

## Трение высокопрочных арамидных нитей и методика его изучения

© С.В. Котомин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук,  
Москва, 119991, Россия

*Предложена методика определения коэффициента трения арамидных нитей в режиме трения «нить по нити», что важно при разработке тканых волокнистых структур, используемых в изделиях баллистической защиты. Схема испытания представляет собой нить, движущуюся через неподвижную петлю, что позволяет рассчитать коэффициент трения по формуле Эйлера при испытании на традиционных машинах растяжения без дополнительных приспособлений. Исследовано трение различных типов нитей и жгутов в сухом и влажном состоянии. Показан значительный рост коэффициента трения при увлажнении нитей. Арамидные нити с кристаллической структурой (кевлар, армалон) имеют более высокий коэффициент трения по сравнению с волокнами, имеющими аморфную структуру (русар). Представленный материал полезен специалистам, занимающимся вопросами испытания арамидных нитей и создания баллистической защиты на их основе.*

**Ключевые слова:** трение, арамидные волокна, баллистическая защита

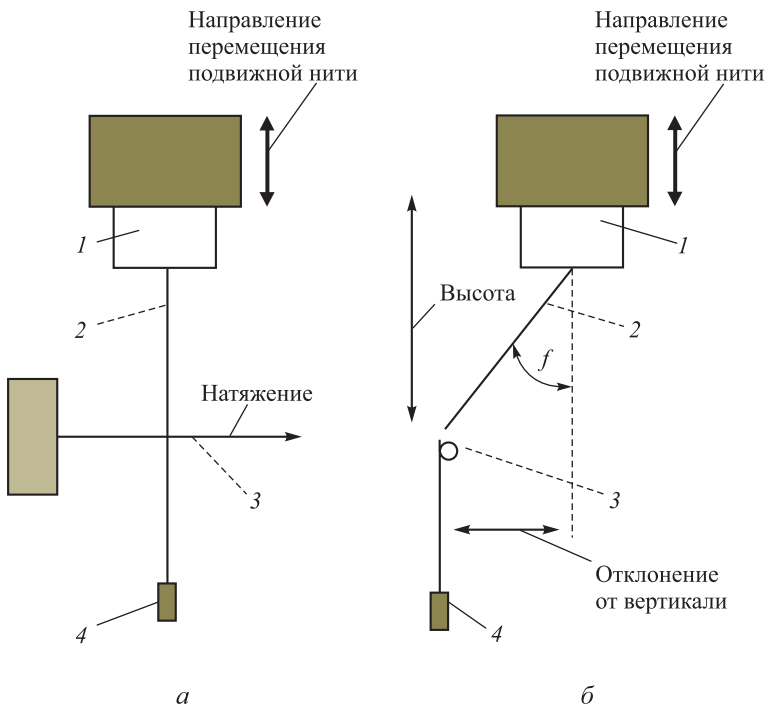
**Введение.** Трение играет важную роль при переработке текстильных нитей в тканые и композитные материалы, а также при эксплуатации изделий на их основе. Особое внимание следует уделять трению высокопрочных арамидных нитей в материалах баллистического применения, например бронезилетах, в которых энергия удара в значительной мере поглощается при трении нитей между собой. В подобных материалах необходимо оптимальное значение коэффициента трения, при котором можно достичь максимального поглощения энергии удара при фрикционном взаимодействии деформируемых нитей и их разрушении. В случае высокой силы трения нити будут разрушаться раньше, чем произойдет рассеяние энергии вследствие их трения, а при недостаточном трении нити будут скользить в структуре ткани и раздвигаться, что также может снизить эффективность поглощения энергии [1–4].

Цель настоящей работы — разработка методики определения коэффициента трения и исследование трения арамидных нитей различного типа.

**Методика испытания.** Исследованию трения нитей посвящено значительное число работ за рубежом и в России [3, 4]. Наиболее распространенным методом изучения трения нитей в ткани является

определение усилия вытягивания отдельной комплексной нити из ткани на разрывной машине. Таким методом, однако, нельзя определить собственно коэффициент трения нити, поскольку сила вытягивания нитей зависит от структуры ткани и изменяется в ходе испытания вследствие уменьшения площади трения нити при ее вытягивании.

Существующие до настоящего времени экспериментальные методы определения коэффициента трения «нити по нити» сложны: требуется скручивание непрерывной нити для испытания на специальном оборудовании, например, в соответствии с требованиями ASTM D 3412 [5, 6]. Схема относительно простого метода «подвешенной нити» представлена на рис. 1. Измеряется сила трения двух перекрещенных нитей (горизонтально и вертикально расположенных друг относительно друга), при этом для расчета коэффициента трения необходимо учитывать силу нормального давления в точке касания по углу отклонения  $\varphi$  от вертикали нити, к которой подвешен груз.



**Рис. 1.** Схема испытания на трение «подвешенной нити»:

*а* — вид спереди; *б* — вид сбоку; 1 — силоизмеритель; 2 — подвешенная нить; 3 — горизонтальная нить; 4 — груз

По описанному выше методу в работе [1] определяли коэффициент трения  $\mu$  для нитей кевлар-49, который, в зависимости от нормальной нагрузки, составляет 0,22–0,36. Недостатком данного метода

является необходимость закрепления под натяжением горизонтальной нити и дополнительного расчета нормальной силы в точке касания по геометрическим параметрам расположения нитей, которые не являются стабильными вследствие сложности сохранения горизонтального положения нити под натяжением.

В настоящей работе предлагается более простая методика, основанная на прямом определении коэффициента трения при трении нити в петле по формуле Эйлера для трения нити по цилиндрической поверхности [6]. Расчет коэффициента трения нити  $\mu$  проводится по значению силы ее натяжения до зоны трения  $F_1$  и после  $F_2$  с учетом угла охвата цилиндра  $\theta$ :

$$\mu = \ln(F_2 / F_1) / \theta. \quad (1)$$

В нашем случае роль тела, по которому происходит трение, играет та же нить, как показано на рис. 2.

При движении зажима в одном направлении векторы веса груза и силы трения складываются, а при движении в противоположном направлении — вычитаются. Усилие  $F$ , воспринимаемое силоизмерителем, при движении зажима испытательной машины вверх и вниз связано с весом груза  $P$  и силой трения  $F_{тр}$  следующим образом:

$$F = 2P \pm F_{тр}. \quad (2)$$

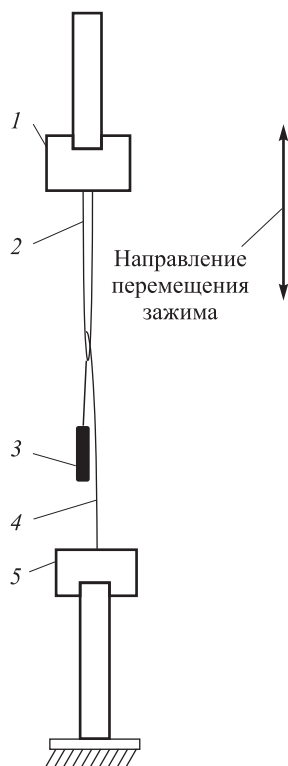
Вклад силы трения и, соответственно, ее знак определяется направлением движения. Угол охвата нити с нитью в зоне трения принимали за  $\pi$ . При движении груза вверх расчетная формула (1) с учетом равенства (2) принимает вид

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{F - P}{P}\right), \quad (3)$$

а при движении вниз —

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{P}{F - P}\right). \quad (4)$$

Один отрезок комплексной нити длиной 10...15 см закрепляли в подвижном зажиме разрывной машины в виде петли, через которую пропускали второй отрезок нити такой же длины, закрепленный одним концом в не-



**Рис. 2.** Схема испытания: 1 — подвижный зажим; 2 — верхняя петля; 3 — груз; 4 — нижняя петля; 5 — неподвижный зажим

подвижном зажиме, а к подвижному прикрепляли груз (см. рис. 2). Скорость перемещения зажима на разрывной машине «Инстрон-1122» («Instron-1122») при испытании составляла 10 мм/мин. Масса груза, подвешенного к нити, составляла 100 г. Сила нормального давления на нить в месте контакта, соответственно, достигала 2 Н, но в уравнение (3) для расчета силы трения этот параметр не входит.

**Объекты исследования.** При изучении трения арамидных нитей и жгутов русар, кевлар, армалон и херакрон без замасливателя, с различной линейной плотностью выявлено следующее. Имеющиеся в литературе данные о трении нитей русар свидетельствуют о существенном влиянии замасливателя на коэффициент трения, который изменяется в зависимости от типа замасливателя в пределах 0,25...0,35 [7].

По химической структуре волокно русар — сополимер полиамидбензимидазолтерефталамида с поли-*n*-фенилентерефталамидом производства АО «Каменскволокно» (г. Каменск-Шахтинский, Россия), кевлар-29 — волокно на основе поли-*n*-фенилентерефталамида (ПФТА) производства DuPont (США), его аналоги — волокно херакрон производства KOLON Industries (Южная Корея) и Армалон производства ЗАО «Тема-М» (г. Мытищи, Россия). Указанные виды волокон используют в производстве бронежилетов.

Для сравнения также исследовали нити арселон (термостойкое волокно из полифениленоксидадианола производства ОАО «СветлогорскХимволокно», Белоруссия) и полиакрилонитрильный (ПАН) жгут производства АООТ «НИТРОН» (Саратов, Россия). Волокна изучали как в «сухом» виде, с равновесной влажностью, соответствующей влажности окружающей среды, так и после увлажнения при кратковременном погружении в воду (с последующим удалением избытка влаги фильтровальной бумагой).

**Обсуждение результатов.** Арамидные нити кевлар, херакрон и армалон имеют близкие значения коэффициента трения  $\mu$ , превышающие в 1,5 раза его значения для нити русар (таблица).

**Коэффициенты трения различных нитей\***

Тип нити	Линейная плотность текстильных нитей	Сухая нить	Влажная нить
ПАН	190	0,38	0,53
Кевлар	160	0,41	0,53
Русар	17	0,25	—
	60	0,28	0,31
Арселон	100	0,33	0,39
Арамалон	8	0,34	—
Херакрон	167	0,44	—
Кевлар/Русар	160/60	0,49	—

\*Дисперсия 10...15 %

Возможным объяснением этого различия является высокая кристалличность волокон из ПФТА, в отличие от которых для волокон русар характерна аморфная структура волокнообразующего полимера [8]. Хотя при взаимодействии с матрицей в композитах аморфная структура волокон способствует диффузии связующего и, как следствие, повышает адгезию. При «сухом» трении у кристаллической поверхности арамидных волокон коэффициент трения выше. Рассматриваемый метод позволяет измерить коэффициент трения пары различных нитей, и полученные значения для пары русар — кевлар свидетельствуют о высоком трении этих волокон между собой (в пределах погрешности измерений). Очевидно, что различной комбинацией нитей в гибридных тканях при необходимости можно регулировать уровень фрикционного взаимодействия нитей.

Из полученных данных также видно, что трение нитей значительно (почти в 1,5 раза) возрастает после увлажнения. Это объясняется повышением когезионного взаимодействия нитей по поверхности. Такое явление отмечалось раньше при оценке силы трения в результате вытягивания нити из влажной ткани [9]. Существенно влияние толщины нити при испытании, что, возможно, связано с влиянием удельного давления в зоне контакта, снижающегося для нитей с большей линейной плотностью при постоянном весе груза. Формула Эйлера справедлива для идеально гибкой нити, а арамидные нити отличаются высокой жесткостью, поэтому предлагаемый метод наиболее целесообразно использовать для изучения трения однотипных нитей близкой линейной плотности, например для оценки влияния аппретирования и поверхностной обработки.

**Выводы.** Предложен метод определения коэффициента трения нитей в петле с использованием стандартной машины для проведения испытаний на растяжение. Исследование показало более высокий коэффициент трения у арамидных нитей с кристаллической структурой по сравнению с нитями аморфной структуры волокнообразующего полимера. При увлажнении нитей коэффициент трения повышается.

Автор выражает благодарность Т.Н. Филипповой (ИНХС РАН) за участие в испытаниях, а также П.В. Михееву (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и А.Н. Малышеву (ЗАО «Тема-М») за предоставленные образцы волокон.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Briscoe B.J., Motamedi F. The ballistic impact characteristics of aramid fibres: The influence of interface friction. *Wear* 158, 1992, pp. 229–247.
- [2] Kirkwood K.M., Kirkwood J.E., Lee Y.S., Egres R.G.Jr., Wetzel E.D. Wagner Yarn Pull-Out as a Mechanism for Dissipation of Ballistic Impact Energy in

- Kevlar® KM-2 Fabric, Part I: Quasistatic Characterization of Yarn Pull-Out N.J. *Textile Research Journal*, 2004, no. 74 (10), pp. 920–928.
- [3] Баженов С.Л. О роли трения в диссипации энергии при поперечном баллистическом ударе по ткани. *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2006, т. 48, № 10, с. 1916–1920.
- [4] Баженов С.Л., Гончарук Г.П. Исследование трения нитей в арамидных тканях. *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2012, т. 54, № 10, с. 1532–1538.
- [5] Gupta B.S., Ajayi J.O., Kutsenko M. Experimental methods for analyzing friction in textiles. Ch. 5. In: *Friction in textile materials*. B.S. Gupta, ed. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2008, pp. 174–218.
- [6] *Lenzing instruments*. URL: <http://www.lenzing-instruments.com/en/products/filament.testing/friction/m-meter> (дата обращения 07.04.2017).
- [7] Михайлова М.П., Ткачева Л.В., Слугин И.В., Каширин А.И., Склярова Г.Б. Отечественные замасливатели для комплексной арамидной нити. *Рабочая одежда и средства индивидуальной защиты*, 2009, № 5, с. 20–22.
- [8] Котомин С.В., Милькова Л.П., Токарев А.В. Структурные изменения в жесткоцепных полиамидбензимидазоламидах в процессе формирования предельно-армированных пластиков. *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 1997, т. 39, № 4, с. 657–662.
- [9] Баженов С.Л., Гончарук Г.П. Влияние воды на силу трения нитей в арамидных тканях. *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2014, т. 56, № 2, с. 185–197.

Статья поступила в редакцию 07.04.2017

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Котомин С.В. Трение высокопрочных арамидных нитей и методика его изучения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 8.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-8-1653>

**Котомин Сергей Владимирович** — д-р хим. наук, профессор кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ведущий научный сотрудник Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН. Автор 120 научных работ в области физической химии и переработки полимеров и композитов. e-mail [svk@ips.ac.ru](mailto:svk@ips.ac.ru)

## High-strength aramid fibers friction and methodology for its study

© S.V. Kotomin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia  
A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS,  
Moscow, 119991, Russia

*The article suggests the methodology for evaluating the aramid fibers friction coefficient in the “thread-to-thread” friction regime. This is essential for manufacturing the fabric fibrous structures used in the ballistic protection items of equipment. The test pattern represents a thread moving through the stationary loop that allows calculating the friction coefficient according to the Euler formula when testing on the conventional stretching apparatus without any appurtenances. We have examined the friction of various threads and loose ropes in dry and wet states and demonstrated a significant increase in the friction coefficient when moisturizing the threads. The aramid fibers with the crystalline structure (Kevlar, Armalon) have a higher friction coefficient compared to the fibers which have an amorphous structure (Rusar). The introduced material will be useful for the specialists who address the issues of testing the aramid fibers and producing the ballistic protection items which have aramid fibers in their composition.*

**Keywords:** friction, aramid fibers, ballistic protection

### REFERENCES

- [1] Briscoe B.J., Motamedi F. The ballistic impact characteristics of aramid fibres: the influence of interface friction. *Wear*, 1998, 158, pp. 229–247.
- [2] Kirkwood K.M., Kirkwood J.E., Lee Y.S., Egres R.G. Jr., Wetzel E.D. Wagner Yarn Pull-Out as a Mechanism for Dissipation of Ballistic Impact Energy in Kevlar® KM-2 Fabric, Part I: Quasistatic Characterization of Yarn Pull-Out N.J. *Textile Research Journal*, 2004, no. 74 (10), pp. 920–928.
- [3] Bazhenov S.L. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser. A — Polymer Science. Series A*, 2006, vol. 48, no. 10, pp. 1916–1920.
- [4] Bazhenov S.L., Goncharuk G.P. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser. A — Polymer Science. Series A*, 2012, vol. 54, no. 10, pp. 1532–1538.
- [5] Gupta B.S., Ajayi J.O., Kutsenko M. *Friction in textile materials*. Cambridge, Woodhead Publ., 2008, pp. 174–218.
- [6] *Lenzing instruments*. Available at: <http://www.lenzing-instruments.com/en/products/filament.testing/friction/m-meter> (accessed April 7, 2017).
- [7] Mikhailova M.P., Tkacheva L.V., Slugin I.V., Kashirin A.I., Sklyarova G.B. *Rabochaya odezhda i sredstva individualnoy zashchity — Work clothes and individual protection means*, 2009, no. 5, pp. 20–22.
- [8] Kotomin S.V., Milkova L.P., Tokarev A.V. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser. A — Polymer Science. Series A*, 1997, vol. 39, no. 4, pp. 657–662.
- [9] Bazhenov S.L., Goncharuk G.P. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser. A — Polymer Science. Series A*, 2014, vol. 56, no. 2, pp. 185–197.

**Kotomin S.V.** graduated from Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia in 1974. Dr. Sc. (Chem.), Professor of the Chemistry Department, Bauman Moscow State Technical University, Leading Research Scientist of A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS. Author of 120 scientific works in the field of physical chemistry and polymers and composites processing. e-mail: [svk@ips.ac.ru](mailto:svk@ips.ac.ru)