

УДК 621.317;620.186

## ОТ БИОНИКИ К МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ. ПАУЧИЙ ШЕЛК

Люцко К.С., Козуля А.А.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В статье проведен анализ научной литературы по теме «Бионика» с целью выявления материалов, использование которых в нано- и микроэлектронике существенно улучшают свойства и качество изготавливаемых конструкций. В данной работе рассматривается строение и характеристики паучьего шелка, его уникальность заключается в том, что показатели прочности и пластичности превышают не только самые лучшие современные искусственные волокна, но и сталь. В состав паутины входят три вещества, которые способствуют ее долговечности: пирролидин, гидрофосфат калия и нитрат калия.

**Ключевые слова:** Бионика, конструкции, пластика, прочность, паучий шелк.

## FROM BIONICS TO ELECTRONICS. BIONIC WEB IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Liutsko K., Kozulya A.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The article analyzes the scientific literature on the topic "Bionics" in order to identify materials, the use of which in nano- and microelectronics significantly improve the properties and quality of manufactured structures. In this paper, the structure and characteristics of the spider silk are considered, its uniqueness lies in the fact that the strength and ductility indicators exceed not only the best modern artificial fibers, but also steel. The composition of the web includes three substances that contribute to its durability: pyrrolidine, potassium hydrophosphate and potassium nitrate.

**Key words:** bionics, constructions, plastics, strength, spider silk.

*Адрес для переписки: Люцко К.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: liutsko@bntu.by*

Бионическое поведение, вдохновленное изучением и наблюдением за природой, с древних времен играло жизненно важную роль в содействии развитию человека. В настоящее время человечество пришло к использованию своей первичной идеи – максимально точно перенести возможности живой природы в научно-технический прогресс. Что послужило фундаментом появления новой науки – бионики. Зарождение бионики произошло непосредственно в условиях производственной практики, наука возникла на стыке между биологией и техникой. Таким образом, бионика – это наука о создании искусственных систем, обладающих некоторыми характеристиками живых систем, она изучает законы структурного образования и формирования живой природы с целью объединения таких отраслей как биология и техника, для решения инженерно-технических задач.

В данной работе мы рассматривали строение, характеристики, а также механические свойства паучьего шелка, его уникальность заключается в том, что показатели прочности и пластичности превышают не только самые лучшие современные искусственные волокна, но и сталь.

Прочная шелковая нить (“dragline”) паука *Nephila clavipes* (рис. 1), которая служит для каркаса и “страховочного троса”, включает центральную часть и оболочку. Фибриллы диаметром ~ 100 нм, образующие центральную часть, состоят из белков спидроинов (от англ. spider – паук) двух

типов MaSp1 и MaSp2. Это очень длинные молекулы размером в несколько тысяч аминокислотных остатков. Спидроины по аминокислотному составу похожи на белки шелка фиброины, поэтому нити паутины называют паучьим шелком.



Рисунок 1 – Внешний вид паука *Nephila clavipes*

В состав паучьего шелка входят три вещества, которые способствуют его долговечности: пирролидин, гидрофосфат калия и нитрат калия. Еще одним, немаловажным свойством паучьего шелка является его максимальная упругость. Отдельные нити из паутинового шелка способны поглощать в три раза больше энергии, чем, например, кевлар – один из самых прочных материалов по соотношению веса (табл.1).

Отметим, что синтетические материалы обычно обладают более высокой жесткостью и прочностью по сравнению с натуральными волокнами, в то время как натуральные волокна более эластичны. Синтетические углеводные волокна, например, имеют предел текучести около 4 ГПа.

Это более чем в пять раз выше, чем у шелка насекомых.

Таблица 1. Механические свойства натуральных и синтетических волокон

Материал	Плотность, г*см <sup>-3</sup>	Прочность, ГПа	Эластичность, %	Прочность, МДж * м <sup>-3</sup>
Флаговый шелк	1,3	0,5	270	150
Нейлон 6.6	1,1	0,95	18	80
Кевлар 49	1,4	3,6	2,7	50
Углеродное волокно	1,8	4	1,3	25
Стали	7,8	1,5	0,8	6

Эластичность углеродных волокон, с другой стороны, лишь незначительна. Как только углеродное волокно удлиняется более чем на процент или изгибается до определенной степени, оно мгновенно ломается. Паучий шелк демонстрирует хорошо сбалансированное сочетание прочности и эластичности, поэтому механически превосходит другие натуральные волокна, а также синтетические нити при определенных обстоятельствах.

В мире натуральных волокон паучий шелк уже давно признан чудо-волокном за его уникальное сочетание высокой прочности и относительного удлинения при разрыве.

Раннее было исследовано, что паучий шелк имеет прочность до 1,75 ГПа при относительном удлинении, и разрыве более 26 % [1]. С ударной вязкостью более чем в три раза больше, чем у арамидных и других промышленных волокон, он продолжает привлекать внимание исследователей во всем мире.

В ходе изучения литературы было выявлено, что паучий шелк имеет широкое применение в медицине, а именно – хирургии. Так на основе паучьего шелка создан материал для заживления ран, использование которого активно внедряется в хирургической практике. Материал является абсолютно безопасным для человеческого организма. Его используют в качестве нитей для наложения швов после операций, с целью возможности быстрого отслеживания процесса заживления ран после зашивания. Ученые модифицировали натуральный паучий шелк флуоресцентными углеродными точками. Главным свойством которых является способность к свечению при поглощении света.

Помимо уникальных свойств материала, паучий шелк является естественным примером особого класса предварительно-напряженной системы, называемой тенсегрити (сохраняет целостность при растяжении) структуры [2]. Эти структуры представляют собой уникальное сочетание геометрических и механических параметров, приводящее к высокоэффективной структуре, благодаря оптимальному распределению конструкционной массы. Предварительное натяжение действительно немного изменяет жесткость. Тем не менее, это играет важную роль в задержке начала провисания струн паутины, таким образом, предотвращает нелинейность из-за ослабления струн. Самонапряженный характер, который обеспечивает их жесткость, задает паутине механизм для эффективного и экономичного способа балансировки напряжений. Изучение взаимодействия свойств и структурной геометрии паутины является большим прорывом в индустрии техники и технологий, дает возможность проектировать образцы следующего поколения – сверхлегкие, больших площадей.

**Выводы.** В данной работе мы рассмотрели строение, характеристики, а также механические свойства паучьего шелка. Выяснили, что его структуры представляют собой уникальное сочетание геометрических и механических параметров. Показатели прочности и пластичности превышают самые лучшие современные искусственные волокна. Отметим, что шелк паука имеет прочность до 1,75 ГПа при относительном удлинении, и разрыве более 26 %.

Благодаря своим уникальным характеристикам и свойствам, паучий шелк считается удивительно удобным материалом. Изучение наноструктуры паутины является перспективным направлением в микроэлектронике для производства датчиков, гибкой электроники и чувствительных покрытий.

#### Литература

1. Землин, Дж. К. Исследование механического поведения паутинных шелков; Технический отчет Натика армии США 69-29-СМ, 1968 Васильев А., Олихов И., Самотаев Н. Технология «нано-на-микро». Улучшение характеристик газовых сенсоров // Электроника НТБ. – 2011 – № 1(00107). – С. 36–44.
2. Мотро, Р. Системы Тенсегрити: современное состояние / Р. Мотро // Int. J. Space. – 1992. – № 7 (2).