

УДК 621.98.044.7

А. М. Милокова, кандидат технических наук, доцент,
А. В. Алифанов, доктор технических наук, профессор,
В. С. Голубев, кандидат технических наук, доцент,
А. А. Лях,
О. А. Толкачева,
А. Н. Матяс

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 367 60 10, +375 (17) 361 55 52, priemnaya@phti.by, milykova@phti.by

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТОК

Проведены исследования механических свойств образцов двух марок сталей до и после проведения комбинированной упрочняющей обработки. Она состояла последовательно из термической, лазерной и магнитно-импульсной обработок при различных технологических режимах. Показано, что комбинация из упрочняющих методов при определенных параметрах режимов позволяет улучшить механические свойства поверхности (твердость, износостойкость, суммарные макронапряжения) и микроструктуру конструкционной и инструментальной стали. Применение различных параметров лазерной обработки показало, что точный контроль параметров лазера (мощность, скорость сканирования и перекрытие луча) имеет решающее значение для достижения желаемого результата упрочнения.

Ключевые слова: комбинированная обработка; лазер; магнитно-импульсное поле; сталь 45; сталь X12M; образцы; технологический режим; энергия; импульс; скорость луча; мощность; микроструктура; фазовые превращения; упрочнение.

Рис. 7. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

A. M. Miliukova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. V. Alifanov, DSc in Technical Sciences, Professor,
V. S. Golubev, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. A. Lyakh,
O. A. Tolkachova,
A. N. Matsias

State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus",
10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus,
+375 (17) 367 60 10, +375 (17) 361 55 52, priemnaya@phti.by, milykova@phti.by

IMPROVING THE PROPERTIES OF STEEL BY COMBINING LASER AND MAGNETIC PULSE TREATMENTS

An investigation into the mechanical properties of two steel grades, prior to and following a combined hardening treatment was conducted. The treatment sequence involved thermal, laser and magnetic-pulse treatments, utilising distinct technological modes. The findings demonstrate that the integration of hardening methodologies at specific parameter values enables the enhancement of the mechanical properties of the surface (hardness, wear resistance, total macro stresses) and the microstructure of structural and tool steel. The application of diverse laser processing parameters has demonstrated that precise control of laser parameters (power, scanning speed and beam overlap) is paramount to achieving the desired result of hardening.

Key words: combined treatment; laser; magnetic-pulse field; steel 45; steel X12M; samples; technological mode; energy; pulse; beam speed; power; microstructure; phase pre-turns; hardening.

Fig. 7. Table 2. Ref.: 2 titles.

Введение. Специалистами государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» и учреждения образования «Барановичский государственный университет» разработан комбинированный метод упрочнения

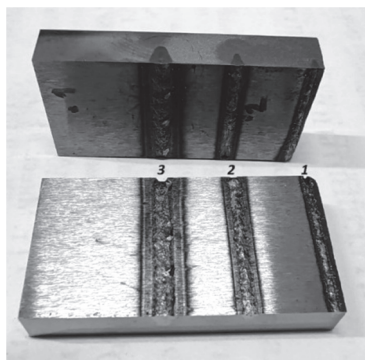
поверхности стальных деталей, включающий кроме традиционной термической дополнительно лазерную обработку и инновационную финишную технологию воздействия электромагнитным импульсным полем — магнитно-импульсную обработку (далее — МИО).

Повышение качества и долговечности выпускаемой предприятиями Беларуси продукции до уровня мировых стандартов требует совершенствования существующих и создания новых технологий, что является одной из актуальных задач науки в производстве. В настоящее время к технологиям предъявляются особые требования по экологичности, ресурсосбережению и др. Проведенные аналитические исследования особенностей термической, лазерной обработок и МИО в целях улучшения эксплуатационных характеристик стальных изделий выявили достоинства и недостатки каждой из них. Широкое применение имеет термическая обработка (ТО): практически все изделия в парах трения или работающих при больших нагрузках, имеющих в том числе ударный характер, как правило, подвергаются поверхностной или объемной ТО. Однако очень часто этого бывает недостаточно для получения необходимых эксплуатационных характеристик изделия, в связи с чем требуется дополнительно применять другие методы создания модифицированных слоев, улучшающих свойства термообработанных поверхностей.

Точный контроль параметров лазера, таких как мощность, скорость сканирования и перекрытие луча, имеет решающее значение для достижения желаемых результатов лазерной обработки [1]. Для высокоэффективной работы необходимы квалифицированные операторы и современные системы мониторинга процесса. Лазерная закалка уменьшает зоны термического влияния по сравнению с традиционными методами, но все же существует риск микроструктурных изменений или нежелательного влияния на свойства материала, например, расплав поверхностного слоя и разупрочнение. Тщательный контроль параметров лазера необходим для минимизации этих рисков. Закалка может составлять от нескольких десятков микрометров до нескольких миллиметров. Этого может быть недостаточно для определенных применений, требующих глубокой закалки материала. Для достижения требуемой глубины могут потребоваться альтернативные методы, такие как науглероживание или азотирование. Из-за быстрого нагрева при лазерной закалке существует риск перегрева, если параметры лазера не контролируются должным образом. Это может привести к повреждению детали и снижению производительности. Лазерная закалка более всего подходит для деталей малого и среднего размеров и наиболее целесообразна для локальной закалки определенных участков. Процесс может быть также эффективным, но зачастую более трудоемким для крупногабаритных деталей. В некоторых случаях процесс лазерной закалки может привести к неравномерному упрочнению по всей обрабатываемой поверхности. Это может быть вызвано изменением мощности излучения в процессе обработки, поглощающих свойств материала или несоответствием траектории сканирования лазерного луча.

При воздействии МИО на сталь уплотняются дефекты в кристаллической решетке, снижаются растягивающие или становятся сжимающими суммарные макронапряжения второго рода, измельчается и становится более однородной структура металла [2]. Известно, что под воздействием МИО на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной до 50...300 мкм. Преимуществом МИО по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры не меняются, шероховатость поверхности упрочненных изделий может улучшиться, не требуются дополнительные финишные операции, сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Материалы и методы исследования. Для проведения экспериментальных исследований возможности нивелировать недостатки лазерного воздействия путем МИО были изготовлены образцы размером $30 \times 40 \times 5$ мм из сталей 45 и X12M. Образцы из стали 45 были в состоянии поставки твердостью HRB 85...87 (сталь незакаленная), сталь X12M — с твердостью HRB 107.



1 — 8,3 см / с; 2 — 4,6 см / с;
3 — 1,7 см / с

Рисунок 1. — Внешний вид образца стали 45 после обработки лазером мощностью 2 кВт с разными скоростями сканирования лазерного луча

В ФТИ НАН Беларуси разработаны и использованы для проведения экспериментов магнитно-импульсные установки (МИУ-3, МИП-18 и др.) с различными технологическими возможностями, предназначенные для обработки металлических изделий импульсным электромагнитным полем различной напряженности и длительности. Лазерную обработку проводили на имеющемся в институте комплексе поверхностной локальной термообработки МЛ35-ПО, в котором применяется иттербиевый волоконный лазер с номинальной выходной мощностью 2 кВт.

Суммарные остаточные макронапряжения второго рода и структурно-фазовый состав определяли методом рентгеновского структурного анализа с помощью дифрактометра GNR Explorer (Италия) при $\text{CuK}\alpha$ -излучении, шаге съемки $0,20^\circ$, времени интеграции 3 с. Твердость поверхности измеряли по стандартным методикам: HRB — на твердомере AFFRI URBV-VRS, HV 0,1 — на компьютеризированном микротвердомере Duramin с погрешностью 15 абсолютных единиц. Металлографические исследования изменений микроструктуры образцов проводили на оптическом металлографическом

комплексе МГК-1. Испытания на износостойкость проводили на трибометре J&L TECH JLTB-02.

Результаты исследования и их обсуждение. Подготовленные образцы исследованы в исходном состоянии, затем их подвергли обработке лазером мощностью 2 кВт по трем режимам (рисунок 1) и измерили твердость. На поверхности образца стали 45 видны три дорожки различной ширины и глубины воздействия, которые сделаны с разной скоростью сканирования лазерного луча: у дорожки 1 самая малая глубина — 0,5 мм, твердость HRB 120; у дорожки 2 — средняя глубина — 1,5 мм, твердость HRB 100...122, у дорожки 3 — самая большая глубина — 3 мм, твердость HRB 104...109.

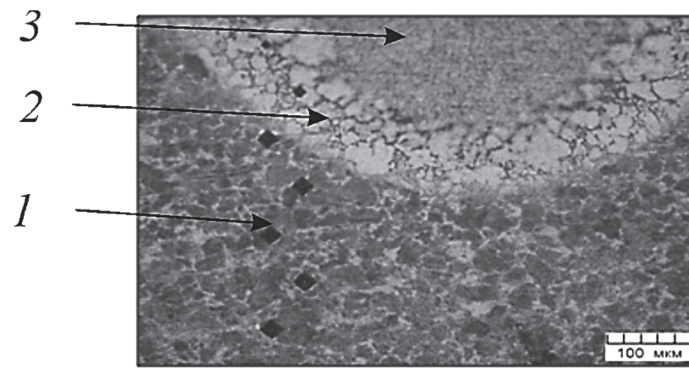
После лазерной обработки образцы подвергли МИО с помощью высокоскоростной установки МИУ-3 на плоском индукторе диаметром 140 мм при частоте 6,8 кГц по режиму 2 импульса с энергией 10 кДж. Полученные результаты измерений сведены в таблицу 1.

Данные по остаточным суммарным макронапряжениям II рода после обработки лазером по сравнению с исходными данными до обработки показали, что из растягивающих они стали сжимающими, но не существенно. После МИО величина сжимающих остаточных напряжений возрастает. После обработки лазером твердость поверхности возросла, а после МИО по выбранному режиму твердость снизилась в пределах погрешности измерений, при этом увеличилась пластичность, что увеличивает прочность изделий при ударных нагрузках.

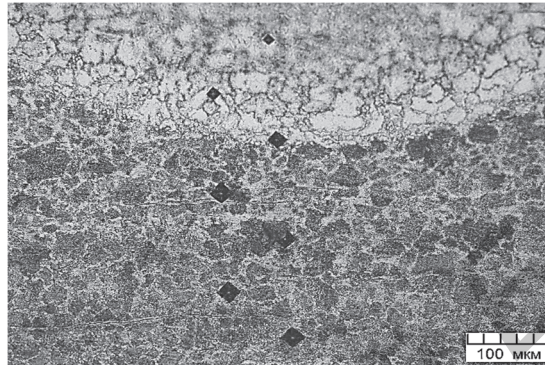
Проведены металлографические исследования образцов из стали 45 после лазерной обработки (рисунок 2, а, б) и после комбинированной: лазерная с последующей МИО (рисунок 3). На рисунке 2, а, видна исходная структура основы 1, далее идет закаленный слой 2, а за ним следует слой после расплавления 3. Лазерная обработка привела к трансформации и аустенитно-мартенситным превращениям структуры. Отпечатки при измерении твердости показывают, как изменяется твердость закаленного слоя от основы к поверхности.

Таблица 1. — Значения твердости и макронапряжений образца стали 45 при различных видах обработки

Измеряемые свойства	Виды обработки		
	без обработки	лазерная	лазер и МИО
Твердость HRB средняя	85...87	100...122	90...120
Остаточные макронапряжения II рода, ГПа, средние значения	0,4	-0,5	-0,85



а)



б)

Рисунок 2. — Структура контрольного образца из стали 45 после лазерной обработки

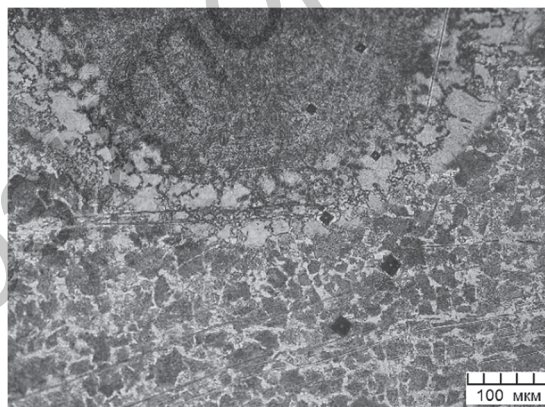


Рисунок 3. — Структура образца из стали 45 после лазерной обработки и МИО

На рисунке 3 представлена структура стали после комбинированной обработки: лазерная обработка и МИО. На фотографии видно, что структура закаленного слоя, более проработанная и равномерная, и твердость ее выше, чем твердость оплавленного слоя.

Металлографические исследования шлифов образцов стали 45 показали, что комбинирование лазерной обработки и МИО приводит к некоторой трансформации структурных элементов поверхностного слоя и изменениям кинетики процесса перлитно-аустенитного превращения, что, в свою очередь, может способствовать улучшению физических и механических свойств стали.

После воздействия лазера произошло изменение свойств поверхности образцов в зависимости от интенсивности лазерного излучения. После МИО по выбранному режиму твердость поверхности несколько снизилась, при этом увеличилась пластичность, что в итоге увеличивает прочность изделия. После обработки лазером остаточные макронапряжения II рода поменяли свой характер и из растягивающих стали сжимающими. После МИО величина сжимающих остаточных напряжений возрастает. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что комбинированная обработка стальных образцов методами лазерной обработки, а затем МИО улучшает эксплуатационные свойства поверхностного слоя изделия (прочность, износостойкость, работоспособность).

На рисунке 4 представлены зависимости микротвердости HV 0,1 в поперечном разрезе образца стали 45 при воздействии лазерного луча, который перемещается по поверхности образца со скоростью 8,3 см / с и последующей МИО. То, что кривые, соответствующие разным режимам обработки, расположены на одном графике, позволяет наглядно определить увеличение твердости в зоне лазерной обработки после МИО на глубину до 400 мкм.

На рисунке 5 представлены графики определения микротвердости HV 0,1 в поперечном разрезе стали 45 при воздействии лазерного луча, который перемещается по поверхности образца со скоростью 4,2 см / с, а также графики, полученные при исследовании твердости после МИО. На графиках видно, что твердость закаленной зоны возрастает после МИО на глубине 200 мкм и сравнивается с твердостью после лазерной обработки при глубине 270 мкм.

На рисунке 6 представлены графики определения твердости HV 0,1 в поперечном разрезе стали 45 при воздействии лазерного луча, который перемещается по поверхности образца со скоростью 1,7 см / с, а также графики, полученные при исследовании твердости после МИО. На графиках видно, что твердость закаленной зоны не изменяется после МИО на всей глубине закаленной зоны от 200 до 400 мкм и равна твердости после лазерной обработки при всей глубине измерений.

Из полученных графиков можно сделать вывод, что при большой скорости перемещения лазерного луча не происходит сильное оплавление металла, в зоне закалки увеличивается микротвердость по сравнению с исходным материалом, а при комбинированном упрочнении (лазер и МИО) микротвердость увеличивается до 70 % по сравнению с лазером, но при этом не появляются растягивающие макронапряжения.



Рисунок 4. — Результаты измерений микротвердости стали 45 после лазерной обработки со скоростью 8,3 см / с и МИО, дорожки на образцах 1.1 (лазер и МИО) и 2.1 (лазер)

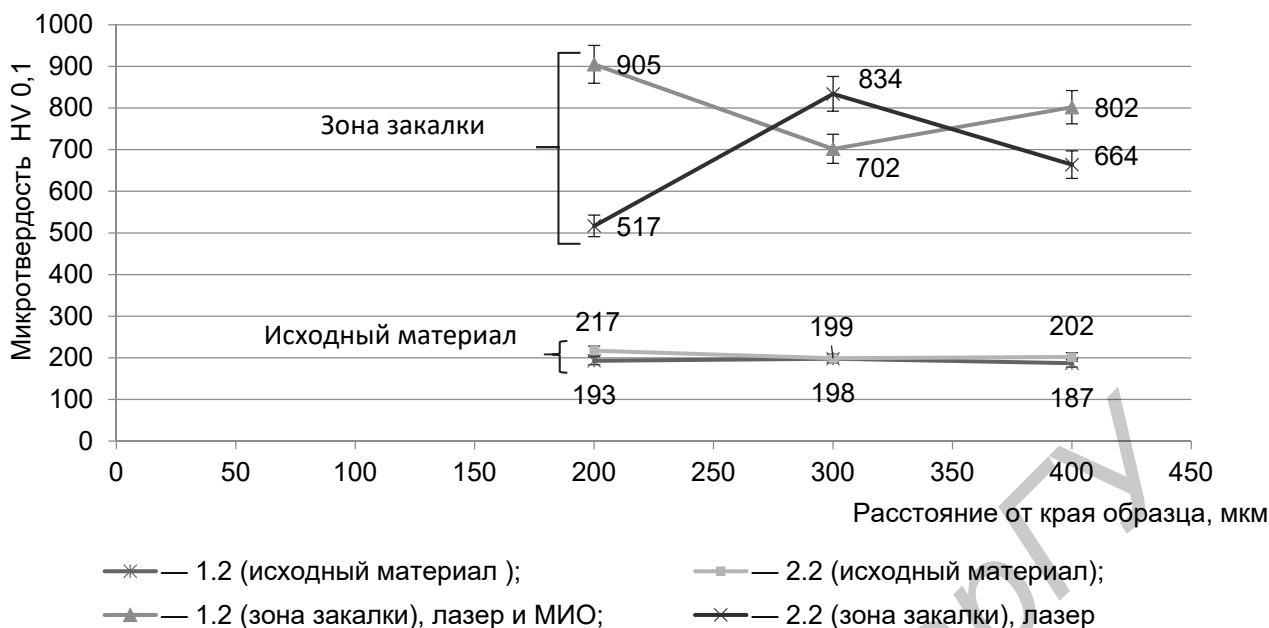


Рисунок 5. — Результаты измерений микротвердости стали 45 после лазерной обработки со скоростью 4,2 см / с и МИО, дорожки 1.2 (лазер и МИО) и 2.2 (лазер)



Рисунок 6. — Результаты измерений микротвердости HV 0,1 стали 45 после лазерной обработки со скоростью 1,7 см / с и МИО, дорожки 1.3 (лазер и МИО) и 2.3 (лазер)

Проведены также исследования твердости и макронапряжений II рода на поверхности образца инструментальной стали X12M после комбинированной обработки. Металлографические и дюраметрические исследования показали, что после лазерной обработки с максимальной скоростью 8,3 см / с не произошла трансформация структуры, твердость поверхности образцов не изменилась.

МИО производилась на МИУ-3 на плоском индукторе по экспериментальному режиму с энергией 7 кДж. После каждой обработки измерялись твердость и остаточные макро-напряжения. Полученные средние значения сведены в таблицу 2.

Таблица 2. — Средние значения характеристик стали X12M

Измеряемые свойства материала	Начальные	После лазерной обработки	После лазерной обработки и МИО
Твердость HRB средняя	107	107	106...107
Остаточные макронапряжения II рода, ГПа, средние значения	-0,57	0,49	0,35

После МИО по выбранному режиму твердость поверхности в зоне лазерной дорожки также не изменилась. После обработки лазером у стали X12M макронапряжения изменили знак: из сжимающих стали растягивающими.

В целях определения влияния упрочняющих технологий на свойства стали на машине трения проведены лабораторные сравнительные трибологические испытания образцов инструментальной стали X12M в исходном состоянии и после комбинированной обработки лазером и МИО на воздухе в паре трения. Параметры трибосопряжений в узле трения: неподвижный элемент — плоский стальной образец в паре с подвижным элементом — шарообразным контртелом из стали ШХ15 с нагрузкой 3 Н в течение 3 ч со скоростью 172 мм / с при комнатной температуре. При указанных условиях контртело проделало путь 650 м и получило одинаковый износ в виде площадки. На неподвижных плоских стальных образцах образовались дорожки траекторий изнашивания поверхности.

Результаты испытаний в виде графиков, показанные на рисунке 7, демонстрируют стабилизацию коэффициента трения и повышение его значения до 0,3 на образце после комбинированной обработки в сравнении с 0,2...0,25 на необработанном образце. Приработка образцов после комбинированной обработки произошла в 4 раза быстрее.

Заключение. Проведенные исследования влияния комбинированной обработки лазером и магнитным импульсным полем на механические свойства поверхности сталей 45 и X12M показали, что МИО после лазерной обработки, благодаря электродинамическим силам и возникновению высоких давлений на поверхности образцов, приводит к релаксации суммарных макронапряжений, повышению твердости поверхности. Установлено, что комбинирование лазерной обработки и МИО приводит к некоторой трансформации структурных элементов поверхностного слоя и изменениям кинетики процесса перлитно-аустенитного превращения, что способствует улучшению физических и механических свойств конструкционной и инструментальной сталей.

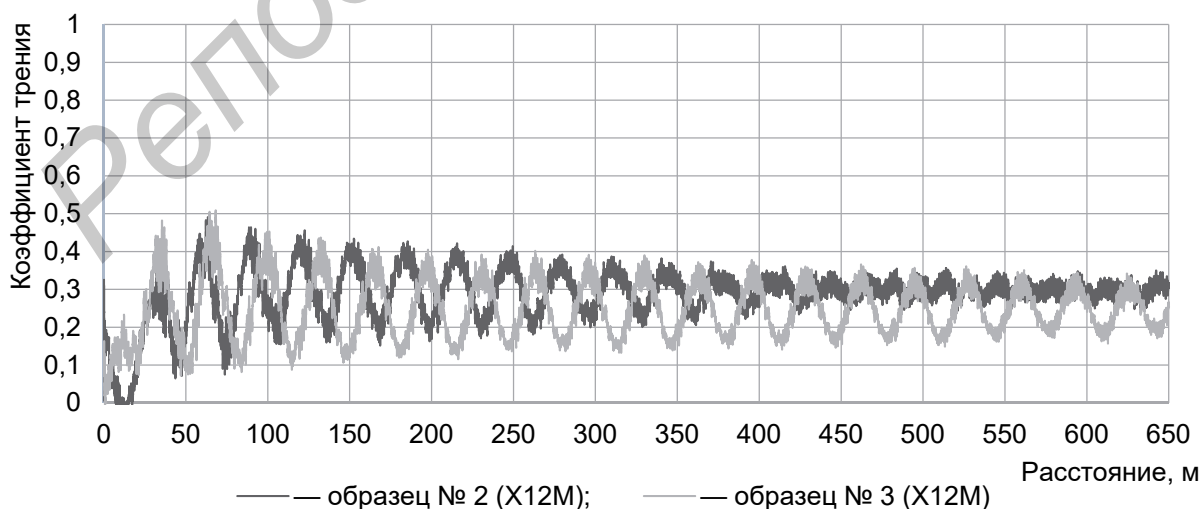


Рисунок 7. — Результаты трибологических сравнительных испытаний образцов стали X12M: № 2 — образец стали после комбинированной обработки; № 3 — исходный образец без обработки

Проведенные лабораторные сравнительные трибологические испытания образцов инструментальной стали X12M показали стабилизацию, повышение коэффициента трения и снижение в 4 раза времени приработки. Применение различных параметров лазерной обработки показало, что точный контроль параметров лазера (мощность, скорость сканирования и перекрытие луча) имеет решающее значение для достижения желаемого результата упрочнения.

Научная значимость результатов заключается в разработке нового метода с оптимальными параметрами режимов комбинации лазерной обработки и МИО на основе выбора скоростных режимов сканирования лучом лазера, а также энергии и длительности МИО.

Полученные результаты позволяют рекомендовать комбинацию лазерной обработки и высокоскоростной МИО конструкционной и инструментальной сталей в целях повышения их эксплуатационных свойств. Целесообразно также продолжить изучение влияния вышеприведенных методов упрочнения на других марках стали.

Список цитируемых источников

1. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.

2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, А. Н. Матяс [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2021. — Кн. 1 : Новые технологии и материалы / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — С. 127—153.

Поступила в редакцию 08.04.2025.