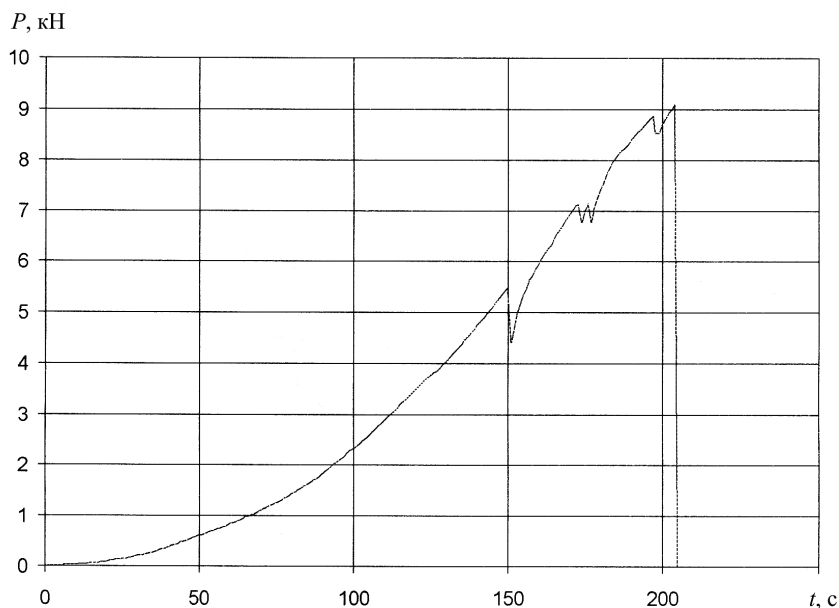


Рис. 3. Характерная диаграмма нагружения шнура.

Механические характеристики шнуров зависят от многих факторов: разброса характеристик материала нитей; геометрических соотношений сердечника и оплетки; плотности плетения оплетки; площади сердечника; равномерности укладки стренг в оплетке; технологических особенностей производства и др. Поэтому особое внимание при подборе образцов уделяется идентичности структуры и технологии изготовления шнуров.

Проведенные испытания, собственно, сердечника шнура позволяют интегрально оценить влияние структурных и геометрических параметров сердечника на величину разрывной нагрузки исследуемых объектов (рис. 4). Площадь сечения сердечника (табл. 2) соответствует суммарному поперечному сечению волокон, определяемому по формуле  $S = T/\rho$ . С увеличением площади поперечного сечения шнура прочность сердечника в исследованном диапазоне снижается на 10%. Это обусловлено тем, что с ростом диаметра сердечника степень неоднородности его структуры, например неравномерность натяжения волокон, увеличивается.

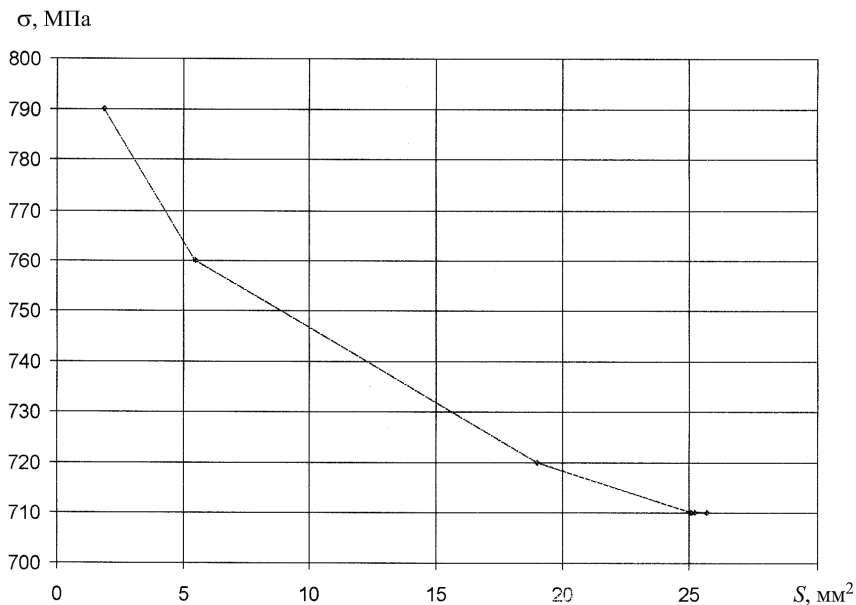


Рис. 4. Зависимость прочности сердечника от площади его поперечного сечения.

Полученная корреляция соотношения площади поперечного сечения оплетки и сердечника с механическими характеристиками шнура свидетельствует о возможности оценки свойств плетеного изделия рассматриваемой структуры на основе правила смесей. Влияние таких начальных параметров шнура, как степень заполнения внутреннего объема оплетки сердечником, геометрия начальной винтовой линии нити оплетки, приводит к тому, что различие между расчетными и экспериментальными данными не превышает 10%.

Зависимость эффективного модуля упругости от объемного содержания оплетки и сердечника представлена на рис. 5.

Предлагаемая методика позволяет оценивать жесткость изделия с относительно невысокой точностью. Коэффициент корреляции прямой  $l$  с экспериментальными точками составляет 0,9 (рис. 5). Полученную зависимость можно описать с помощью правила смесей:

$$E_{ш} = E_c V_c + E_o(1 - V_c), \quad (1)$$

где  $E_{ш}$ ,  $E_c$ ,  $E_o$  – эффективный модуль упругости шнура, сердечника и оплетки соответственно;  $V_c$  – объемное содержание сердечника.

Полученные данные, характеризующие прочность образцов с различным объемным содержанием сердечника, можно сгруппировать таким образом: точки в правой части рис. 6 соответствуют образцам, несущая способность которых определяется

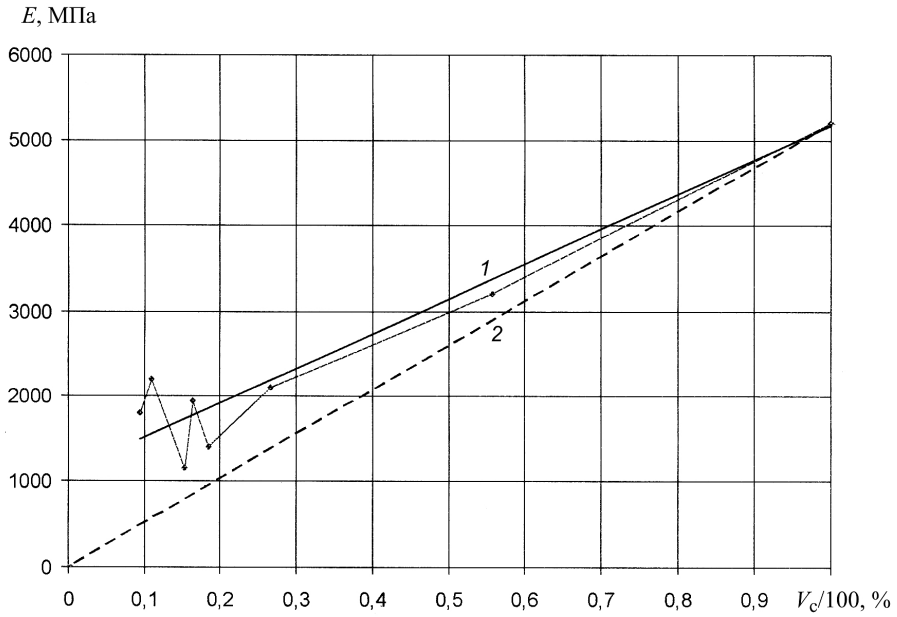


Рис. 5. Зависимость эффективного модуля упругости от объемного содержания сердечника: 1 – изменение жесткости шнура; 2 – вклад сердечника; область между линиями 1 и 2 – вклад оплетки.

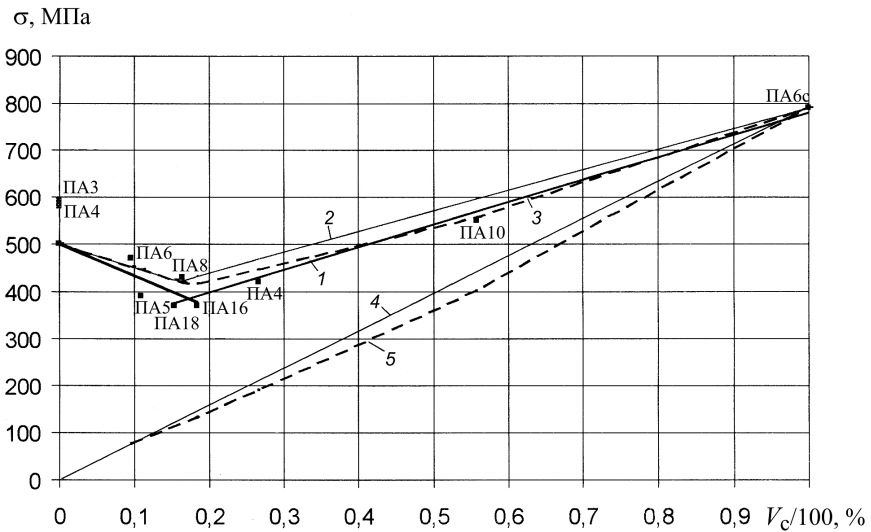


Рис. 6. Зависимость прочности шнура от объемного содержания сердечника: 1 – кривая аппроксимации экспериментальных точек; 2 – расчетная прочность шнура; 3 – расчетная прочность шнура с учетом снижения прочности сердечника при увеличении его диаметра; 4 – напряжение, воспринимаемое сердечником при изменении его объемного содержания; 5 – напряжение, воспринимаемое сердечником при изменении его объемного содержания с учетом уменьшения прочности с увеличением диаметра.

прочностью сердечника, точки в левой части – прочности образцов, определяемых прочностью оплеток. Для этих образцов несущая способность сердечника исчерпывается гораздо раньше оплетки.

Несмотря на то что были проведены испытания образцов без сердечника (ПА3, ПА4), использовать полученные результаты для оценки прочности шнура не представляется корректным. Это обусловлено тем, что нагружение оплетки без сердечника приводит к более значительному ее деформированию. Угол ориентации нитей к продольной оси в этом случае уменьшается, разрушающая нагрузка существенно увеличивается. Например, разрушающие нагрузки шнуров ПА3 и ПА4 выше напряжений в оплетке, полученных путем аппроксимации образцов, несущая способность которых определяется прочностью оплетки, на 17%. С учетом вышеизложенного разрушающие напряжения оплетки при нулевом объемном содержании сердечника определяли путем аппроксимации разности разрушающих напряжений шнура и сердечника.

Аппроксимация прямыми линиями расположенных на рис. 6 точек, характеризующих прочность шнуров в зависимости от объемного соотношения компонентов, дает возможность использовать правило смесей для оценки их прочности:

$$\sigma_{\text{ш}} = \sigma_c V_c + \sigma_o (1 - V_c), \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{ш}}$  – среднее разрушающее напряжение шнура;  $\sigma_c$ ,  $\sigma_o$  – разрушающее напряжение сердечника и оплетки. В левой части зависимости 2 (рис. 6) формула (2) принимает вид

$$\sigma_{\text{ш}} = \sigma_o (1 - V_c).$$

Расчет разрушающих напряжений шнура с учетом зависимости прочности сердечника от диаметра позволяет получить кривую 3 (рис. 6), лучше коррелирующую с экспериментальными данными.

## Выводы

1. Исследование влияния соотношений площадей сечения оплетки и сердечника на механические характеристики плетеных полиамидных шнуров типа сердечник-оплетка показало, что эти характеристики можно оценить с помощью правила смесей.

2. Взаимодействие отдельных структурных компонентов шнура в процессе растяжения оказывает существенное влияние на определяемые характеристики прочности и деформационной способности.

3. Относительная (приведенная к суммарной площади поперечного сечения волокон) прочность сердечника с увеличением диаметра шнура в интервале 5...18 мм уменьшается на 10%.

4. Точность предлагаемой экспериментальной методики можно повысить, учитывая влияние обжимающих усилий оплетки на прочность сердечника. Исследование влияния объемного напряженного состояния волокон сердечника на их прочность и предельную деформацию представляет самостоятельную научную задачу.

5. Перспективным представляется использование правила смесей для оценки прочности плетеных шнуров, сердечник и оплетка которых изготовлены из разно-модульных материалов.

6. Использование правила смесей позволяет выполнять экстраполяционную оценку прочности плетеных шнуров большого диаметра, определение разрывных нагрузок которых по тем или иным причинам затруднительно.

7. Процесс локальных множественных разрывов сердечника при нагружении и его влияние на общую деформацию шнура при разрушении требует детального исследования.



## Резюме

Розглянуто новий підхід до розрахункової оцінки міцності і деформаційної здатності шнурів типу осердя-обплітка, виготовлених із мультифіламентних поліамідних ниток. Метод, що пропонується, відомий у механіці композиційних матеріалів як правило сумішей і дозволяє на основі відомих геометричних параметрів структурних компонентів шнура визначити його механічні характеристики з урахуванням взаємодії складових його елементів. Результати експериментальних досліджень показують, що взаємодія окремих структурних компонентів шнура в процесі розтягу суттєво впливає на характеристики міцності і деформативності, що визначаються при руйнуванні. Відносна (приведена до сумарної площі поперечного перерізу волокон) міцність осердя зі збільшенням діаметра шнура від 5 до 18 мм знижується на 10%. Перспективним є використання правила сумішей для оцінки міцності плетених шнурів, осердя і обплітка яких виготовлено з різномодульних матеріалів.

1. *Beltran J. F. and Vargas D.* Effect of broken rope component distribution throughout rope cross-section on polyester rope response: numerical approach // *Int. J. Mech. Sci.* – 2012. – **64**. – P. 32–46.
2. *ГОСТ 10589-87.* Полиамид 610 литьевой. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 12 с.
3. *Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г.* Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1965. – 32 с.
4. *ГОСТ 28007-88.* Нить и жгут СВМ высокомодульные технические. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 10 с.
5. *Белицын М. Н.* Синтетические нити. – М.: Легкая индустрия, 1970. – 192 с.
6. *Перельман Я. И.* Занимательная физика. Кн. 2. – М.: Наука, 1986. – 35 с.
7. *ГОСТ 25552-82.* Изделия крученые и плетеные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – 27 с.

Поступила 29. 09. 2014