



Научная статья  
05.16.09 – Материаловедение (по отраслям) (технические науки)  
УДК 620.22:621.375.826  
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.033

## ВЛИЯНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН И ТКАНЕЙ

Сергей Владимирович Овечкин <sup>1</sup>, Сергей Владимирович Ананьин <sup>2</sup>,  
Ольга Витальевна Андрухова <sup>3</sup>, Иван Александрович Попов <sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия  
<sup>1</sup> sergei260895@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9758-6145>  
<sup>2</sup> fitib@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4858-6576>  
<sup>3</sup> ova17@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8181-883X>  
<sup>4</sup> ivanpopov364@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7617-1653>

**Аннотация.** В работе исследуется влияние когерентного лазерного излучения на свойства поверхности и тонкого приповерхностного слоя арамидных волокон и тканей. Проводится экспериментальная оценка капиллярности и смачиваемости волокон и тканей из высокопрочных синтетических материалов, предварительно обработанных в поле лазерного излучения мощностью 300 мВт и 500 мВт, с длинами волн 532 нм и 410 нм соответственно. Так же определяется эффективное время облучения и длительность эффекта, после чего исследуется изменение упруго-прочностных характеристик материала. В результате работы было обнаружено, что при облучении происходит улучшение адгезионной способности и гидрофилизация поверхности, при этом упруго-прочностные характеристики материала не изменяются, а возможно и улучшаются. На основании проведенных исследований предложен метод фотоактивации по поверхности арамидного волокна с помощью когерентного маломощного лазерного излучения. Актуальность работы заключается в поиске нового метода и разработки методики модификации арамидных тканей, не приводящего к потере свойств материала, при видимом улучшении других.

**Ключевые слова:** арамидное волокно, арамидная ткань, модификация, лазерное излучение, капиллярность, прочностные характеристики.

**Для цитирования:** Влияние когерентного излучения на прочность арамидных волокон и тканей / С. В. Овечкин [и др.] // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 233–238. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.033.

Original article

## INFLUENCE OF COHERENT RADIATION ON THE STRENGTH OF ARAMID FIBERS AND TISSUES

Sergey V. Ovechkin <sup>1</sup>, Sergey V. Ananyin <sup>2</sup>, Olga V. Andrukhova <sup>3</sup>, Ivan A. Popov <sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia  
<sup>1</sup> sergei260895@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9758-6145>  
<sup>2</sup> fitib@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4858-6576>  
<sup>3</sup> ova17@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8181-883X>  
<sup>4</sup> ivanpopov364@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7617-1653>

© Овечкин С. В., Ананьин С. В., Андрухова О. В., Попов И. А., 2021

**Abstract.** The paper investigates the effect of coherent laser radiation on the properties of the surface and a thin surface layer of aramid fibers and fabrics. An experimental evaluation of the capillarity and wettability of fibers and fabrics made of high-strength synthetic materials pretreated in the field of laser radiation with a power of 300 mW and 500 mW, with wavelengths of 532 nm and 410 nm, respectively, is carried out. The effective time of irradiation and the duration of the effect are also determined, after which the change in the elastic-strength characteristics of the material is investigated. As a result of the work, it was found that irradiation leads to an improvement in the adhesion capacity and hydrophilization of the surface, while the elastic-strength characteristics of the material do not change, but, possibly, improve. On the basis of the studies carried out, a method of photoactivation of the aramid fiber surface using coherent low-power laser radiation is proposed. The relevance of the work lies in the search for a new method and the development of a technique for modifying aramid fabrics that does not lead to the loss of material properties, with a visible improvement in others.

**Keywords:** aramid fiber, aramid fabric, modification, laser radiation, capillarity, strength characteristics.

**For citation:** Ovechkin, S. V., Ananyin, S. V., Andrukhova, O. V. & Popov, I. A. Influence of coherent radiation on the strength of aramid fibers and tissues. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 233-238. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.033.

Основной задачей создания новых материалов является поиск иных методов модификации уже имеющихся компонентов. Широкий спектр применения обуславливает необходимость модификации свойств поверхности и тонкого приповерхностного слоя арамидного волокна и тканей без изменения их объемных характеристик, т. к. при нанесении различных покрытий часто наблюдаются недостаточная адгезионная способность и смачиваемость поверхностей, обусловленные низкой поверхностной энергией.

На основе ранее предложенных методов активации поверхности волокон: радиационно-химической обработкой [1, 2]; плазменной модификацией поверхности [3–5], использование которых может привести к ухудшению либо потере одних свойств волокон, при видимом улучшении других, а также усложняет технологический процесс и экологическую ситуацию на производстве, сделан вывод о необходимости поиска новых методов модификации арамидных волокон (СВМ), лишенных этих проблем.

Исходя из этого, целью работы ставится исследование влияния предложенного метода фотоактивации поверхности арамидного во-

локна когерентным лазерным излучением малой мощности на прочность арамидных волокон и тканей.

Для изучения влияния лазерного излучения (ЛИ) на прочность пара-арамидного волокна и ткани, и определения разрывной нагрузки используется электромеханическая испытательная машина INSTRON. Образцы облучались лазерным излучением мощностью 300 мВт и 500 мВт с длинами волн 532 нм и 410 нм соответственно.

В первой серии экспериментов испытывались на разрыв отдельные нити, подвергнутые в течение 20 секунд облучению в видимой части спектра электромагнитного излучения ( $\lambda_1 = 532 \pm 10$  нм и  $\lambda_2 = 410 \pm 10$  нм) с помощью твердотельных полупроводниковых лазеров. В качестве контрольного образца использовалась не облученная нить.

В автоматическом режиме были определены максимальная разрывная нагрузка, определяющая прочность материала, модуль Юнга и максимальное напряжение при растяжении (упругие свойства материала). Для большей наглядности влияния лазерного облучения на характеристики арамидных нитей средние значения фиксируемых в эксперименте параметров были сведены в одну таблицу 1.

Таблица 1 – Средние значения механических характеристик арамидной нити при разрыве

Table 1 - Average values of mechanical characteristics of aramid thread at break

Тип образцов	Максимальная нагрузка (Н)	Модуль Юнга (МПа)	Максимум напряжение нити при растяжении (МПа)
Без облучения	45,57	238378,28	5802,25
$\lambda_1 = 532$ нм	44,00	229985,53	5602,05
$\lambda_2 = 410$ нм	42,42	208064,52	5401,39

## ВЛИЯНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН И ТКАНЕЙ

Таким образом, из полученных результатов следует, что под воздействием электромагнитного излучения упруго-прочностные характеристики арамидного волокна снижаются. Облучение образцов лазером с длиной волны когерентного излучения  $\lambda_1 = 532$  нм привело к снижению фиксируемых параметров не более чем на 3,4 %. При облучении образцов с  $\lambda_2 = 410$  нм максимальная нагрузка, выдерживаемая нитью, уменьшилась на 6,9 %, модуль Юнга – на 13 %, максимальное напряжение нити – 6,9%.

Во второй серии экспериментов испытания на разрыв проводились для полосок из арамидной ткани шириной 10 мм. В качестве контрольных образцов использовались полоски, не подвергавшиеся лазерному воздействию. Для большей наглядности влияния лазерного облучения на характеристики полосок арамидной ткани средние значения фиксируемых в эксперименте параметров были сведены в одну таблицу 2.

Таблица 2 – Средние значения механических характеристик арамидной ткани при разрыве

Table 2 - Average values of mechanical characteristics of aramid fabric at break

Тип образцов	Максимальная нагрузка (Н)	Модуль Юнга (МПа)	Максимум напряжения при растяжении (МПа)
без облучения	553,84	6775,25	276,92
$\lambda_1 = 532$ нм	607,48	5983,41	303,74
$\lambda_2 = 410$ нм	603,85	4863,02	301,92

Из полученных результатов следует, что воздействие электромагнитного излучения положительно влияет на упруго-прочностные характеристики образцов из арамидной ткани саржевого переплетения нитей.

Облучение образцов лазером с длиной волны когерентного излучения  $\lambda_1 = 532$  нм привело к тому, что максимально выдерживаемая при разрыве нагрузка и максимальное напряжение в образце возросли на 10–12 %, тогда как модуль упругости (модуль Юнга) уменьшился на 12 %. При облучении с  $\lambda_2 = 410$  нм максимальная нагрузка и максимальное напряжение ткани возросли на 9 %, а модуль Юнга понизился на 28 %.

По-видимому, снижение прочностных характеристик отдельных арамидных нитей и их рост в случае воздействия на образцы тканей обусловлен тем, что под действием электромагнитного излучения наблюдается разрушение ковалентных связей между поверхностными атомами волокон и приводит к образованию поверхностных радикалов, в тканевом образце под воздействием лазерного излучения ковалентные связи частично восстанавливаются между поверхностными атомами соседних нитей. В результате чего прочность заметно возрастает, но упругость образца снижается.

Так как значительных изменений упруго-прочностных характеристик не последовало, разумным решением стала проверка других характеристик, влияющих на пропитку материала связующим веществом. Для этого был проведен ряд дополнительных экспериментов.

При изучении влияния электромагнитного излучения на капиллярность и смачиваемость арамидной нити в зависимости от длины волны использовались заранее подготовленные не облученные (контрольные) образцы и облученные арамидные нити (время экспозиции  $t = 40$  с). Нити закреплялись на испытательном стенде, а в поддон наливалась вода при комнатной температуре. В ходе эксперимента, общая длительность которого 60 минут с интервалом в 10 минут, измерялась высота капиллярного поднятия жидкости (воды) в волокне для каждого образца.

В таблице 3 для анализа полученных экспериментальных данных приведены средние по времени значения исследуемой физической величины для каждой серии экспериментов.

Наглядно изменение капиллярности арамидного волокна при облучении показано на обобщенной диаграмме по трем типам образцов (рисунок 1).

Таблица 3 – Средние значения высоты капиллярного столба жидкости

Table 3 - Average values of the height of the capillary liquid column

Тип образца	$h_{\text{ср}}, \text{ мм}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
без облучения	47	53	46	48	48	51	53	52	52	50
$\lambda = 532 \text{ нм}$	65	68	58	66	60	56	55	62	57	60
$\lambda = 410 \text{ нм}$	58	62	57	66	56	57	67	56	55	65

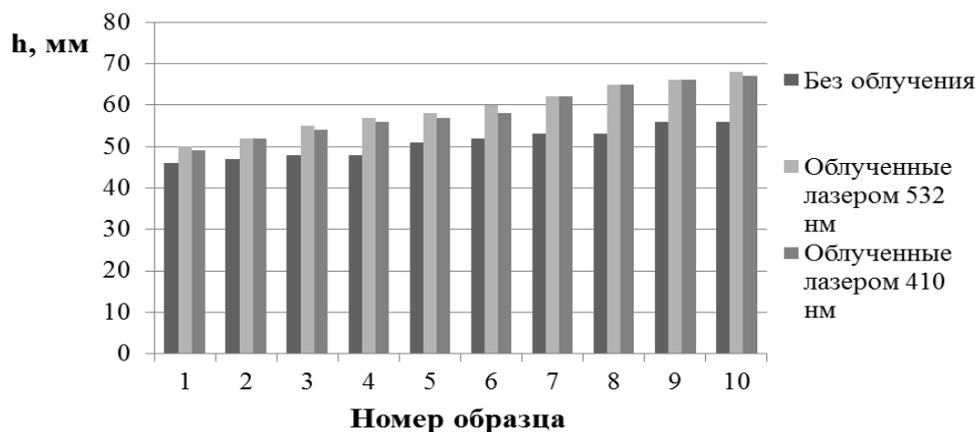


Рисунок 1 – Сравнение капиллярности не облученных и облученных образцов

Figure 1 - Comparison of the capillarity of non-irradiated and irradiated samples

Таким образом, из полученной диаграммы, можно сделать следующие выводы:

1) наименьшей капиллярностью обладают образцы, не подвергавшиеся облучению. Среднее значение высоты поднятия капиллярного столба в этом случае составляет  $\sim 49$  мм;

2) при облучении, независимо от длины волны когерентного электромагнитного излучения, наблюдается рост капиллярности образцов. Среднее значение высоты поднятия капиллярного столба составило 61 мм для зеленого диапазона длин волн и 59 мм для фиолетового ( $\sim 25\%$  при времени облучения 40 с).

Для проверки длительности эффекта воздействия лазерного излучения на волокно был проведён эксперимент, в котором определялась высота поднятия капиллярного столба в волокнах облучённых лазером с длиной волны когерентного излучения  $\lambda_1 = 532$  нм и различным временем выдержки после него. Исследовались образцы непосредственно сразу после облучения, через 12 часов, 24 часа и 456 часов ( $\approx 19$  дней) после облучения. Для чистоты эксперимента исследовались и образцы без облучения, т. к. на подъем капиллярного столба влияют внешние факторы: атмосферное давление, температура и влажность воздуха в помещении.

236

В ходе эксперимента установлено, что вне зависимости от внешних условий наблюдается рост капиллярности во всех образцах облучённых волокон, то есть полученный эффект сохраняется.

Для анализа полученных результатов определялась относительная высота столбика жидкости в образце:  $\delta = \frac{h_{\lambda,t}}{h_0}$ , где  $h_{\lambda,t}$  – высота капиллярного столба в облучённом образце,  $h_0$  – в необлучённом жгуте арамидного волокна. Диаграмма «относительная высота – время выдержки» (рисунок 2) хорошо иллюстрирует тот факт, что полученный эффект не является временным. Сначала наблюдается некоторое падение капиллярности волокна (от 0 до 12 часов), но затем данная величина принимает стационарное значение.

Для анализа зависимости эффективности воздействия лазерного излучения от времени экспозиции арамидные нити обрабатывались лазером ( $\lambda = 532$  нм) с разным временем воздействия на образец – 10, 30, 60, 180 и 300 секунд соответственно. Для наглядного сравнения полученных данных была построена диаграмма «высота капиллярного столба – время облучения», показанная на рисунке 3.

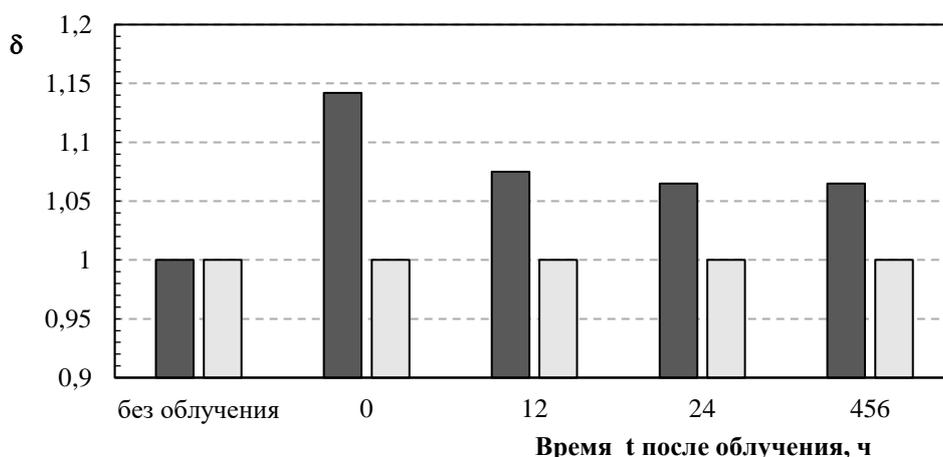


Рисунок 2 – Диаграмма зависимости относительной высоты капиллярного столба в волокне от времени, прошедшего после воздействия ЛИ

Figure 2 - Diagram of the dependence of the relative height of the capillary column in the fiber on the time elapsed after exposure to laser radiation

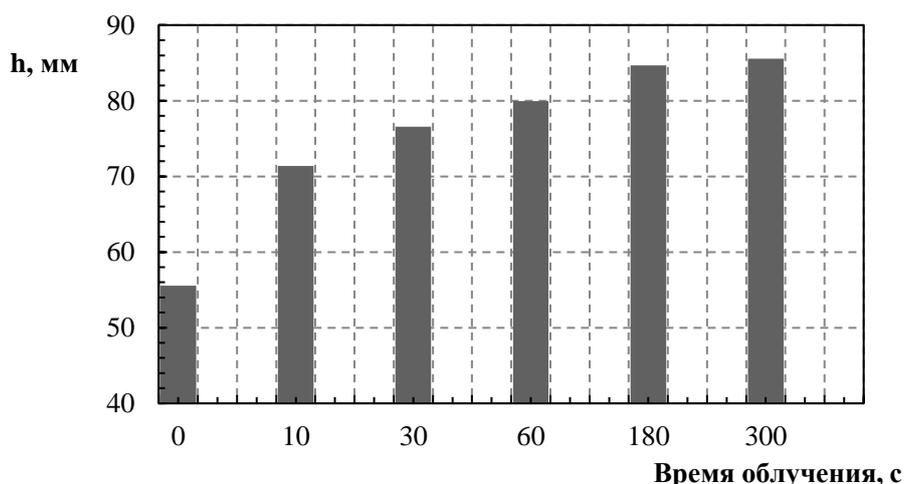


Рисунок 3 – Диаграмма «высота капиллярного столба – время облучения»

Figure 3 - "Capillary column height – irradiation time" diagram

Анализ полученных результатов показал, что наблюдается рост капиллярности арамидного волокна в зависимости от времени облучения, однако прослеживается наличие некоторого порога эффективности облучения, после которого высота капиллярного столба жидкости перестает изменяться. По-видимому, это обусловлено тем, что при неизменном радиусе капиллярных трубок в арамидных волокнах краевой угол смачивания достигает своего предельного значения.

Очевидно, что при увеличении времени облучения наблюдается рост высоты подъема

капиллярного столба, что обусловлено уменьшением краевого угла смачивания. Таким образом, при облучении арамидных волокон происходит улучшение смачиваемости арамидных волокон, что ведет улучшению пропитки арамидного наполнителя связующим компонентом и созданию прочного соединения между волокном и матрицей.

### Заключение

Проведенные исследования показали эффективность модификации арамидного волокна и ткани когерентным излучением малой

мощности. По результатам наблюдается незначительное изменение упруго-прочностных характеристик, но при этом капиллярности и смачиваемости материала значительно улучшается, что соответствует поставленной цели данной работы.

Учитывая все аспекты работы и характер влияния лазерного излучения на арамидные волокна и ткани, представляется возможной разработка мало затратной и сравнительно недорогой методики и технологии модифицирования арамидного волокна с помощью лазерного излучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плескачевский Ю.М., Смирнов В.В., Макаренко В.М. ; АН БССР, Ин-т механики металлополимер. систем. Введение в радиационное материаловедение полимерных композитов. Минск : Наука и техника, 1991. 190 с.
2. Иванова А.С., Кривенко Е.А., Головина Е.А. Технология создания силовой оболочки корпуса твердотопливного ракетного двигателя с модификацией поверхности арамидных волокон и теплозащитой // Ползуновский альманах. 2017. № 1–2. С. 66–71.
3. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления / И.Ш. Абдуллин. Казань : Изд-во Казан. технол. ун-та, 2017. С. 280–324.
4. Сергеева Е.А., Гайнутдинова А.Р. Плазменная гидрофилизация арамидной ткани для создания баллистических композитов // Дизайн. Материалы. Технология. 2016. № 1. С. 80–83.
5. Сергеева Е.А., Гришанова И.А., Абдуллин И.Ш. Влияние плазмы ВЧЕ-разряда на физико-механические свойства волокон и композиционных материалов // Вестник Казан. технол. ун-та. 2015. № 7. С. 109–112.

#### Информация об авторах

*С. В. Овечкин – студент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 26.04.2021; одобрена после рецензирования 12.05.2021; принята к публикации 27.05.2021.*

*The article was received by the editorial board on 26 Apr 21; approved after editing on 12 May 21; accepted for publication on 27 May 21.*

*С. В. Ананын – кандидат технических наук, доцент, декан факультета специальных технологий Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*О. В. Андрухова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*И. А. Попов – студент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

#### REFERENCES

1. Pleskachevskiy, Yu.M., Smirnov, V.V. & Makarenko, V.M. (1991). *Introduction to Radiation Materials Science of Polymer Composites*. Minsk : Navukaitehnika. (In Russ.).
2. Ivanova, A.S, Krivenko, Ye.A. & Golovina, Ye.A. (2017). *Polzunovskiy Almanah*, (1-2), 66-71. (In Russ.).
3. Abdullin, I.Sh., Zheltukhin, V.S., Sagbiev, I.R. & Shaekhov, M.F. (2017). *Modification of Nanolayers in High-Frequency Low-Pressure Plasma*.Kazan : Kazan Technological University Publishing), pp 280-324. (In Russ.).
4. Sergeeva, Ye.A. & Gainutdinova, A.R. (2016). *Dis. Mat. Techn.* (1),80-83. (In Russ.).
5. Sergeeva, Ye.A., Grishanova, I.A. & Abdullin, I.Sh. (2015). *Vest. of Kazan Tech. Un.* (7), 109-112. (In Russ.).

#### Information about the authors

*S. V. Ovechkin – student of the Polzunov Altai State Technical University.*

*S. V. Ananyin – Ph. D. in Engineering Science, Docent, Dean of the Faculty of Special Technologies, Polzunov Altai State Technical University.*

*O. V. Andrukhnova – Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Docent of the Department of Physics, Polzunov Altai State Technical University.*

*I. A. Popov – student of the Polzunov Altai State Technical University.*