

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.7.02

doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-63-68

## ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

Рафик Хайдарович Рафиков<sup>1✉</sup>, Кирилл Игоревич Лебедев<sup>2</sup>, Игорь Валентинович Лебедев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АНО «Инновационный инжиниринговый центр», Москва, Россия

<sup>2,3</sup> «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), Москва, Россия

<sup>1</sup> rafis-89@mail.ru

<sup>2</sup> Nafanya-feniks@yandex.ru

<sup>3</sup> lebedev138@mail.ru

### Аннотация

Работа посвящена анализу существующих методов диагностики процесса лазерного термоупрочнения поверхности, определения наиболее эффективного из них и выбору информативных параметров диагностики лазерной обработки поверхностей деталей. В качестве новизны исследований можно отметить преимущества метода аку-

стической эмиссии (АЭ) для диагностики лазерного поверхностного термоупрочнения. В результате сформулированы информативные параметры на базе метода акустической эмиссии.

**Ключевые слова:** упрочнение, эмиссия, математическая модель, параметры, анализ, диагностика, методы, процесс.

Ссылка для цитирования:

Рафиков Р.Х. Диагностика процесса лазерной обработки бандажей колесных пар / Р.Х. Рафиков, К.И. Лебедев, И.В. Лебедев // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 5. – С.63-68. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-63-68.

Original article

Open Access Article

## DIAGNOSTICS OF LASER PROCESSING OF WHEELSET TIRES

Rafik Haidarovich Rafikov<sup>1✉</sup>, Kirill Igorevich Lebedev<sup>2</sup>, Igor Valentinovich Lebedev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Innovative Engineering Center, Moscow, Russia

<sup>2,3</sup> Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russia

<sup>1</sup> rafis-89@mail.ru

<sup>2</sup> Nafanya-feniks@yandex.ru

<sup>3</sup> lebedev138@mail.ru

### Abstract

The paper is devoted to the analysis of existing methods for diagnosing laser thermal surface hardening, determining the most effective of them and choosing informative diagnostic parameters for laser surface processing of parts. The advantages of acoustic emission (AE) method for the diagnostics of surface ther-

mal hardening can be noted as a novelty of the study. As a result, informative parameters based on the acoustic emission method are formulated.

**Keywords:** hardening, emission, mathematical model, parameters, analysis, diagnostics, methods, process.

Reference for citing:

Rafikov RH, Lebedev KI, Lebedev IV. Diagnostics of laser processing of wheel set tires. Transport Engineering. 2025;5:63-68. doi: 10.30987/2782-5957-2025-5-63-68.

### Введение

Решение Эксплуатационные характеристики изделий во многом зависят от качества тонкого поверхностного слоя изде-

лий. Качество поверхности деталей формируется, в основном, на заключительных этапах обработки, наиболее перспектив-

ным из которых является лазерное термоупрочнение поверхности, которая требует достоверных методов оценки параметров качества. Следует отметить, что весьма важной и актуальной задачей в этом слу-

чае является оперативная диагностика процессов в материале. Единственным эффективным путем решения этой задачи является контроль процесса лазерного упрочнения в реальном времени.

### **Преимущества применения технологии лазерного упрочнения бандажей**

В настоящее время при ремонте подвижного состава в различных депо успешно используют вместе с установками магнитно-плазменного упрочнения гребней колесных пар технологии лазерного упрочнения бандажей. Лазерная обработка материалов имеет ряд преимуществ перед другими видами термообработки:

- высокая средняя и пиковая мощность излучения, большая поверхностная плотность мощности излучения;
- кратковременность нагрева и возможность регулировки режима нагрева;
- локальность воздействия, ограниченность зоны теплового влияния;
- простота управления лучом и его безынерционность;
- возможность полной автоматизации процесса. При мелкодисперсной структуре закаленного слоя обрабатываемая деталь обладает повышенными триботехническими характеристиками, а также достигается сильнейший положительный эффект при сопротивлении ползучести металла, так как мелкодисперсная структура предотвращает пластическое течение стали, возникающее вследствие резкого градиента температур.

Цель любого процесса термообработки состоит в том, чтобы нагревом выше определенной температуры и последующим охлаждением вызвать желаемое изменение фазовой структуры твердого металла в тонком (0,2...0,8мм) поверхностном слое.

Сохраняя изложенные выше общие преимущества лазерной технологии, лазерное поверхностное термоупрочнение (ЛПТУ) обладает следующими специфическими достоинствами

- обрабатывают локально избранные участки изделия;
- обрабатываемая деталь может быть удалена от устройства фокусирующей оптики;
- большая скорость процесса приводит к минимальным деформациям и повреждениям изделия;
- твердость черных металлов возрастает в 3–5 раз;
- снижаются энерго- и трудозатраты, так как не требуется финишная доводка.

Однако при этом необходим тщательно налаженный неразрушающий контроль изделий в процессе термообработки.

### **Анализ существующих методов контроля материалов, подвергаемых термообработке**

Существующие методы контроля, с точки зрения возможности диагностики фазовых превращений при ЛПТУ, можно разделить на три группы.

Прямые методы исследования структуры материала. К ним относятся рентгеновские, оптические и электронно-микроскопические. Одной из основных черт мартенситного перехода является быстрое изменение структуры, при которых прямые методы теряют свои преимущества.

Другая группа методов предполагает непрерывную запись исследуемых параметров. В процессе структурного перехода

происходит изменение многих свойств (магнитных, электрических, тепловых и др.). Методы, основанные на непрерывных измерениях этих параметров, существенно дополняют данные структурных исследований, однако запись вышеупомянутых параметров не разрешает вопроса, т.к. при диффузионных процессах происходит изменение тех же свойств.

В процессе ЛПТУ поверхностный слой деталей меняет свое структурное состояние, образуя так называемый «белый слой» с повышенной химической стойкостью и твердостью. Для определения качества ЛПТУ наиболее часто применяются

оптическая и электронная микроскопия или металлографический анализ, который подразумевает приготовление шлифов, их травление и т.д. То есть процедура достаточно длительная, обладающая рядом недостатков. Таким образом описанные методы позволяют оценить качество ЛПТУ после обработки и не позволяют контролировать процесс в реальном времени.

Исходя из вышеизложенного видно, что разумно использование эффекта типа скачка объема в качестве принципа исследования динамики структурных фазовых переходов.

Исходя из вышеизложенного, видно, что разумно использование эффекта типа скачка объема в качестве принципа исследова-

ования динамики структурных фазовых переходов.

Наиболее перспективным для диагностики фазовых переходов вообще и при ЛПТУ бандажей в частности является метод акустической эмиссии (АЭ).

Скачок объема, сопровождающий структурный переход в металлах и сплавах, универсален по своей природе в том смысле, что он свойственен любому мартенситному переходу в рамках фазовых превращений. Наиболее перспективным подходом к анализу АЭ в этом случае представляется методика распознавания динамических процессов в материалах по спектру излучения.

### Информативные параметры АЭ при термообработке поверхности

Для оперативного контроля процесса лазерного упрочнения бандажей было предложено использовать параметры АЭ, построенные для их узкополосных компонент. В результате проведенных исследований была получена амплитудно-частотная зависимость в виде узкополосных  $I(f)$ , где  $f$  – частота. Для количественной оценки процесса ЛПТУ использовался параметр, характеризующий форму спектра АЭ.

Причинами, определяющими изменения в спектре АЭ при взаимодействии лазерного излучения с материалом, являются:

- локальные в объеме фазовые превращения;
- образование поверхностных и приповерхностных трещин;
- электромагнитные помехи.

Задача обнаружения заключается в выявлении любого из названных факторов, а задачей идентификации является их распознавание. Как уже отмечалось выше, в качестве первичных параметров, характеризующих спектр излучающего процесса, целесообразно использовать узкополосные спектральные составляющие, усредненные на статистически представительных интервалах времени.

В общем случае идентифицирующие параметры представляют собой функции первичных признаков, сохраняющие суще-

ственную информацию о форме спектра, характерной для каждого из излучающих процессов и устойчивые к искажениям. Одним из простейших идентифицирующих параметров, сохраняющих информацию о форме спектра и одновременно слабо чувствительных к мультипликативным помехам и частотно зависимому затуханию, является отношение амплитуд спектральных компонент, усредненные на статистических представительных интервалах времени

$$I(f, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} A(f, t) dt \quad (1)$$

где  $A(f, t)$  – изменение уровня АЭ во времени в узкой полосе частот;  $t$  – интервал усреднения.

Обнаруживающие признаки формируются следующим образом. Акустограммы, представляющие собой узкополосные реализации излучения, разбиваются на малые интервалы  $\Delta t \ll T$  ( $T$  – полное время реализации), а затем оцениваются изменения в амплитуде на смежных интервалах (признак  $\lambda$ ) или корреляции каждого из интервалов с каждым (признак  $\mu$ ). Эти признаки слабо зависят от абсолютных значений амплитуд узкополосных спектральных компонент.

Первый признак представляет собой размах амплитуды на смежных интервалах анализа  $t_k, t_{k+1}$  и имеет вид:

$$\lambda_{k,k+1}(fl) = \frac{I_k(fl) - I_{k+1}(fl)}{I_k(fl) + I_{k+1}(fl)}, \quad (2)$$

где  $fl$  значение центральной частоты узкополосной составляющей АЭ.

Признак, характеризующий степень однородности группы интервалов, имеет вид

$$\mu(fl, T_k) = \frac{2}{k(k-1)} \sum_{k+1}^k \lambda_{k,k+1}(fl), \quad (3)$$

где  $T_k = \sum_{k+1}^k \Delta t_k$ .

Изменения в спектре излучения определяются при помощи критериальных функций

$$F(\lambda) = \Theta[\lambda_{k,k+1}(fl) - \varphi_\lambda] \quad (4)$$

$$F(\mu) = \Theta[\mu(fl, T_k) - \varphi_\mu] \quad (5)$$

где  $\Theta$  – функция Хевисайда,  $\varphi_\lambda, \varphi_\mu$  критерии разделения и однородности соответственно. Значения  $\varphi_\lambda$  и  $\varphi_\mu$  представляют собой утроенные значения дисперсий на однородности области излучения

$\lambda_{k,k+1}(fl)$  и  $\mu(fl, T_k)$ .

Если  $F(\lambda) = 1$ , то можно говорить о появлении критических особенностей в спектре АЭ, а при  $F(\mu) = 0$  об однородности излучения.

На рис.1 показаны характерные критические изменения в спектре АЭ при лазерном воздействии на материал и соответствующее поведения критериальных функций  $F(\lambda), F(\mu)$ .

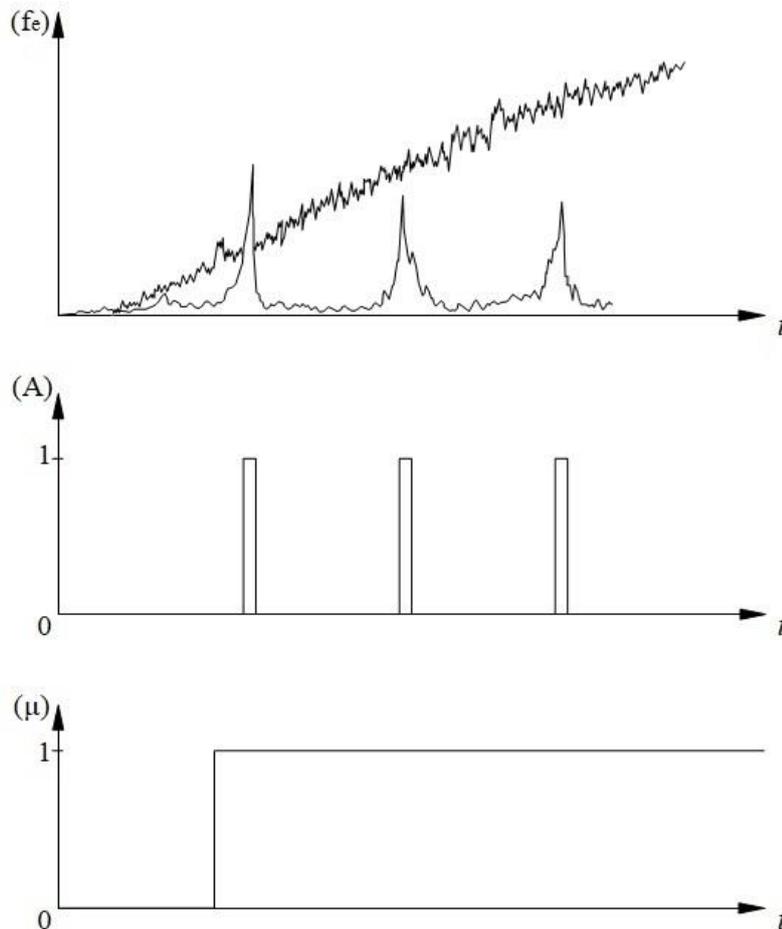


Рис. 1 Характерные критические изменения в спектре АЭ  
Fig. 1 Typical critical changes in the acoustic emission spectrum

В общем случае идентифицирующие параметры представляют собой функции первичных признаков, сохра-

няющие существенную информацию о форме спектра, характерной для каждого из излучающих процессов и устойчивые

к искажениям. Одним из простейших идентифицирующих параметров, сохраняющих информацию о форме спектра и одновременно слабо чувствительных к мультипликативным помехам и частотно зависимому затуханию, является отношение амплитуд спектральных компонент  $\alpha_{l,l1} = \frac{I(f_l)}{I(f_{l1})}$  в каждый принятый момент времени.

Рассмотрим принципы выбора частотного диапазона для идентифицирующих параметров и его зависимость от

$$G(f, R) = G(f, 0) \exp[-2(A + Bf)R], \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  постоянные для данного материала.

Любой сигнал, меняющийся во времени, можно рассматривать как суперпозицию большого (по возможности бесконечного числа синусоидальных волн, ко-

## Выводы

Проведенный анализ существующих методов контроля термообработки поверхностей материалов, позволил обосновать использование метода АЭ при ЛПТУ материалов. На основе спектрального анализа АЭ и компьютерного

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коротин И.М. Контроль качества термической обработки металлов. Москва Высшая школа, 1980, 192с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н., Лазерная обработка металлов. Москва Машиностроение, 1975. 295с
3. Упрочнение деталей лучом лазера. Под общ. Ред. В.С. Коваленко. Киев Техника 1981. 212с.
4. Брагинский А.П., Евсеев Д.Г., Лебедев И.В. Распознавание дефектов по спектральным характеристикам акустической эмиссии. Дефектоскопия 1984 №1 с.47-54.
5. Егоров А.В., Матвеев С. И. Двухчастотный

## REFERENCES

1. Korotin IM. Quality control of metal heat treatment. Moscow: Vysshaya Shkola; 1980.
2. Rykalin NN, Uglov AA, Kokora AN. Laser metal processing. Moscow: Mashinostroenie; 1975.
3. Kovalenko VS, editor. Hardening of parts with a laser beam. Kiev: Tekhnika; 1981.

расстояния между датчиком и источником излучения. Как известно, коэффициент затухания упругих волн зависит от частоты и расстояния между точками излучения и приема сигналов. В используемом диапазоне частот (50...1000 кГц) зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией  $\delta = A + Bf$ . При этом спектр сигналов от источников, удаленных на расстояние  $R$  от приемника, трансформируется следующим образом

которые и составляют его частотный спектр. В математике эта связь выражается преобразованием Фурье от импульса  $x(t)$ .

моделирования особенностей спектра построены информативные и помехоустойчивые параметры, которые позволяют проводить оперативную оценку качества процесса лазерной обработки.

- анализ сигналов акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении алюминиевых сплавов. – Известия Алтайского государственного университета, 2009, №1.
6. Терентьев Д.А. Идентификация сигналов акустической эмиссии при помощи частотно-временного анализа. – В мире неразрушающего контроля, 2013, №2(60).
7. Муравьев В. В. Сравнительная достоверность акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов. – В мире неразрушающего контроля, 2014, №3, С.30-33.

4. Braginsky AP, Evseev DG, Lebedev IV. Detection of defects by spectral characteristics of acoustic emission. Russian Journal of Nondestructive Testing. 1984;1:47-54.
5. Egorov AV, Matveev SI. Two-frequency analysis of acoustic emission signals during plastic de-

formation and fracture of aluminum alloys. *Izvestiya of Altai State University*. 2009;1.

6. Terentyev DA. Identification of acoustic emission signals using time-frequency analysis. *NDT World*. 2013;2(60).

7. Muravyov VV. Comparative reliability of acoustic emission control of side frames and suspension beams of freight car bogies. *NDT World*. 2014;3:30-33.

#### **Информация об авторах:**

**Рафиков Рафик Хайдарович** – кандидат технических наук, Начальник отдела Дирекции проектов развития АНО «Инновационный инженеринговый центр», г. Москва, тел. + 8(920) 127-65-42.

**Лебедев Кирилл Игоревич** – аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г Москва, тел.: +8(910)0037755.

**Rafikov Rafik Haidarovich** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of the Directorate of Development Projects at Innovative Engineering Center, Moscow; phone: + 8(920) 127-65-42.

**Lebedev Kirill Igorevich** - Postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow; phone: +8(910)0037755.

**Лебедев Игорь Валентинович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», Российский университет транспорта (МИИТ), г Москва., тел. +89629233795.

**Lebedev Igor Valentinovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Engineering Technology and Rolling Stock Repair, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, tel. +89629233795.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; одобрена после рецензирования 07.04.2025; принята к публикации 30.04.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 26.03.2025; approved after review on 07.04.2025; accepted for publication on 30.04.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.