



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-135-142>
УДК 677:620.1 + 535:621.373.826:539

Поступила 10.04.2026
Received 10.04.2026

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ МАРКИРОВКИ

*А. Г. АНИСОВИЧ, Институт прикладной физики НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Академическая, 16. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru*

*М. И. МАРКЕВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, ул. Академика Купревича, 10*

В. И. ЖУРАВЛЕВА, Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 220

Методами оптической микроскопии исследована морфология поверхности смесовых тканей «Аркадия», «Сису» и «Грэта» (производства ОАО «Моготекс») до и после лазерного воздействия. Модификация поверхности тканей проводилась с помощью лазера на алюмоиттриевом гранате LS-2134D (LOTIS, Беларусь) с длиной волны 1064 нм, генерирующем в двухимпульсном режиме, в интервале вложенных энергий от 15 до 30 Дж, плотность мощности $3,54 \cdot 10^7$ Вт/см². Проведенные исследования позволили определить основы технологии и физические условия для деструкции смесовых тканей полотняного («Сису», «Аркадия») и саржевого («Грэта») переплетения. Показано, что в наибольшей степени под воздействием лазера разрушается ткань «Аркадия», но зона термического влияния больше для тканей «Сису» и «Грэта». Для ткани «Сису» площадь разрушения существенно увеличивается с повышением энергии воздействия от 15 до 25 Дж. Для ткани «Аркадия» повышение энергии воздействия не приводит к существенному увеличению площади поражения. Для ткани «Грэта» вложенная энергия для перфорации ткани выше, чем для тканей с полотняным переплетением.

Ключевые слова. Смесовая ткань, ткацкое переплетение, лазер, двухимпульсный режим, перфорация, маркировка.

Для цитирования. Анисович, А. Г. Лазерная диагностика тканых материалов для их маркировки / А. Г. Анисович, М. И. Маркевич, В. И. Журавлева // *Литье и металлургия*. 2026. № 2. С. 135–142. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-135-142>.

LASER DIAGNOSTICS OF WOVEN MATERIALS FOR THEIR MARKING

*A. G. ANISOVICH, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus, 16, Akademicheskaya str. E-mail: anna-anisovich@yandex.ru*

*M. I. MARKEVICH, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus. 10, Kuprevicha str.*

V. I. ZHURAVLEVA, Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus, 220, Nezavisimosti Ave.

The surface morphology of the blended fabrics «Arcadia», «Sisu», and «Greta» (manufactured by Mogotex OJSC) before and after laser irradiation was studied using optical microscopy. Fabric surface modification was performed using a 1064 nm yttrium aluminum garnet laser (LOTIS, Belarus) operating in dual-pulse mode with input energies ranging from 15 to 30 J and a power density of $3.54 \cdot 10^7$ W/cm². The conducted studies allowed us to determine the fundamentals of the technology and physical conditions for the destruction of blended fabrics of plain («Sisu», «Arcadia») and twill («Greta») weave. It was shown that Arcadia fabric is most damaged by laser exposure, but the heat-affected zone is larger for «Sisu» and «Greta» fabrics. For Sisu fabric, the destruction area increases significantly with an increase in exposure energy from 15 to 25 J. For Arcadia fabric, an increase in exposure energy does not lead to a significant increase in the damaged area. For Greta fabric, the energy input for perforation is higher than for plain weave fabrics.

Keywords. Blended fabric, plain weave, laser, dual-pulse mode, perforation, marking

For citation. Anisovich A. G., Markevich M. I., Zhuravleva V. I. Laser diagnostics of woven materials for their marking. *Foundry production and metallurgy*, 2026, no. 2, pp. 135–142. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-135-142>.

Введение

Импульсная лазерная обработка все шире применяется для локального воздействия и последующего анализа структуры, что дает диагностические данные по свойствам и дефектам тканей. Комплексная оценка структуры, высокая чувствительность к мелким дефектам, которые не могут почувствовать другие методы, предоставляют возможность контроля качества исходных тканей и композитов на их основе в процессе

лазерного воздействия [1–3]. Кроме того, в последнее время возрастает роль лазерной маркировки тканей и изделий на их основе. Лазерное воздействие позволяет персонализировать текстиль, улучшить брендинг, добиться экологически чистых результатов без использования чернил и воды в процессе маркировки тканей. Технология может использоваться для нанесения штрих-кодов, серийных номеров, резки, минимизации отходов. Лазерное воздействие на ткани обеспечивает микроскопическую точность и долговечность в процессе их маркировки. Такая маркировка подходит как для натуральных и синтетических, так и для смесовых тканей. Лазерная маркировка легко интегрируется в производственные линии.

С 2026 г. лазерная маркировка тканей, согласно новым требованиям, является важнейшей процедурой для нанесения кодов DataMatrix. С 1 марта 2026 г. обязательная маркировка распространяется на широкий спектр спецодежды, так как она позволяет наносить идентификаторы на износостойкие ткани, которые используются в специальной экипировке. При стирке лазерная маркировка не исчезает, что критично для брендинга и прослеживаемости изделия в процессе всего его существования. Лазерные технологии обладают технологической гибкостью и точностью [4–7].

Лазерная диагностика по результатам перфорации является инновационным методом микроразрушающего контроля, позволяющим оценить степень износа и остаточный ресурс ткани. Снижение плотности мощности при работе с бывшим в употреблении текстилем обусловлено деградацией волокон. Лазерная абляция на новых и бывших в употреблении тканых материалах различается из-за изменения физико-химических свойств волокон в процессе эксплуатации. Основные отличия заключаются в порогах повреждения. Новые ткани имеют однородную поверхность и энергия распределяется по структуре переплетения равномерно, а бывшие в употреблении ткани, как правило, имеют повышенную ворсистость, что приводит к неоднородному поглощению энергии. В процессе носки и стирок происходит деградация целлюлозы. Молекулярные связи в хлопке (целлюлоза) или полиэстере становятся более слабыми. Поэтому порог абляции (энергия, необходимая для разрыва связей и испарения материала) уменьшается.

Существует разница и в динамике формирования отверстия. В новых тканях отверстия имеют четкие края с высокой повторяемостью диаметра отверстия, а для бывших в употреблении тканей лазерный нагрев распространяется вдоль изношенных капилляров волокна. Изучение данных вопросов весьма перспективно с экологической точки зрения, так как это может способствовать выбору метода переработки.

Таким образом, лазерная диагностика тканых материалов является бесконтактным методом анализа, который использует энергию лазерного импульса для получения данных о структуре, составе и состоянии волокон.

Цель работы – разработка физических основ лазерной маркировки смесовых тканей (производство ОАО «Моготекс») в режиме сдвоенных импульсов.

Материалы и методики эксперимента

Исследование проведено на смесовых тканях «Аркадия», «Грэта» и «Сису» производства ООО «Моготекс». Размеры образцов: толщина – ~0,5, длина – 15, ширина – 20 мм.

Ткань «Аркадия» применяется в широком диапазоне положительных и отрицательных температур, она формоустойчива, мягкая и пластичная, хорошо драпируется. Состав сырья ткани: полиэфир – 67%, вискоза – 33%. Ткань имеет полотняное переплетение, плотность ткани составляет порядка 180 г/м³, диаметр филамента примерно 18 мкм.

Ткань «Грэта» благодаря комбинации натуральных и синтетических нитей обладает высокими эксплуатационными характеристиками, такими, как прочность, износостойкость, устойчивость к влаге. Состав сырья ткани: полиэфир – 49%, хлопок – 51%. Ткань имеет саржевое переплетение, плотность составляет порядка 240 г/м³.

Ткань «Сису» – это легкая, прочная ткань с минимальной усадкой, обеспечивает прочность, долговечность и стойкость к разрывам. Она воздухопроницаема, мягкая. Состав сырья ткани: полиэфир – 77%, хлопок – 33%. Ткань имеет полотняное переплетение, плотность составляет порядка 139 г/м³. Диаметр филамента ткани составляет 11,2 мкм.

Для диагностического воздействия на ткани был использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~0,05 Дж). Ткани облучали лазерным излучением в интервале энергий 15–30 Дж при временах экспозиции от 15 до 30 с. Плотность мощности лазерного излучения составляла $3,54 \cdot 10^7$ Вт/см².

Исследования морфологии поверхности тканей выполнены на металлографическом комплексе на основе инвертированного микроскопа МИ-1, оснащенного программой обработки изображений AXALIT (разработчик Аксалит Софт). Фотографирование произведено с использованием панарамирования по OZ. Использован анализ в светлом поле [8]. Определение количественных характеристик участков, разрушенных лазером, произведено в программе обработки изображений IMAGE SP.

Результаты и их обсуждение

Согласно современным представлениям [6], локальная лазерная модификация может быть вызвана различными механизмами. Взаимодействие лазерного излучения с твердым телом подразделяют на три основные модели в зависимости от плотности мощности (q) лазерного излучения [9], которая определяет процессы от нагрева до разрушения:

- линейный нагрев ($q < 10^4 - 10^5$ Вт/см²), при этом излучение поглощается поверхностью, происходит ее нагрев без изменения агрегатного состояния материала;
- при плотностях мощности ($10^5 - 10^7$ Вт/см²) происходит разрушение кристаллической решетки, поверхность плавится и начинает интенсивно испаряться;
- при плотностях мощности более 10^7 Вт/см² происходит лазерная абляция и образование плазмы, которая экранирует поверхность от последующих импульсов.

В нашем случае процесс обработки материала наносекундными импульсами основан на образовании низкотемпературной плазмы в процессе лазерного воздействия.

Следует отметить, что пороги плазмообразования существенно зависят от неоднородности структуры ткани, дефектов, состава, оптических (соотношение коэффициентов пропускания, поглощения и отражения света), теплофизических и других характеристик [4]. Образованная в результате испарения вещества под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции [4–7].

Лазерное воздействие на смесовые ткани производства ОАО «Моготекс» не является изученным, поэтому полученные экспериментальные результаты новые и позволят определять параметры порога разрушения этих тканей для разработки технологии их маркировки.

На рис. 1 представлена морфология поверхности тканей в исходном состоянии.

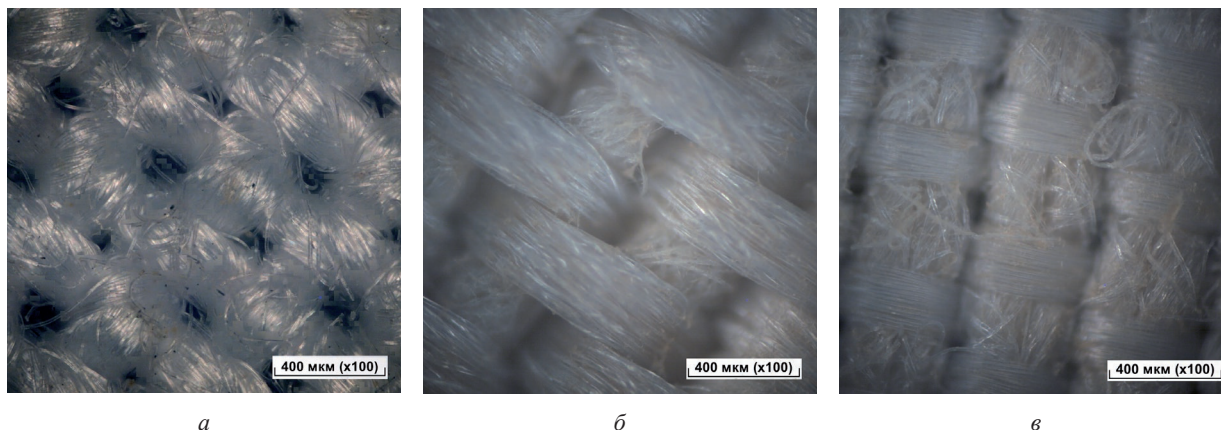


Рис. 1. Образцы ткани в исходном состоянии: а – «Аркадия»; б – «Грэта»; в – «Сису»

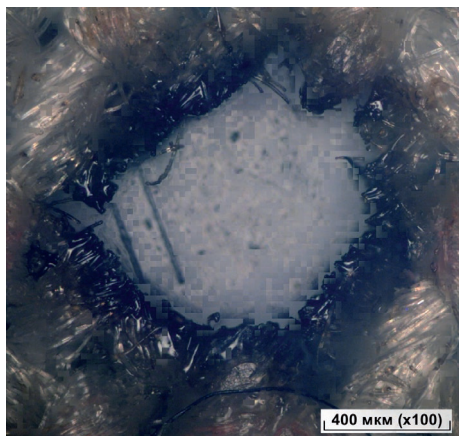
Лазерное воздействие на тканые материалы проводили до формирования сквозного отверстия. Анализировали размеры отверстия и зону изменений вокруг него. Параметры воздействия и размеры зоны поражения приведены в таблице.

На рис. 2 показаны результаты лазерной перфорации ткани «Аркадия». Длина и ширина отверстия после лазерного воздействия при вложенной энергии 15 Дж составляет примерно 0,9 и 0,8 мм, а при вложенной энергии 25 Дж – примерно 1,0 и 1,8 мм, зона оплавления краев волокон при больших энергетических воздействиях расширяется.

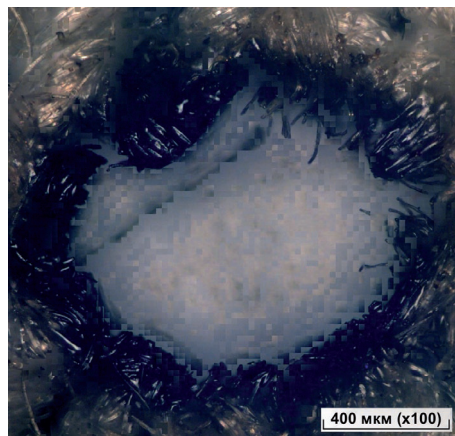
При воздействии на ткань «Аркадия» с энергией 15 Дж наблюдается оплавление концов волокон полиэстра, капли расплава не образуются (рис. 3). При повышении энергии до 25 Дж (рис. 4) наблюдается образование капельной фазы (полиэстр). Для волокон хлопка характерно обугливание и слипание.

Режимы лазерного воздействия и площади поражения тканей

Ткань	Вложенная энергия, Дж	Время воздействия, с	Площадь зоны разрушения, мкм ²	Площадь зоны термического влияния, мкм ²	Площадь зоны термического влияния / площадь зоны разрушения
«Аркадия»	15	15	508 609	527 743	1,04
	25	25	665 448	633 912	0,95
«Сису»	15	15	376 148	922 415	2,45
	25	25	565 706	924 605	1,63
«Грэта»	20	20	–	–	–
	30	30	569 550	918 404	1,61



а



б

Рис. 2. Разрушение ткани «Аркадия»:

а – вложенная энергия 15 Дж, время воздействия 15 с; б – вложенная энергия 25 Дж, время воздействия 25 с

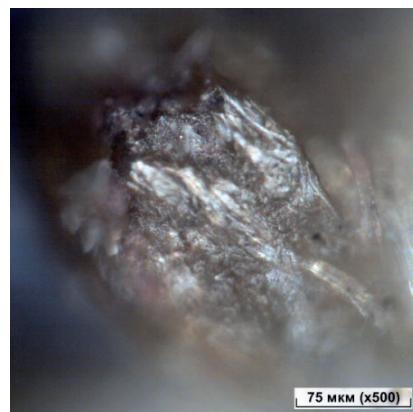
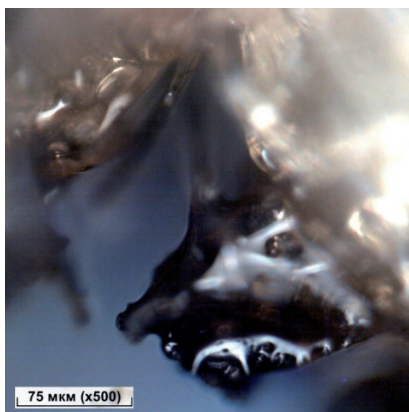
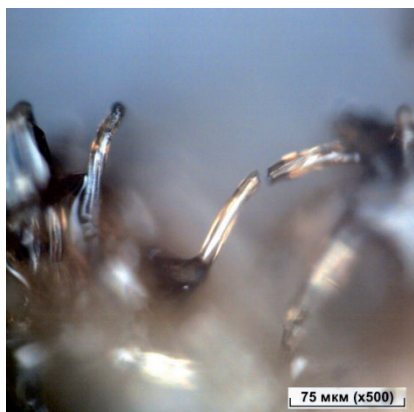


Рис. 3. Волокна ткани «Аркадия» в зоне разрушения: вложенная энергия 15 Дж, время воздействия 15 с

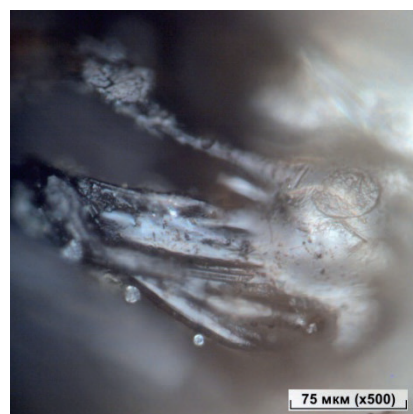
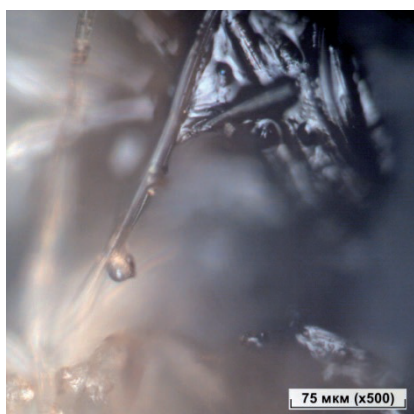
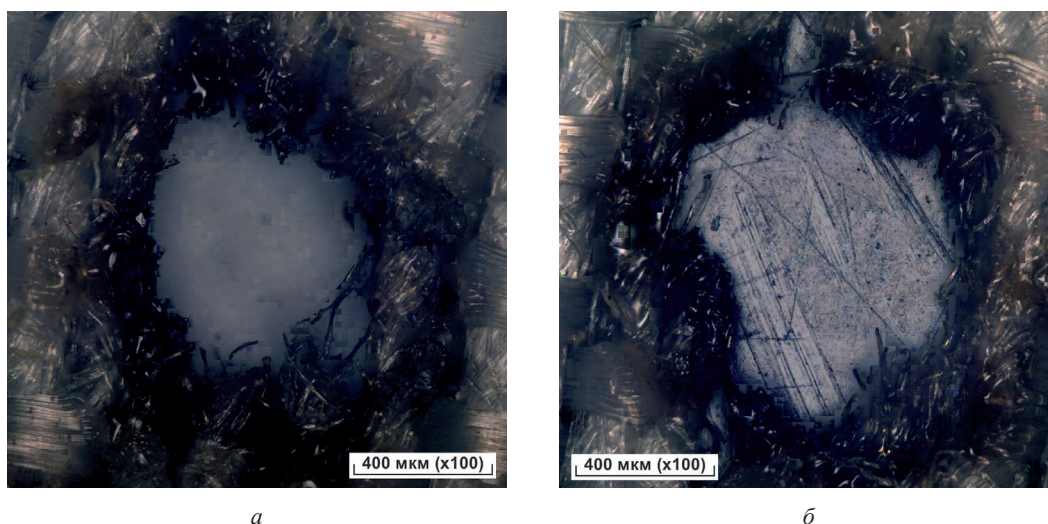


Рис. 4. Волокна ткани «Аркадия» в зоне разрушения: вложенная энергия 25 Дж, время воздействия 25 с



а

б

Рис. 5. Разрушение ткани «Сису»:

а – вложенная энергия 15 Дж, время воздействия 15 с; б – вложенная энергия 25 Дж, время воздействия 25 с

Для ткани «Сису» картины трансформации волокон при различных режимах лазерного воздействия аналогичны (рис. 6, 7). При меньшей энергии слипание не так интенсивно. Волокна обугливаются по отдельности. Капельная фаза не наблюдается. Заметны следы кипения (пузыри). При вложенной энергии 25 Дж наблюдается (рис. 7) обугливание, аналогичное таковому на ткани «Грэта» около отверстия. Наблюдаются следы кипения и достаточно сильное слипание обугленных волокон.

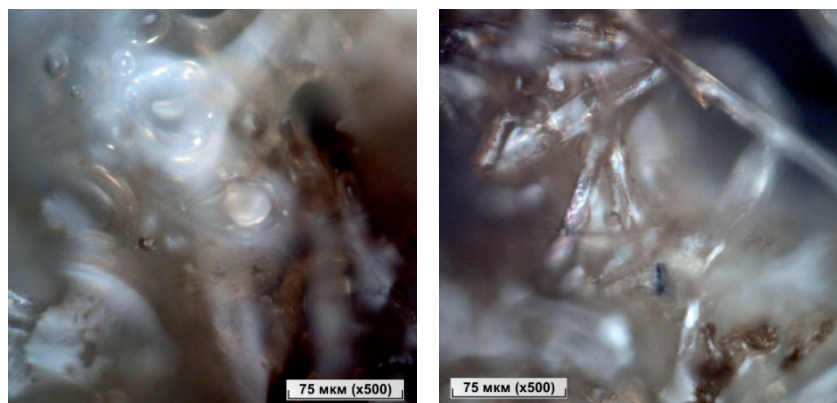


Рис. 6. Волокна ткани «Сису» в зоне разрушения: вложенная энергия 15 Дж, время воздействия 15 с

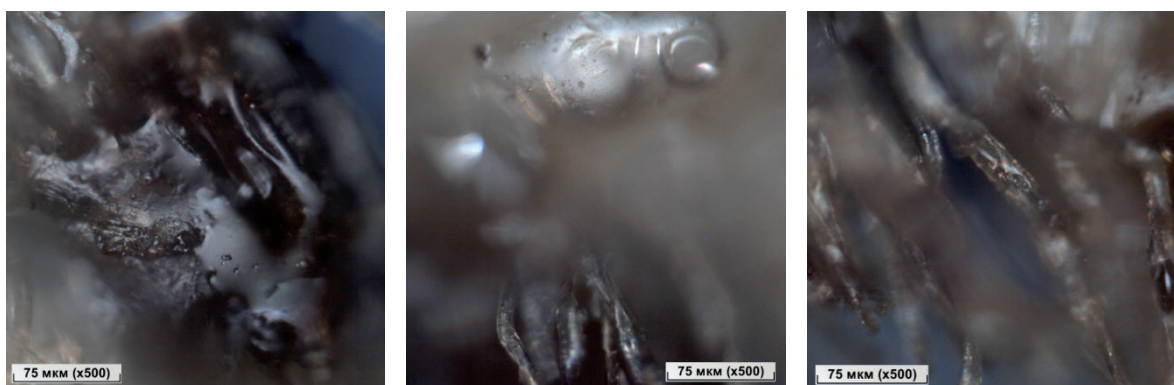


Рис. 7. Волокна ткани «Сису» в зоне разрушения: вложенная энергия 25 Дж, время воздействия 25 с

На рис. 8 представлена морфология поверхности ткани «Грэта» после лазерного воздействия. На рис. 8, а фиксируется начало процесса перфорации ткани, заметен разрыв волокон и их оплавление на концах. Диаметр отверстия после лазерного воздействия (рис. 8, б) при вложенной энергии 30 Дж и времени воздействия 30 с составляет примерно 0,9 мм в длину, края волокон оплавлены.

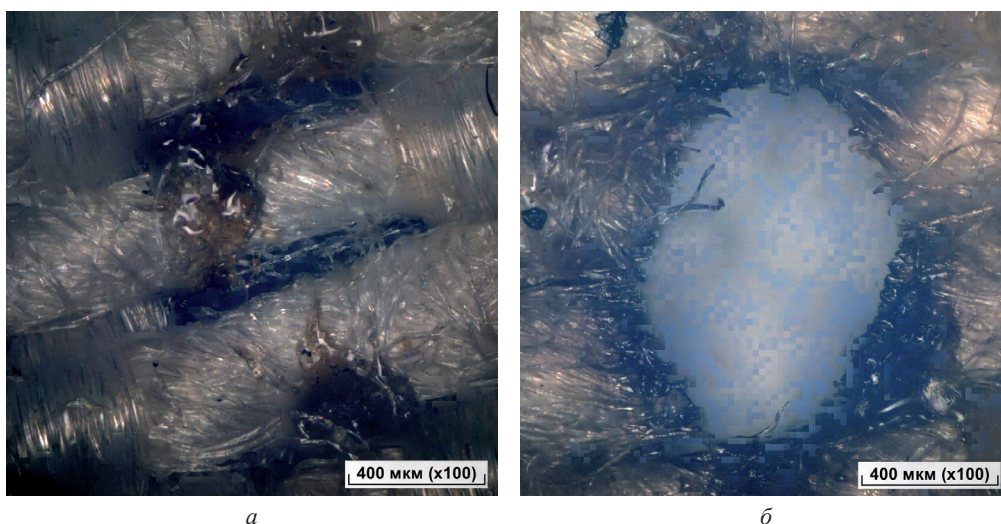


Рис. 8. Структура разрушенного участка ткани «Грэта»:

а – вложенная энергия 20 Дж, время воздействия 20 с; *б* – вложенная энергия 30 Дж, время воздействия 30 с

На рис. 9 показана картина трансформации ткани «Грэта» при вложенной энергии 20 Дж. Происходит интенсивное образование капель, наблюдается картина течения материала. Капли в отличие от ткани «Аркадия» круглые и более крупные. При вложенной энергии 30 Дж происходит обугливание, причем множественное, всех волокон. Наблюдается формирование «плоских поверхностей» из обугленного материала и образование крупных капель.

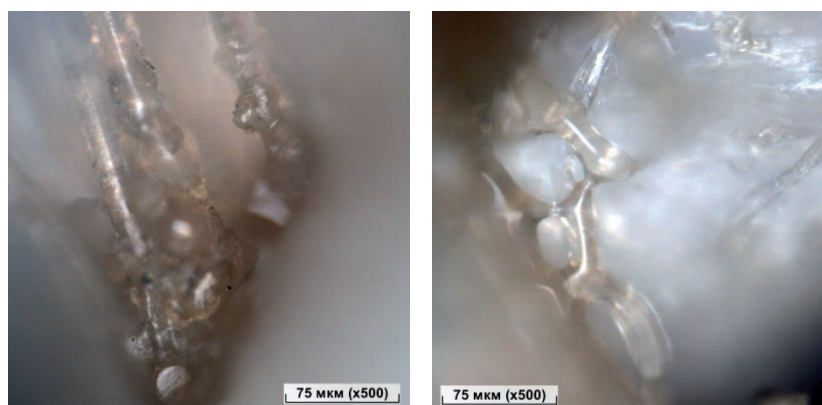


Рис. 9. Волокна ткани «Грэта» в зоне разрушения; вложенная энергия 20 Дж, время воздействия 20 с

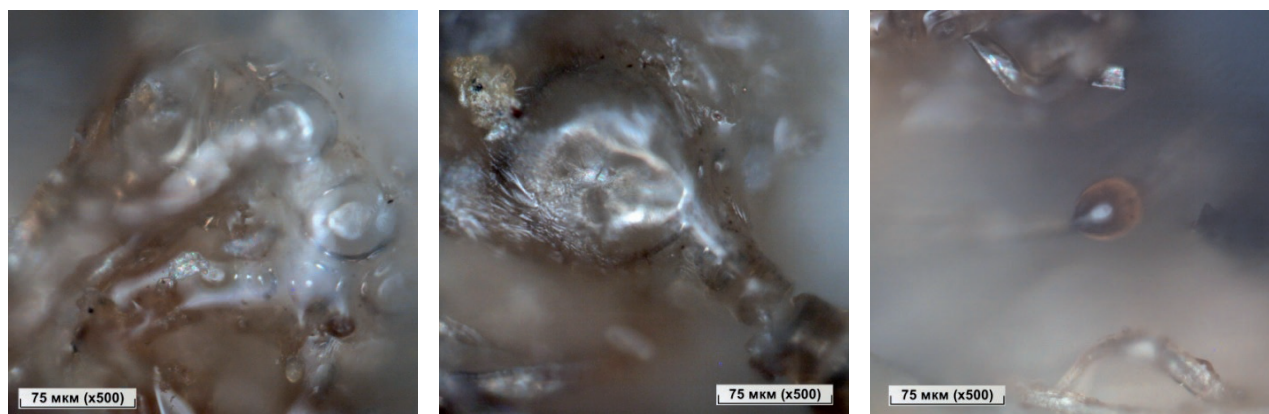


Рис. 10. Волокна ткани «Грэта» в зоне разрушения: вложенная энергия 30 Дж, время воздействия 30 с

На рис. 11, 12 представлены маски обнаружения объектов, сделанные в программе обработки изображений IMAGE SP для определения площадей пораженных участков тканей (зона разрушения – желтый, зона обугливания – красный). Результаты количественного анализа приведены в таблице.

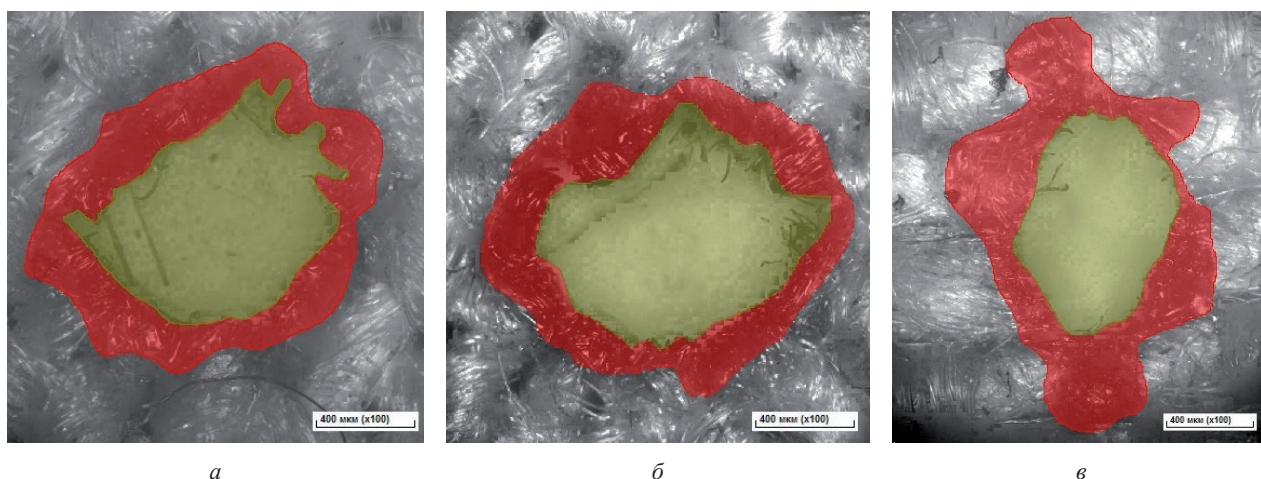


Рис. 11. Маски обнаружения объектов: *а, б* – ткань «Аркадия»; *а* – вложенная энергия 15 Дж, время воздействия 15 с; *б* – вложенная энергия 25 Дж, время воздействия 25 с; *в* – ткань «Грэта», вложенная энергия 30 Дж, время воздействия 30 с

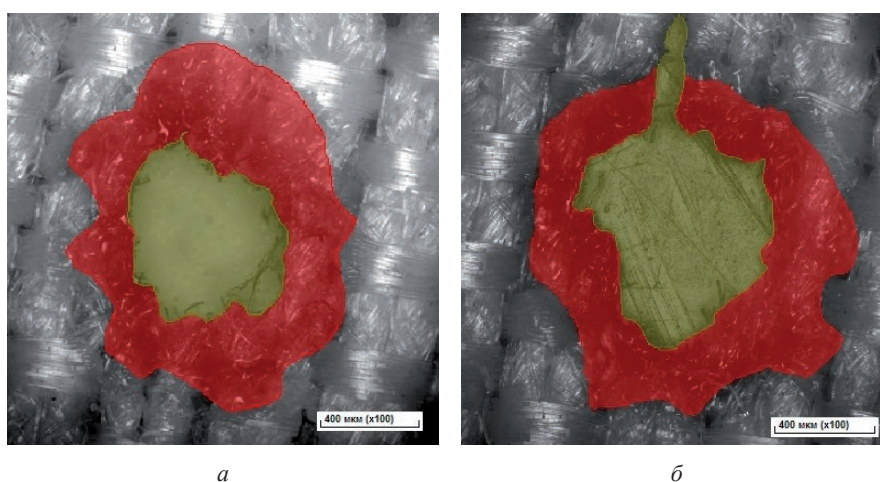


Рис. 12. Маски обнаружения объектов, ткань «Сису»: *а* – вложенная энергия 15 Дж, время воздействия 15 с; *б* – вложенная энергия 25 Дж, время воздействия 25 с

Зона полного разрушения больше для ткани «Аркадия», чем для ткани «Сису» при обоих режимах лазерного воздействия. Увеличение энергии воздействия сильнее сказывается на ткани «Сису»: площадь разрушенного участка увеличивается в 1,5 раза для ткани «Сису», для ткани «Аркадия» – в 1,3 раза. Для ткани «Грэта» зона полного разрушения практически такая же, как и для ткани «Сису» (при 25 Дж), но вложенная энергия при этом составляет 30 Дж. Энергии в 20 Дж недостаточно для разрушения ткани «Грэта».

При повышении энергии воздействия зона термического влияния (обугливание) для ткани «Аркадия» увеличивается в 1,2 раза. Для ткани «Сису» зона термического влияния практически не изменяется, но по площади она существенно больше, чем для ткани «Аркадия».

При повышении вложенной энергии доля зоны термического влияния снижается для ткани «Сису» и весьма незначительно для ткани «Аркадия».

Выводы

1. Проведенные исследования в определенном диапазоне вложенных энергий и времен воздействия на смесовые ткани разного переплетения и состава позволили определить физические условия для деструкции тканей, что может быть использовано в процессах перфорации и режимов маркировки.

2. Показана возможность использования лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующем в двухимпульсном режиме, для маркировки тканей «Сису», «Грэта», «Аркадия».

3. Показано, что в наибольшей степени под воздействием лазера разрушается ткань «Аркадия», но зона термического влияния (обугливание) больше для тканей «Сису» и «Грэта».

4. На повышение энергии воздействия в большей степени реагирует ткань «Сису», для которой площадь разрушения существенно увеличивается с повышением энергии воздействия. Для ткани «Аркадия» повышение энергии воздействия с 15 до 25 Дж не приводит к существенному повышению площади поражения.

5. Для ткани «Грэта» (ткань саржевого переплетения) вложенная энергия для перфорации ткани выше, чем для тканей с полотняным переплетением. Также на результат может влиять тот факт, что ткань содержит наибольшее количество натуральной компоненты (хлопок).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
2. **Анисимов, С. И.** Избранные задачи теории лазерной абляции / С. И. Анисимов, Б. С. Лукьянчук // УФН. – 2002. – Т. 172, № 3. – С. 301–333.
3. **Толстопятов, Е. М.** Лазерная абляция полимеров / Е. М. Толстопятов // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 6–20.
4. **Маркевич, М. И.** Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Вестні НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 28–34.
5. Синтез наноструктур фосфида индия методом импульсной лазерной абляции мишени InP в водной среде / А. П. Ласковнев [и др.] // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2024. – № 2. – С. 162–167.
6. Лазерная диагностика поверхности композиционного материала на основе смесовой ткани и циркония после эксплуатации в экстремальных условиях / А. П. Ласковнев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2024. – № 2. – С. 3–7.
7. Воздействие лазерного излучения на композиционные материалы на основе лавсановых тканей и углерода / А. П. Ласковнев [и др.] // Композиционные материалы на основе техногенных отходов и местного сырья: состав, свойства и применение: материалы конф. – Ташкент, 2021. – С. 30–31.
8. **Анисович, А. Г.** Практика металлографического исследования материалов / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 221 с.
9. Лазерный нагрев и разрушение материалов: учеб. пособие / под общ. ред. В. П. Вейко. – СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 181 с.

REFERENCES

1. **Panchenko V. Ya.** (ed.) *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nyh issledovaniy i prikladnyh razrabotok* [Laser technologies for materials processing: modern problems of fundamental research and applied developments]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 664 p.
2. **Anisimov S. I., Luk'yanchuk B. S.** Izbrannyye zadachi teorii lazernoj ablyacii [Selected problems of laser ablation theory]. *UFN = Physics-Uspekhi*, 2002, vol. 172, iss. 3, pp. 301–333.
3. **Tolstopyatov E. M.** Lazernaya ablyaciya polimerov [Laser ablation of polymers]. *Polimernyye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 6–20.
4. **Markevich M. I., Chaplanov A. M.** Strukturnyye prevrashcheniya v tonkih metallicheskih plenках pri impul'snom lazernom vozdeystvii [Structural transformations in thin metal films under pulsed laser irradiation]. *Vesci Natsyonal'noj akademii navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 28–34.
5. **Laskovnyov A. P., Markevich M. I., Shcherbakova E. N.** [et al.] Sintez nanostruktur fosfida indiya metodom impul'snoy lazernoj ablyacii misheni InP v vodnoy srede [Synthesis of indium phosphide nanostructures by pulsed laser ablation of an InP target in an aqueous medium]. *Vestnik Fonda fundamental'nyh issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, 2024, no. 2, pp. 162–167.
6. **Laskovnyov A. P., Markevich M. I., Anisovich A. G.** [et al.] Lazernaya diagnostika poverhnosti kompozitsionnogo materiala na osnove smesovoy tkani i cirkoniya posle ekspluatatsii v ekstremal'nykh usloviyakh [Laser diagnostics of the surface of a composite material based on mixed fabric and zirconium after operation under extreme conditions]. *Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika = Non-destructive testing and diagnostics*, 2024, no. 2, pp. 3–7.
7. **Laskovnyov A. P., Anisovich A. G., Markevich M. I.** [et al.] Vozdeystvie lazernogo izlucheniya na kompozitsionnye materialy na osnove lavsanovykh tkaney i ugleroda [The effect of laser radiation on composite materials based on lavsan fabrics and carbon]. *Kompozitsionnye materialy na osnove tekhnogennykh othodov i mestnogo syr'ya: sostav, svoystva i primeneniye: materialy konf. = Composite materials based on man-made waste and local raw materials: composition, properties and application: conf.* Tashkent, 2021, pp. 30–31.
8. **Anisovich A. G., Rumyantseva I. N.** *Praktika metallograficheskogo issledovaniya materialov* [Practice of metallographic study of materials]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013, 221 p.
9. **Veiko V. P.** (ed.) *Lazernyy nagrev i razrusheniye materialov: ucheb. posobie* [Laser heating and destruction of materials: text-book]. St. Petersburg, National Research University ITMO, 2014, 181 p.