

Юлия Александровна Григорьева

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, студент, Россия, Владивосток, e-mail: yuliagrigoreva1212@gmail.com

Научный руководитель – Дмитрий Анатольевич Пилипчук, старший преподаватель

Исследование мест разрывов в узлах связанных веревок

Аннотация. Исследовалось затягивание узлов, проводилось сравнение прочности различных узлов для точной локализации места разрыва связанных веревок. В случае связанных веревок разрыв происходит вместе с высокой кривизной на входе к узлу. Эта является результатом совместного вклада сил нагружения, изгиба и трения в сложный процесс разрушения узлов. Прочность связанных веревок значительно снижается (до 50 %) из-за наличия узла, это снижает сопротивление растяжению всех материалов. Раскрываются некоторые важные аспекты происходящих процессов в узлах связанных веревок.

Ключевые слова: орудия рыболовства, узел, материал, синтетика, нагрузка, разрушение

Yulia A. Grigorieva

Far Eastern State Technical Fisheries University, Student, Russia, Vladivostok, e-mail: yuliagrigoreva1212@gmail.com

Scientific adviser – Dmitry A. Pilipchuk, Senior Lecturer

Investigation of the places of breaks in the knots of connected ropes

Abstract. Watching the ropes, it was often seen that the tied ropes, when pulled, break at the knot. However, the exact break point in the tied ropes is challenging. In this work, the tightening of knots was investigated, the strength of various knots was compared for the exact localization of the place of rupture of the tied ropes. In the case of tied ropes, the break occurs together with a high curvature at the entrance to the node. This is the result of the combined contribution of loading, bending and friction forces to the complex process of node destruction. The strength of the tied ropes is significantly reduced (up to 50 %) due to the presence of a knot, this reduces the tensile resistance of all materials. This work with ropes reveals some important aspects of the processes taking place in the node.

Keywords: fishing gear, knot, material, synthetics, load, destruction

Рыбаки знают, что простой узел, завязанный на веревке, существенно ослабляет ее [1, 2, 3, 4]. В этих работах говорится, что веревка слабее всего сразу за входом в узел. Однако это описание локализации точек разрыва вряд ли является точным. Недавно исследования разрушения узлов были расширены. Сайтта и др. [5, 6] провели исследования молекулярного моделирования, демонстрирующие, что завязанные полиэтиленовые веревки разрываются на входе в узел, благодаря чему они точно отобразили распределение энергии деформации внутри узла. Тейлор [7] обнаружил, что некоторые белки содержат узлы. Причины для изучения такого рода явлений заключаются в том, что узлы присутствуют как в синтетических, так и в биологических полимерах и могут значительно ослабить сопротивление сцеплению этих материалов.

Что касается ДНК, то существует целый ряд ферментов, которые отвечают за распутывание узлов ДНК, доказав, что живое вещество может иметь дело с узлами [8]. В данной

статье проанализируем разрушение рыболовной веревки в узлах. Наблюдения показали, что точка обрыва совпадает с точкой наибольшей кривизны веревки сразу внутри входа в морской узел. Таким образом, основной причиной ослабления завязанной веревки является кривизна веревки.

Опишем некоторые характеристики завязываемых узлов.

Возможность завязывания – это практическая мера, которая зависит от деформируемости веревки (известно, как идеальная конфигурация теоретического узла предполагает, что узел не может затягиваться дальше из-за энергии узла [9]). Завязываемость – это стандартизированный тест (европейский стандарт EN 892: 1996), необходимый для альпинистских веревок с высокой растяжимостью. Тест включает в себя завязывание двух нависающих узлов в контрольном образце на расстоянии 250 мм друг от друга и загрузку тестовой веревки давлением в течение одной минуты, что позволяет узлам затягиваться. Затем нагрузка уменьшается до одного килограмма, и внутренний диаметр каждого узла измеряется с помощью градуированного конического штекерного датчика. Коэффициент завязываемости определяется путем деления среднего внутреннего диаметра узла на диаметр веревки (результат должен быть не более 1 : 1.1, чтобы соответствовать стандарту EN.) Это соотношение помогает определить, насколько хорошо страховочная веревка будет удерживать узел.

В зависимости от материала и используемых узлов извилистость и завязываемость могут обеспечить объективную оценку относительного натяжения узла.

Термин конкатенация относится к связыванию, например, белков в органической химии [10].

Для целей судебной экспертизы конкатенация представляет собой относительную сложность практического узла – степень его запутанности – и качественные характеристики этого запутывания. Эта характеристика может быть полезна при оценке прочности, надежности и стабильности узлов [11]. Очевидно, что количество пересечений и извилистость связаны с конкатенацией. Чем больше пересечений содержит узел, тем более сложным, запутанным и большим становится узел (рис. 1).











1		4		7		10	
2		5		8			
3		6		9			

Рисунок 1 – Токи пересечения различных узлов

Существуют различные свойства сцепления, которые связаны с тем, как завязывается узел, и его результирующей надежностью.

Прочность узла – это растягивающая нагрузка, которая приведет к разрушению узла, разрыву или развязыванию. Из множества опубликованных официальных исследований вытекает два вывода. Во-первых, исследователи должны проверять узлы в соответствии с тем, как они использовались или как они будут использоваться. Стандартный тест на медленное вытягивание является методом по умолчанию и наиболее известной методикой те-

стирования узлов, но он может не выявить надежность узла соответствующим образом, если применение узла требует, чтобы он загружался циклически или выдерживал удары во время фактического использования. Во-вторых, прочность узлов лучше выражать в виде диапазона с использованием выражения стандартного отклонения в три сигмы для тестовых данных [12]. Было проведено много теоретических и практических исследований в отношении точек разрыва узлов, и некоторые из этих исследований были применены к системам безопасности, хирургическим узлам, рыболовным веревкам и альпинистским узлам [13, 14].

В таблице номера узлов соответствуют номерам из рис. 1. В этой таблице прочность узла увеличивается сверху вниз.

Прочность узла в зависимости от типа узла

Номер узла	Сила узла
1	 более прочный узел
2	
7	
9	
3	
8	
4	
6	
5	
10	

Узлы обычно выходят из строя в локализованной точке относительно самого узла. Некоторые исследователи обнаружили, что разрыв происходит немного за пределами узла. Другие исследователи обнаружили, что узел разрушается там, где он изгибается с наименьшим радиусом или где его зажимают с наибольшей силой, сосредоточенной на наименьшей площади поверхности [13, 14, 15].

Веревки, по сути, разрезают сами себя, если приложено достаточно усилия. Нагрузка на разрыв зависит от типа узла, завязываемого материала и способа приложения усилия.

Прочность узла иногда называют эффективностью узла, и она выражается в процентах от идеальной или ненулевой прочности веревки на разрыв. Как правило, узел будет иметь тенденцию к прочности, если он более объемный и имеет больше точек пересечения, хотя есть исключения. Более простые, менее громоздкие узлы склонны к резким изгибам и защемлениям, охватывающим небольшие площади поверхности [16, 17].

Сцепление – качество и количество запутывания узлов – может быть методом приблизительной оценки потенциальной прочности и безопасности узлов [1, 2].

Надежность – это способность узла оставаться завязанным в различных условиях. Узел может постепенно ослабевать, удерживая вес в течение длительного периода времени, в зависимости от используемого материала. Чаще узел постепенно ослабевает при циклической нагрузке или при воздействии инерции удара [18].

Один из основных изменений, вносимых в траекторию завязывания узлов, является высокая локальная кривизна [19]. В областях с высокой кривизной веревки подвергаются неравномерному напряжению. Сторона, обращенная к внешней стороне изгиба, сильно растянута, в то время как сторона, обращенная к внутренней части изгиба, может быть сжатой [15].

Когда веревка удлиняется под действием растягивающей нагрузки, сторона, обращенная к внешней стороне изгиба, достигнет максимального напряжения разрыва раньше, чем любая другая часть веревки. Образование трещин при этом в точке приведет к полному

разрыву веревки из-за поперечного растяжения. Следовательно, чем выше кривизна, тем меньше растягивающая нагрузка, необходимая для образования трещины. Даже очень короткая область «высокой» кривизны может инициировать образование «стоек», можно ожидать, что веревки с постоянным растяжением нагрузки приведет к разрыву в области с наибольшей кривизной. Если это действительно так, то локальная кривизна в плотных узлах должна достигать более высокого значения объема узла, чем при тугих узлах в форме восьмерки. В проведенных исследованиях [20, 21] при моделировании воспользовались компьютерной программой поиска максимально плотных траекторий замкнутых узлов. На рис. 2 показаны узкие траектории простого узла и узла в форме восьмерки. Цветное изображение показывает, что области с наибольшей кривизной (красные) расположены на внутренней стороне узлов, сразу после того, как веревка проходит через первую внешнюю петлю. Максимальная кривизна в моделируемом плотном выступе и в узле действительно выше, чем в натянутом узле.

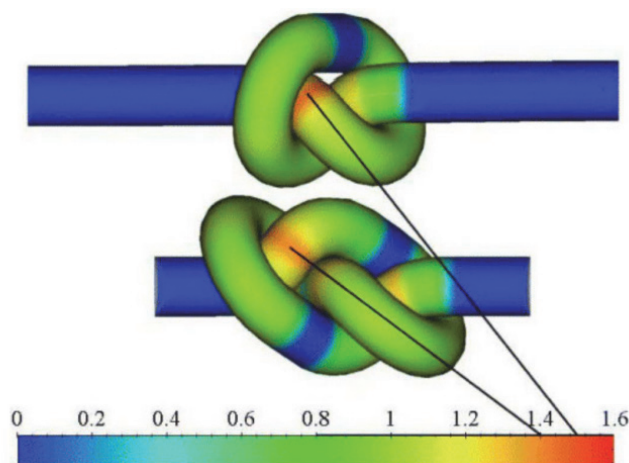


Рисунок 2 – Напряженные траектории смоделированных узлов: «простой» (сверху) и «восьмерка» (внизу)

На рис. 3 кривизна узлов представлена в зависимости от расстояния вдоль веревки. На этом графике максимальная кривизна для простого узла больше, чем максимальная кривизна для узла «восьмерка». Также примечательно, что кривизна достигает пика в четко определенном месте вдоль веревки. Если искривление является основной причиной разрыва узла, то можно ожидать, что разрыв всегда происходит в четко определенной точке веревки. Конечно, моделируемые узлы, сделанные из виртуальных веревок, не имеющих ни сопротивления изгибу, ни трения и сохраняющих свое круглое поперечное сечение, могут отличаться от реальных узлов, завязанных на веревке [20].

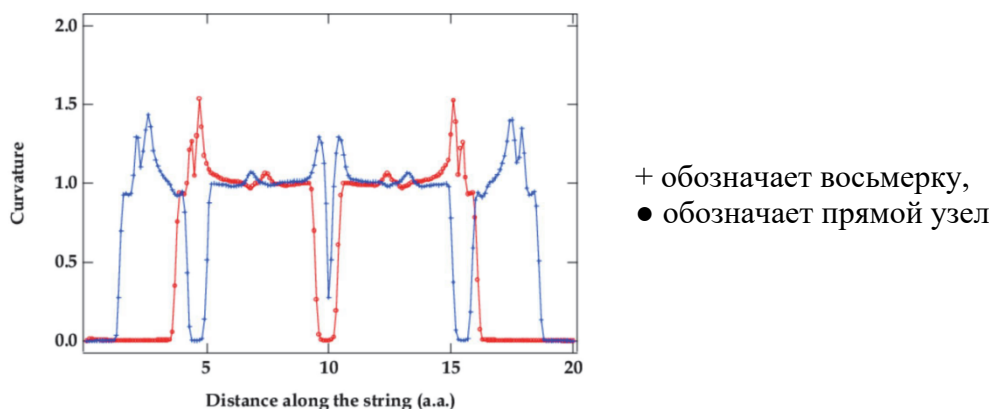


Рисунок 3 – Кривизна в зависимости от положения на веревке

Исследования трения на веревках с узлами [20] показали, что трение значительно увеличивается в областях контакта с большой кривизной. Поэтому, когда трение не мало, области с высокой кривизной на входе в узел будут эффективно блокировать дальнейшее затягивание узла. Уровень возможной затяжки реальных узлов зависит от таких факторов, как коэффициент трения и прочность материала, из которого сделан узел [21].

На рис. 4 показаны последовательные карты кривизны смоделированного прямого узла при его затягивании, соответствующие первому и последнему профилям кривизны, полученным при последовательной затяжке.

Из рис. 4 видно, что обе формы можно считать очень узкими и практически неразличимыми при визуальном осмотре, однако есть различия в положении участков с наибольшей кривизной (см. цветовую маркировку). В ослабленном узле наибольшая кривизна локализуется вскоре после входа в узел. В максимально натянутом состоянии (которое может быть доступно только для очень скользких материалов, таких как леска) область наибольшей кривизны локализована глубже в узле.

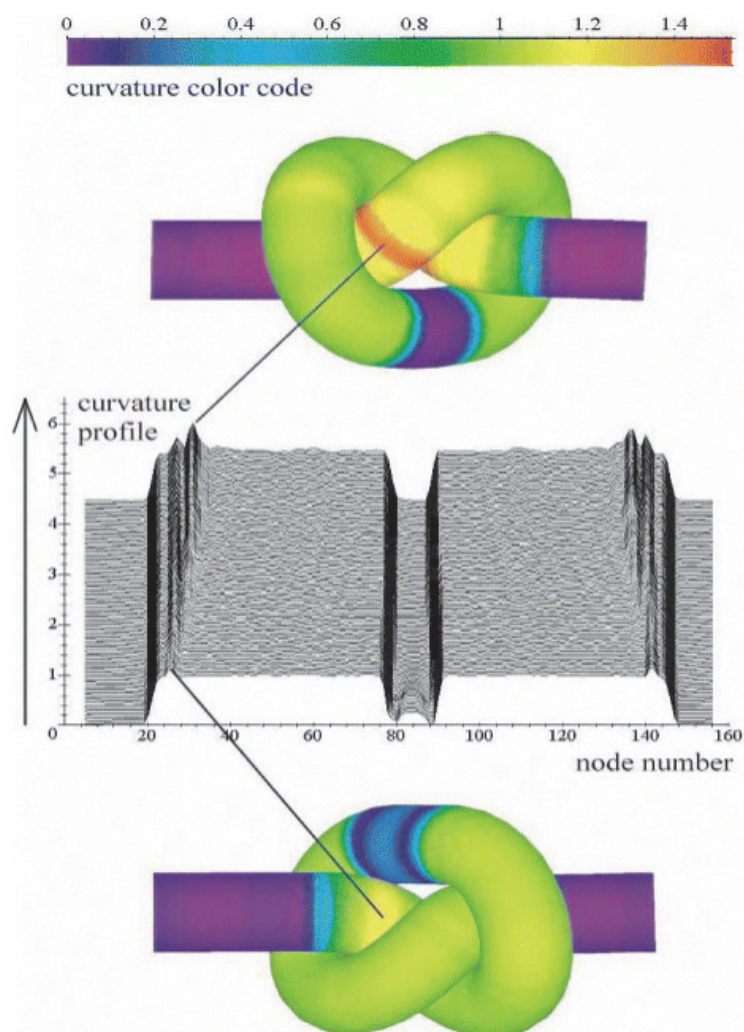


Рисунок 4 – Кривизна простого узла

На основе анализа литературы был сделан вывод о том, что в данной области проводится мало исследований. Из литературных источников видно, что данной проблематикой занимаются в разных областях науки: химии, биологии, судебной экспертизе, материаловедении. Следует также отметить, что теоретически были описаны процессы, происходящие в узлах, а вот с практической точки зрения обоснование таких работ никто пока не проводил.

Основная трудность состоит в том, чтобы запечатлеть процессы, которые происходят в момент затяжки узлов, разрывов и т.д. Было рассмотрено теоретическое обоснование про-

цессов, проходящих в узлах связанных веревок. Запланированные практические исследования на материалах, таких как капрон, нейлон, полиэтилен, полипропилен и т.д., позволят обосновать, какие из связанных материалов больше способствуют распутыванию узлов, а какие и вовсе приводят к разрыву.

Библиографический список

1. Ashley C. W. The Ashley book of knots. Doubleday Books, 1944. Vol. 13.
2. Stasiak A. et al. Knotted fishing line, covalent bonds, and breaking points // Science. 1999. Vol. 286, № 5437. P. 11–11.
3. Как узел ослабляет верёвку (эффективность узла). <https://lik-o-diles.blogspot.com/2020/04/kak-uzel-oslablyaet-verovku.html> (дата обращения: 01.10.2022)
4. Осипов, Е.В. Исследование синтетических нитей с учетом узловых соединений / Е.В. Осипов, Д.А. Пилипчук // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства: материалы Нац. науч.-техн. конф., Владивосток, 22–23 мая 2019 года. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2019. С. 46–48. EDN SGPPHE.
5. Arai Y. et al. Tying a molecular knot with optical tweezers // Nature. 1999. Vol. 399, № 6735. P. 446–448.
6. Saitta A. M. et al. Influence of a knot on the strength of a polymer strand // Nature. 1999. Vol. 399, №. 6731. P. 46–48.
7. Taylor W. R. A deeply knotted protein structure and how it might fold // Nature. 2000. Vol. 406, № 6798. P. 916–919.
8. Yan J., Magnasco M. O., Marko J. F. A kinetic proofreading mechanism for disentanglement of DNA by topoisomerases // Nature. 1999. Vol. 401, № 6756. P. 932–935.
9. Chisnall R.C. Analysing knots and ligatures: tying principles, knot characteristics and structural changes // Forensic Science International. 2020. Vol. 313. P. 110272.
10. Hsu S. T. D. Protein knotting through concatenation significantly reduces folding stability // Scientific reports. 2016. Vol. 6, № 1. P. 1–8.
11. Chisnall R. The security of Bowlines and Figure Eight Loops as harness tie-ins: The principles of pre-knotting, post-knotting and concatenation, Part 1 // KnottChisnall R. The security of Bowlines and Figure Eight Loops as harness tie-ins: The principles of pre-knotting, post-knotting and concatenation, Part 1 // Knotting Matters. 2006. Vol. 90. P. 14–20.
12. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с. ISBN 5-272-00078-1.
13. Maddocks J.H., Keller J.B. Ropes in equilibrium // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1987. Vol. 47, № 6. P. 1185–1200.
14. Saitta A.M. et al. Influence of a knot on the strength of a polymer strand // Nature. 1999. Vol. 399, № 6731. P. 46–48.
15. Пилипчук Д.А. Исследование качества формирования узла в сетных полотнах // Научные труды Дальрыбвтуза. 2020. Т. 52, № 2. С. 31–35. EDN CTJEML].
16. Audoly B., Clauvelin N., Neukirch S. Elastic knots // Physical Review Letters. 2007. Vol. 99, № 16. P. 164301.
17. Jawed M. K. et al. Untangling the mechanics and topology in the frictional response of long overhand elastic knots // Physical review letters. 2015. Vol. 115, № 11. P. 118302.
18. Daily-Diamond C.A., Gregg C.E., O'Reilly O.M. The roles of impact and inertia in the failure of a shoelace knot // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2017. Vol. 473, № 2200. P. 20160770.
19. Беляев М.В. К вопросу о трасологической экспертизе узлов и петель // Актуальные проблемы судебно-экспертной деятельности. 2020. С. 20–24.
20. Ideal Knots, eds. A. Stasiak, V. Katritch and L. H. Kauffman. World Scientific, 1998.
21. Pieranski P. et al. Localization of breakage points in knotted strings // New Journal of Physics. 2001. Vol. 3, № 1. P. 10.