

Исследования свойств упрочнения волокна паутины *Araneus* *Diadematus*

Александрова А.В.

XI Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся. Биология

7 класс, ГБОУ № 98, г. Санкт-Петербург

Научный руководитель: Ермолаева Е.В., ГБОУ № 98, г. Санкт-Петербург

Введение

Одними из актуальных задач современной биоинженерии являются исследования возможностей создания биологически активной ткани и противоожоговых повязок из волокон паутины. Это связано с кровоостанавливающим действием паутины, которая также ускоряет заживление поврежденной кожи [1,3].

Тем не менее, прочность волокон является одной из важнейших характеристик при создании и использовании этих новых материалов [4,9]. От прочности зависит область их применения.

Актуальность и практическая значимость работы:

- Работа направлена на решение задач упрочнения волокон паутины, для изготовления перевязочного материала, создания различных медицинских и биоинженерных конструкций.
- Исследуя новые способы упрочнения волокон паутины, можно снизить обрывность паутинных нитей и увеличить прочность изделий.
- Изучение свойств упрочнения природного волокна паутины дает новые знания о роли паутины в жизни пауков.

Цель научно-исследовательской работы – исследовать свойства упрочнения волокна паутины пауков *A. diadematus*.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Определить и проанализировать состояние вопроса по литературным и интернет-источникам.
- Разработать способ измерений, сконструировать и собрать испытательную установку, позволяющую определять деформацию волокон.
- Исследовать прочностные характеристики паутины при статическом и циклическом нагружении, возможность упрочнения волокна при длительной статической нагрузке.

Объект исследования – каркасная нить паутины – самая прочная нить в паутине.

Предмет исследования – упрочнение волокна в процессе деформации под действием силы.

На рисунке 1 показана типичная динамометрическая кривая напряжений при растяжении волокна паутины паука *Nephila madagascariensis*, взятая из [9].

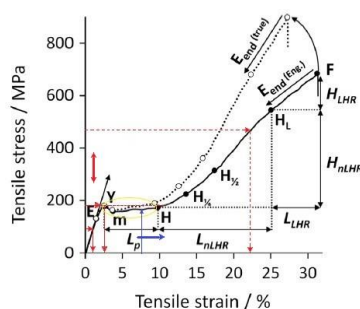


Рисунок 1 - Динамометрическая характеристика волокна паутины паука *Nephila madagascariensis*, подвергнутого деформации при скорости 7% в мин [9]

На этой диаграмме деформации горизонтальная ось – относительные деформации, а вертикальная ось – механические напряжения. Данная кривая имеет пик Y и далее «плато» m в области пластических деформаций. Область m также называют областью упрочнения полимера [2, с.166, с.188].

В процессе испытаний мы увеличивали силу и при этом контролировали деформацию.

Оказалось, что при задании растягивающей нагрузки, пройти область упрочнения без изменения условий нагрузки – сложно. Таким образом, важно

исследовать, как нужно изменить режим нагрузки, чтобы можно было пройти область упрочнения без разрушения волокна. Технологию такого упрочнения с помощью дозированной нагрузки можно будет использовать на практике.

Волокна, из которых пауки строят паутину, не подвергаются в процессе выделения существенным деформациям, и, следовательно, после отверждения имеют прочность, ограниченную областью до точки Y . В то же время, в природных условиях паутина испытывает воздействие внешних факторов, например, ветра, движения веток, влаги, многократно деформируется и при этом не разрушается. Возможно, это связано со свойствами упрочнения волокон, которые еще до конца не исследованы.

Материалы и оборудование

Каркасная нить паутины

Каркасная нить – самая прочная нить в паутине. Поэтому именно её рассматривают как основной материал для изготовления повязок.

Диаметр волокон паутины паука *Araneus diadematus* (в дальнейшем *A.d.*), может быть от 4 до 6 мкм, а диапазон статических сил, вызывающих обрыв волокна, составляет 5-40 мН [6].

Паутинные нити, использованные в нашем исследовании, были собраны летом 2020 г. в Приозерском районе Ленинградской области в период проведения данной работы. Для реализации испытаний отобраны каркасные нити пауков *A.d.* – паука кругопряда, снятые с новых паутин в естественных природных условиях.

Все каркасные нити, собранные с разных паутин, состоят из параллельно протянутых, плотно прижатых друг к другу волокон. Число волокон нити может достигать двух десятков. Диаметр каркасной нити лежит в диапазоне от 15 до 25 мкм. На рисунке 2а показана каркасная нить диаметром 24 мкм, а на рисунке 2б показана эта же нить после обрыва. Видны образующие нить волокна.

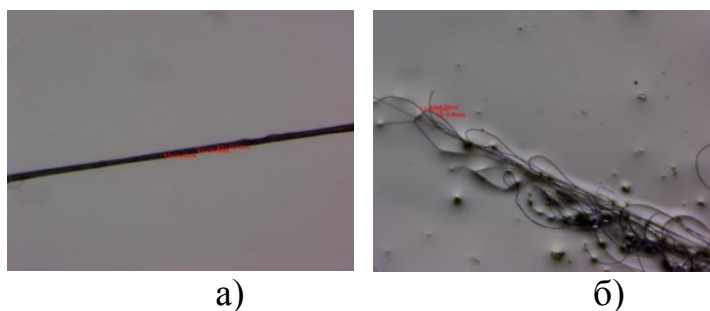


Рисунок 2 - Каркасная нить под нагрузкой до разрыва (а) и после разрыва (б). Видны волокна, из которых состоит нить. Увеличение микроскопа 40х

Оборудование и методы исследования

Для проведения исследований сконструирована и собрана экспериментальная установка. Схема этой установки показана на рисунке 3.

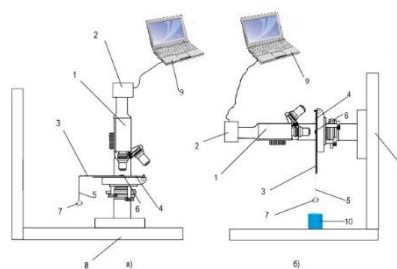


Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки:

а – подготовка к опыту, б – проведение опыта

1 – микроскоп, 2- цифровая камера, 3 – предметное стекло, 4 – нить паутины, 5 – нить тяги, 6 - пластинка, 7 – контейнер с грузом, 8 – станина, 9 – компьютер, 10 – приемный контейнер

В центре экспериментальной установки расположен микроскоп (1). Микроскоп имеет три объектива: 4х, 10х и 40х. Главной особенностью микроскопа является цифровая камера (2) с увеличением 10х и матрицей 5 Мрiс, установленной на место окуляра. Камера подключена к компьютеру (9). Для нее

имеются специализированное программное обеспечение и средства калибровки, позволяющие производить измерения.

Нить паутины (4) и тяга из капроновой нити (5) закреплены на предметном стекле (3). Один конец паутинной нити приклеен к стеклу, а другой к подвижной пластиковой пластинке (6). Тяга также приклеена к пластинке (6), а на другом конце тяги размещен небольшой пластиковый контейнер (7), в который помещается груз.

Микроскоп закреплен на специально изготовленной станине (8), которая позволяет вращать и закреплять всю систему на произвольный угол от 0 до 90°. Это необходимо для того, чтобы была возможность разделить процесс закрепления исследуемых образцов (горизонтальное положение предметного стола, рис.3а) и процесс проведения испытаний на растяжение (вертикальное положение, рис. 3б). Деформация нити фиксируется с помощью микроскопа по перемещению края пластинки (6).

Закрепление паутинной нити, перенесенной на предметное стекло (предметный стол в горизонтальном положении), осуществлялось с помощью небольшой капли термоплавкого клея при температуре 110°C.

Для создания нагрузки использовались грузики двух видов: массой $(0,094 \pm 0,005)$ г и массой $(2,15 \pm 0,05)$ г. После увеличения нагрузки производилось измерение соответствующей деформации нити паутины.

Для построения диаграммы растяжения во всем диапазоне нагрузок выполнялась математическая обработка результатов измерений. Были проведены дополнительные испытания и расчеты, которые показали, что будет допустимо проводить исследования непосредственно с каркасной нитью, не выделяя из нее отдельные волокна. Площадь кругового сечения нити, вычисляемая по ее диаметру, хорошо аппроксимирует суммарную площадь волокон, образующих нить.

Все испытания проводились при комнатной температуре 22-23°C и влажности 70%.

Результаты и их обсуждение

Прочность паутины в природных условиях

На рисунке 4 показана диаграмма растяжения волокна до разрыва, построенная по результатам нагрузки нити паутины грузами $F_i = 0,92$ мН.

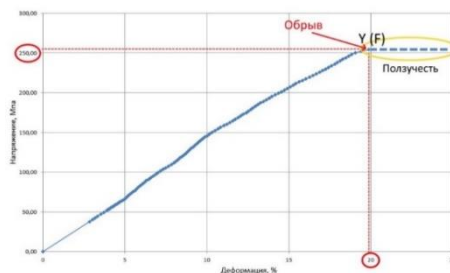


Рисунок 4 - Диаграмма растяжения волокна под нагрузкой. Предел ползучести (точка Y) $\sigma_y \cong 250$ МПа, при деформации волокна 20%

Сразу обращает на себя внимание сравнительно малый для каркасных нитей паутины предел прочности - 250 МПа, что существенно меньше 1,5-1,7 ГПа, которые указывают во многих публикациях [6,7,9]. Дело в том, что в данном эксперименте при достижении предела ползучести дальнейшее даже малое увеличение нагрузки приводит резкому неконтролируемому увеличению деформации (ползучесть) и последующему обрыву волокна. Можно предположить, что полученный результат соответствует реальной прочности паутины в природных условиях.

Циклическая нагрузка паутины

Гипотеза: волокно упрочняется при его тренировке циклической нагрузкой.

В следующем эксперименте исследован вопрос упрочнения паутины при циклической нагрузке нити. Для этого нить паутины была нагружена примерно до четверти, а потом до половины полученного в предыдущем испытании предела прочности. После каждой нагрузки нить разгружалась. Третий раз нить была нагружена до разрыва. Общее время испытания 40 мин. Диаграмма кривой, полученной в результате испытаний представлена на рисунке 5.

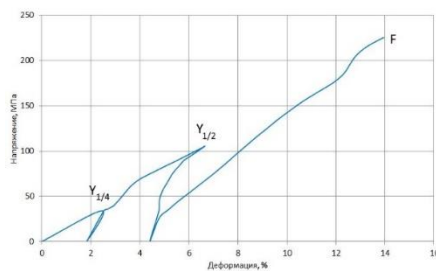


Рисунок 5 - Остаточная деформация и прочность волокна при двукратной нагрузке

Оказалось, что при заданном режиме нагрузки-разгрузки явного упрочнения волокна не произошло. Отсюда можно сделать вывод, что выбранный способ нагрузки не позволяет увеличить прочность волокна.

Следующей **гипотезой** было предположение, что упрочнение произойдет при увеличении количества циклов нагрузок.

На рисунке 6 представлена диаграмма деформации волокна при 10-ти циклах нагрузки.

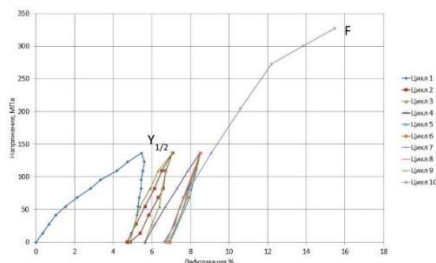


Рисунок 6 - Динамометрическая характеристика волокна при многократной нагрузке

Условия нагрузки такие же, как и в предыдущем опыте.

После 10-ого цикла деформации волокно было нагружено до разрыва. Исследование показало увеличение прочности почти на 50%. Предел ползучести составил 320 МПа, что в 1,4 раза больше, чем в предыдущих опытах. Общее время испытания 60 мин.

Проведенные испытания показали, что время является важным условием для формирования деформационно-прочностных характеристик каркасной нити.

Гипотеза: упрочнение волокна зависит от длительности нагрузки.

Упрочнение волокна при длительной постоянной нагрузке

Далее были поставлены задачи: оценить влияние ползучести, времени и скорости нагрузки на характеристики упрочнения, определить диаграмму ползучести волокна паутины.

Используемая в данной работе методика механических испытаний позволяет реализовать три важных условия: постоянство температуры, почти мгновенную нагрузку волокна и поддержание постоянной нагрузки на волокне. Для нагрузки волокна использованы грузики массой 2,15 г. Нагружающая сила выбрана таким образом, чтобы создать напряжение порядка 200-250 МПа близкое к ранее найденному пределу упругости.

Для определения влияния скорости нагрузки были проведены два испытания. В первом испытании нагрузка изменялась последовательно тремя ступенями 21,07 мН каждая с интервалом 30 с до 63,21 мН. Во втором испытании волокно было нагружено сразу весом 63,21 мН.

На рисунке 7 показана полученная кривая ползучести первого испытания за время 5 часов при напряжении 264 МПа.

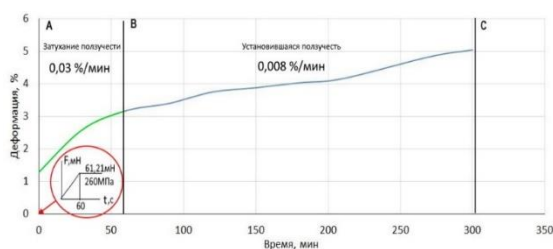


Рисунок 7 - Ползучесть волокна за время 5 часов

Показанный на рисунке 7 процесс ползучести можно поделить на три стадии: затухание ползучести (на диаграмме это участок А - В), установившаяся ползучесть (участок В - С) и стадия разрушения. В наших экспериментах третья стадия, которая находится после С - не достигнута.

Через 5 часов (время нагрузки) образец без паузы был нагружен до разрыва. Полученная кривая напряжение-деформация представлена на рисунке 9а. Предел прочности составил 1,3 ГПа при деформации волокна почти на 17%. Это в 5,2 раза больше, по сравнению с первыми испытаниями.

На рисунке 8 показана кривая ползучести волокна не при последовательном, а при «мгновенном» воздействии на него с такой же силой, как в предыдущем опыте. Здесь воздействие продолжалось 740 мин (12 час. 20 мин). Затем груз был убран.

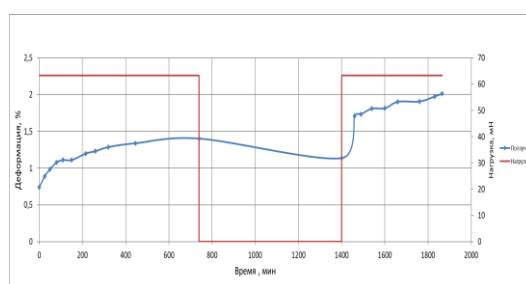


Рисунок 8 – Ползучесть волокна с разгрузочной паузой за время 31 час

На рисунке 8 показаны полученные зависимости относительного удлинения от времени при действии постоянной растягивающей силы и после прекращения ее действия.

Далее 660 мин (11 часов) волокно находилось в разгруженном состоянии.

После 11-часового периода релаксации волокно снова было нагружено на 460 мин (7 час. 40 мин.). В этом цикле ползучесть увеличилась на 0,9 %. Общая ползучесть оказалась около 2 %.

Весь цикл нагрузки завершился снятием диаграммы напряжение-деформация, показанной на рисунке 9б.

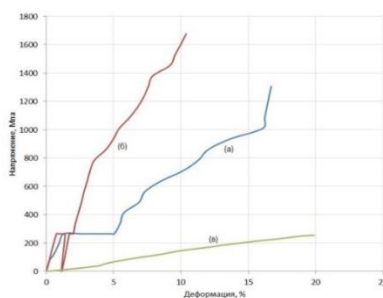


Рисунок 9 - Растяжение волокон после выдержки под нагрузкой:

- а – динамометрическая кривая волокон после 5 часов нагрузки,
- б - динамометрическая кривая волокон после 20 часов нагрузки,
- в – кривая растяжения волокна без упрочнения

Предел прочности составил 1,7 ГПа при деформации волокна на 10,3 %, что в 6,8 раз больше, чем у волокна, не прошедшего упрочнения.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что новая, построенная пауком, паутина не имеет сверхвысоких механических характеристик. Она служит естественной средой обитания и воздушным фильтром для сбора пищи определенного размера в зависимости от вида паука. Крупные насекомые, например, осы легко ее разрушают, а чаще просто облетают. Но при возникновении внешних силовых воздействий, например, ветра, отклонения ветки и других, волокна паутины адаптируются за счет описанного механизма вязко - упругого упрочнения. При воздействии влаги паутина также не только не теряет своих свойств, наоборот, после высыхания становится прочнее [5,8]. Можно предположить, что паутина обладает свойствами самоорганизации, которые заложены природой в ее биологическую макромолекулярную структуру.

Заключение

В работе рассмотрены особенности поведения каркасных нитей паутины *A.d.* в условиях медленных нагрузок. В естественном природном состоянии нити первично испытывают именно такие нагрузки, которые вызывают ответную деформацию.

Предложена конструкция испытательной установки, позволяющая задавать необходимые усилия и измерять возникающие при этом деформации.

Изучены характеристики ползучести волокна при различных видах и временных режимах циклических нагрузок.

Показано, что для получения выдающихся прочностных характеристик волокна, оно должно пройти через процедуру пластического упрочнения. Воздействуя на волокно силой, этого можно достигнуть, выдерживая волокно под нагрузкой в течение определенного времени при нормальной температуре. Предел прочности на разрыв возрастает более чем в 6 раз.

Выявленное свойство упрочнения паутиного волокна при воздействии на него определенной силой в течении длительного времени можно эффективно использовать при изготовлении медицинских кровоостанавливающих бинтов и салфеток, для других биоинженерных и медицинских задач, где прочность используемого волокна имеет особое значение.

Проведенные исследования позволяют высказать гипотезу о свойствах самоорганизации паутины в природных условиях и ее адаптацию к окружающим условиям в соответствии с влияющими на паутину факторами.

Список литературы

1. Агапова О.И. Биоинженерные конструкции на основе фиброина шелка и спидроина для регенеративной медицины и тканевой инженерии (обзор) // Современные технологии в медицине. - 2017. Т. 9. № 2. - С. 190-206.

2. Высокомолекулярные соединения: учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. А.Б. Зезина. - М.: Издательство Юрайт. - 2016. – 340 с.

3. Шевнин Ю. Технология использования паутины в медицине [Электронный ресурс]. URL: <https://biomolecula.ru/articles/tekhnologii-i-ispolzovanie-pautiny-v-medicine> (дата обращения: 01.06.2020)

4. Elices M. The hidden link between supercontraction and mechanical behavior of spider silks / Manuel Elices, G. R. Plaza, J. Pérez-Rigueiro, G.V. Guinea // Journal of

the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. - July 2011. Vol. 4 (Iss. 5), - P. 658-669.

5. Guinea G.V. Stretching of supercontracted fibers: a link between spinning and the variability of spider silk / G.V. Guinea, M. Elices, J. Pérez-Rigueiro, G.R. Plaza // Journal of Experimental Biology. -2005. 208 (1). - P. 25–30.

6. Ortlepp C. The scaling of safety factor in spider draglines / C. Ortlepp, J. Gosline // Journal of Experimental Biology. 2008. – Vol. 211. - P. 2832-2840.

7. Porter D. Predicting the mechanical properties of spider silk as a model nanostructured polymer. / D. Porter, F. Vollrath, Z. Shao // European Physical Journal E. - 2005. Vol. 16 (2). - P. 199–206.

8. Vehoff T. Mechanical properties of spider dragline silk: humidity, hysteresis, and relaxation / T. Vehoff, A. Glisović, H. Schollmeyer, A. Zippelius, T. Salditt // Biophys J. - 2007. Dec 15. 93(12). - P. 4425-4432.

9. Wojcieszak M. Micromechanics of fresh and 30-year-old *Nephila inaurata* madagascariensis dragline silk / M. Wojcieszak, G. Gouadec, A. Percot et al. // J Mater Sci. - 2017. Vol. 52, - P. 11759–11773.