

# Неразрушающий контроль качества термообработки стальных образцов, полученных аддитивной технологией, магнитошумовым методом

В.Н. Бусько, А.П. Крень, Г.А. Ланцман

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 11.07.2022

Принята к печати 27.09.2022

Производство изделий по аддитивным технологиям, как правило, сопровождается несанкционированным появлением и ростом неоднородности свойств, анизотропии, остаточных напряжений, пористости и других дефектов. Поэтому резко возросла актуальность неразрушающего контроля качества изделий, полученных с помощью аддитивных технологий. Цель работы – экспериментально исследовать возможность контроля и оценки качества термической обработки трёхмерных и литых образцов с помощью неразрушающих методов контроля.

Исследовались стальные образцы из низколегированной стали 09Г2С, полученные методом селективного лазерного сплавления с разными видами и режимами последующих термических обработок и литьём. Методами исследования являлись магнитошумовой метод, реализующий магнитный метод эффекта Баркгаузена, и контактно-динамический метод измерения твёрдости материала.

Экспериментально установлено, что оба метода обладают высокой чувствительностью к отожжённым и нормализованным трёхмерным образцам и их отбраковке. Магнитошумовой метод, в отличие от метода твёрдометрии, связанного, преимущественно, с фазово-структурными изменениями, благодаря селективности к другим контролируемым параметрам, дополнительно обладает чувствительностью к литевым образцам, хотя микроструктуры литых и нормализованных трёхмерных образцов по данным рентгеноструктурного анализа близки между собой.

Магнитошумовой метод может быть использован в качестве одного из физических методов оценки качества и контроля термообработки 3D-образцов на стадии изготовления при отработке их видов, режимов и разбраковке образцов.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии и материалы, селективное лазерное сплавление, термическая обработка, магнитошумовой метод, контактно-динамический метод.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-3-228-236

---

**Адрес для переписки:**

Бусько В.Н.  
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

**Address for correspondence:**

Busko V.N.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

---

**Для цитирования:**

В.Н. Бусько, А.П. Крень, Г.А. Ланцман.  
Неразрушающий контроль качества термообработки стальных образцов, полученных аддитивной технологией, магнитошумовым методом. Приборы и методы измерений. 2022. – Т. 13, № 3. – С. 228–236.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-3-228-236

**For citation:**

V.N. Busko, A.P. Kren, G.A. Lanzman.  
[Non-Destructive Testing by Magnetic Noise Method of the Quality of Heat Treatment of Steel Samples Obtained by Additive Technology].  
Devices and Methods of Measurements. 2022, vol. 13, no. 3, pp. 228–236 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-3-228-236

# Non-Destructive Testing by Magnetic Noise Method of the Quality of Heat Treatment of Steel Samples Obtained by Additive Technology

V.N. Busko, A.P. Kren, G.A. Lanzman

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 11.07.2022

Accepted for publication 27.09.2022

## Abstract

The manufacture of products using additive technologies is accompanied by the unpredictable appearance of inhomogeneity of properties, anisotropy, residual stresses, porosity, and other defects. Therefore, there is a great relevance of non-destructive quality control of products obtained by additive technologies. The purpose of the paper is the experimental investigation of the possibility of testing and evaluation of the quality of heat treatment of three-dimensional and cast samples by non-destructive control methods.

The low-alloy steel 09G2S samples, which was obtained by casting and selective laser sintering different modes of subsequent heat treatments were studied. The method of the Barkhausen effect and the instrumented indentation method for measuring the material hardness were applied.

It was experimentally established that both methods are highly sensitive to annealed and normalized three-dimensional samples and their rejection. Compared to the hardness measurement method, which is mainly associated with phase-structural changes, the magnetic noise method due to selectivity to other controlled parameters is additionally sensitive to cast samples (at the same time the microstructures of cast and normalized three-dimensional samples are close to each other according to X-ray data).

The magnetic noise method can be used as one of the physical methods for evaluation the quality and control of the heat treatment of 3D samples at the manufacturing stage when testing their types and modes, as well as sorting samples.

**Keywords:** additive technologies and materials, selective laser melting, heat treatment, magnetic noise method, contact-dynamic method.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-3-228-236

---

### Адрес для переписки:

Бусько В.Н.  
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

---

### Address for correspondence:

Busko V.N.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

---

### Для цитирования:

В.Н. Бусько, А.П. Крень, Г.А. Ланцман.  
Неразрушающий контроль качества термообработки стальных образцов, полученных аддитивной технологией, магнитошумовым методом. Приборы и методы измерений. 2022. – Т. 13, № 3. – С. 228–236.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-3-228-236

---

### For citation:

V.N. Busko, A.P. Kren, G.A. Lanzman.  
[Non-Destructive Testing by Magnetic Noise Method of the Quality of Heat Treatment of Steel Samples Obtained by Additive Technology].  
*Devices and Methods of Measurements*. 2022, vol. 13, no. 3, pp. 228–236 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-3-228-236

## Введение

Производство материалов и изделий с помощью аддитивных технологий (АТ) относится к наиболее перспективным производственным процессам, сущность которых состоит в получении готовых изделий/деталей способом последовательного послойного построения путём фиксации отдельных слоёв порошкового материала и их последовательного соединения между собой с помощью сплавления, спекания или другим способом в зависимости от выбора технологии [1]. Формирование изделия путём «наращивания» материала слой за слоем позволяет резко ускорить полный цикл производства, начиная от проектирования до изготовления с высокой точностью и скоростью получения конечного продукта с помощью компьютерной трёхмерной печати и 3D-принтера. Это послужило тому, что в ряде отраслей промышленности (машиностроение, авиа- и ракетостроение, строительство, медицина и др.) резко растёт объём внедряемых 3D-изделий за счёт постепенной замены изготовленных традиционными способами (прокат, литьё, штамповка, ковка, точение, фрезерование и др.). В итоге комплекс перечисленных достоинств техпроцесса с применением АТ приводит к экономии материальных, трудовых и временных ресурсов [1–3].

Специфика получения металлических изделий с использованием АТ такова, что после изготовления они могут иметь более ярко выраженные неоднородность, шероховатость, анизотропию, остаточные напряжения, сложную микроструктуру, текстуру, дефекты (микротрещины, поры, включения, несплошности, несплавления) [4–6], на которые дополнительно влияют виды и режимы последующих термических, механических, термомеханических и других видов обработок, изменяющих структуру и физико-механические свойства (ФМС), которые одновременно являются сдерживающими факторами при внедрении. Вследствие этого в материалах и изделиях, полученных с помощью АТ, в процессе и после изготовления необходимо проводить неразрушающий контроль (НК) и мониторинг качества.

Таким образом, учитывая, что изготовление материалов с применением АТ сопряжено с наличием целого ряда особенностей [4–6],

обусловленных отличным от традиционных способов их получения, более остро встаёт вопрос обеспечения качества на основе применения различных физических методов неразрушающего контроля (НК), тем более, что любой цикл аддитивного производства должен включать в себя текущий и выходной контроль качества.

В [5, 7] отмечены две главные задачи, стоящие перед НК качества изделий, полученных по АТ (АТ-изделий): выявление и идентификация дефектов, возникающих при синтезе изделий, т. е., контроль качества изделий в соответствии с требованиями нормативов и выявление дефектов при отработке режимов изготовления. Для этого предложено использовать ультразвуковые, вихретоковые, рентгеновские, капиллярные и магнитные методы, к которым относится магнитошумовой метод, реализующий магнитный эффект Баркгаузена (МЭБ)<sup>1</sup>. В [8] исследованы возможности НК качества АТ-изделий с помощью ультразвукового метода контроля; в результате установлена выявляемость поверхностных трещиноподобных дефектов. В [9, 10] приведены результаты оценки пористости, качества поверхности и внутренней структуры с помощью рентгеновских, акустических, радиографических и других методов, большинство из которых имеют те или иные ограничения и сделан вывод о необходимости привлечения новых или комбинированных методов и технологий НК качества АТ-изделий.

В настоящее время практически отсутствует системный анализ экспериментальных данных по результатам НК качества, видов и режимов термообработки разными физическими методами. В [11] указано, что для снижения упругих напряжений в трёхмерных материалах «режимы и виды термообработки необходимо подбирать индивидуально для каждой марки стали». Но в [7] отмечается, что в целом вопрос НК качества АТ-материалов до конца не отработан.

Цель работы – исследовать возможность оценки качества термической обработки образцов низколегированной стали 09Г2С, полученных литьём и методом селективного лазерного сплавления (СЛС), магнитошумовым методом.

<sup>1</sup> ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий (классификация видов и методов), 26 с..

## Образцы, методы и методика исследований

Исследовались две партии образцов: первая – 4 образца длиной 150 мм, шириной 15 и 30 мм (в средней и галтельной части), толщиной 2 мм и 10 мм, полученные методом СЛС, и 2 образца таких же размеров – литьём; вторая партия – 2 образца получены методом СЛС и 1 образец – литьём, размеры – те же, толщина 2 мм. Исходный компонент – порошок малоуглеродистой стали 09Г2С с размером фракций 10–45 мкм. Технические характеристики 3D-принтера, с помощью которого получены образцы иного размера: мощность лазера и диаметр пятна – приведены в работе [11]. После изготовления трёхмерных образцов одна их часть подвергалась рекристаллизационному низкотемпературному отжигу, вторая – нормализации с охлаждением на воздухе. Обе поверхности образцов подвергались механической обработке (шлифовке) вдоль оси абразивным камнем с малой подачей и водяным охлаждением (шероховатость составляла 5–8 мкм).

На рисунке 1а, б представлен внешний вид образцов первой партии толщиной 2 и 10 мм и второй – толщиной 2 мм, отличающихся тем, что вторая получена разрезанием на электроэрозионном станке образцов толщиной 10 мм на образцы толщиной по 2 мм с последующей поверхностной механической обработкой (все образцы для исследований

предоставлены Институтом физики металлов Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург).

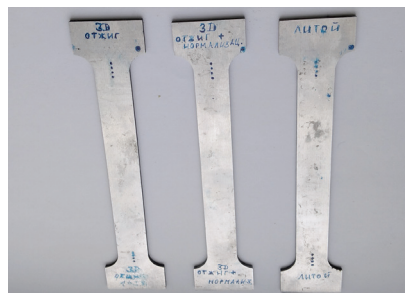
В таблице приведены режимы термической обработки и другие характеристики исследуемых образцов.

В качестве метода оценки качества термообработки АТ-образцов после СЛС использовался реализующий МЭБ микромагнитный метод, информативные параметры которого, благодаря тесной связи с «тонкой» структурой ферромагнетика, являются интегральными и обладают высокой чувствительностью к различным контролируемым параметрам, включая микро- и макроструктуру, неоднородность, шероховатость, анизотропию, дефектность, напряжённо-деформированное состояние, поверхностную и объёмную обработку и др. [12–18]. Измерения интенсивности  $U_{эф}$  магнитного шума (МШ) выполнялись с помощью прибора ИМШ [18]

В качестве второго сравнительного метода оценки качества термообработки литых и 3D-образцов использовался метод динамического индентирования для оценки твёрдости. Для её измерения использовался цифровой динамический твердомер типа ТПЦ-7 [19, 20]. Динамическое индентирование относится к методам НК благодаря тому, что при измерениях твёрдости поверхность образца практически не повреждается (глубина отпечатка менее 25 мкм).



а



б

**Рисунок 1** – Исследуемые образцы стали 09Г2С, полученные методом селективного лазерного сплавления и литья: а – 1-я партия; б – 2-я партия

**Figure 1** – Studied samples of steel 09G2S obtained by selective laser melting and casting: а – 1<sup>st</sup> batch; б – 2<sup>nd</sup> batch

Таблица/Table

**Характеристики образцов материалов порошковой стали 09Г2С, полученных методом селективного лазерного сплавления и литьём**

**Characteristics of samples of powder steel 09G2S obtained by selective laser alloying and casting**

№ образца (партии) Sample No. (batch)	Способ изготовл. Production method	Режим термической обработки Thermal treatment mode	Ср. толщ., мм Average thickness, mm	Вес*, г Weight*, g	Уд. пл. **г/см <sup>3</sup> Specific gravity** g/cm <sup>3</sup>
1 (1 п.) 1 (1 <sup>st</sup> batch)	3D (СЛС) 3D (SLS)	Отжиг 350 °С, 3 часа (1ч. + 2ч.) Annealing 350 °C, 3 hours (1h + 2h)	2.02	39.584	Не определ. Undefined
2 (-/-)	3D (СЛС) 3D (SLS)	-/-	10.9	216.507	-/-
3 (-/-)	3D (СЛС) 3D (SLS)	Отжиг 350 °С, 3 ч. + нормализация 980 °С, 0,5 ч. + охлаждение на воздухе Annealing 350 °C, 3 h + normalization 980 °C, 0.5 h + cooling in air	2.015	38.905	-/-
4 (-/-)	3D (СЛС) 3D (SLS)	-/-	10.62	206.248	-/-
5 (-/-)	Литьё Casting	Нет / not	2.0	40.287	-/-
6 (-/-)	Литьё Casting	-/-	10.47	251.334	-/-
7 (2 п.) 7 (2 <sup>nd</sup> batch)	3D (СЛС) 3D (SLS)	Отжиг 350 °С, 3 часа (1ч. + 2ч.) Annealing 350 °C, 3 hours (1h + 2h)	2.09	39.683	7.815
8 (-/-)	3D (СЛС) 3D (SLS)	Отжиг 350 °С, 3 ч. + нормализация 980 °С, 0,5 ч. + охлаждение на воздухе / Annealing 350 °C, 3 h + normalization 980 °C, 0.5 h + cooling in air	2.07	40.704	7.800
9 (-/-)	Литьё Casting	Нет / not	2.0	41.461	7.89

\* – измерялся на весах Advencurer (Lohaus Corp.), ИПФ НАНБ / measured on a scale Advencurer (Lohaus Corp.), IAPH BAS

\*\* – определялась с помощью гидростатического взвешивания, ИПФ НАНБ / determined by hydrostatic weighing, IAPH BAS

**Результаты и обсуждение**

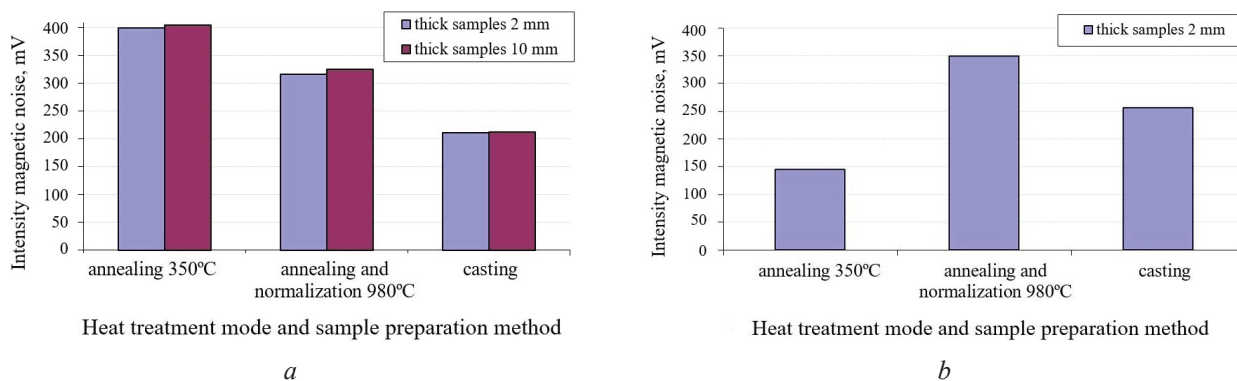
На рисунке 2а представлены результаты измерения  $U_{эф}$  МШ и зависимости от режимов термической обработки АТ-образцов и полученных литьём для 1-й партии (толщина 2 и 10 мм) с использованием преобразователя Баркгаузена (ПБ1), на рисунке 2b – с использованием ПБ2 для 2-й партии (2 мм). Преобразователи ПБ1 и ПБ2 между собой отличались типоразмерами, техническими параметрами, условиями перемагничивания

образца и измерения МШ. Измерения МШ проводились в центре поверхности обеих сторон образца и усреднялись по 7–10 измерениям  $U_{эф}$ . Из гистограмм следует, что для обеих партий и толщин между трёхмерными отожжёнными (№ 1, 2, 7), нормализованными (№ 3, 4, 8) и литыми (№ 5, 6, 9) образцами имеется значительная разница, обусловленная наличием взаимосвязи  $U_{эф}$  МШ с влияющими на показатели качества и ФМС металла параметрами. Из рисунков 2а и 2b видно, что чувствительность



и селективность  $U_{эф}$  к термической обработке можно значительно увеличить за счёт оптимизированной комбинации условий перематничивания образца преобразователем Баркгаузена и установочных режимов анализа МШ. При использовании ПБ1 разница показаний магнитошумового прибора между отожжённым (№ 7) и нормализованным (№ 8) образцами составила  $\approx 25\text{--}30\%$ , при использовании

ПБ2 разница между ними составляет уже 2,3 раза и по уровню МШ они поменялись местами (рисунок 2b). Возможно, результат обусловлен использованием принципиально нового типа ПБ2, условиями перематничивания и анализа МШ, и в связи с этим, изменением глубины перематничивания и толщины информативного слоя в слоистом АТ-изделии.

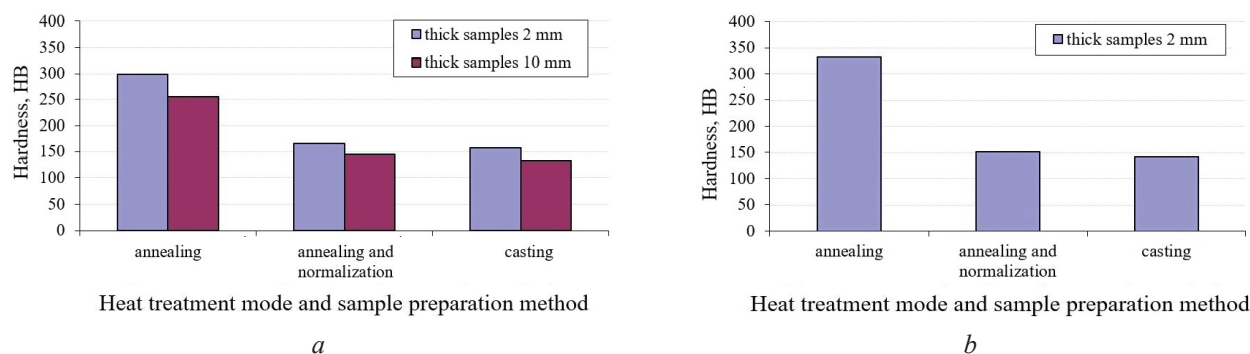


**Рисунок 2** – Зависимость интенсивности магнитного шума от режимов термообработки трёхмерных и литых образцов обеих партий: *a* – с использованием ПБ1; *b* – ПБ2

**Figure 2** – Dependence of the intensity of magnetic noise on the modes of heat treatment of three-dimensional and cast samples from both batches: *a* – using sensor 1; *b* – sensor 2

Для сравнения полученных с помощью МЭБ результатов контроля качества термообработки на рисунке 3a представлены результаты измерения твёрдости по Бринеллю (НВ) с помощью ТПЦ-7 образцов из 1-й партии (толщина 2 и 10 мм), на рисунке 3b – образцов из 2-й партии толщиной 2 мм. Измерения НВ выполнялись на обеих поверхностях в центре образца и усреднялись по данным пяти измерений. Для обеих партий

образцов отчётливо видна значительная разница значений НВ между отожжёнными и нормализованными образцами, однако разница НВ между нормализованными и литыми образцами практически отсутствует. Полученные данные качественно совпали с приведенными в [11] результатами наноиндентирования образцов этой же стали: твёрдость литых образцов примерно в 1,5 раза меньше твёрдости 3D-образцов.



**Рисунок 3** – Твёрдость для 1-й (*a*) и 2-й (*b*) партий образцов, полученных с помощью аддитивной технологии (методом селективного лазерного сплавления) и литья, измеренная твердомером ТПЦ-7

**Figure 3** – Hardness for the 1<sup>st</sup> (*a*) and 2<sup>nd</sup> (*b*) batches of samples obtained using additive technology (selective laser melting) and casting, measured with a hardness tester TPC-7

По данным значений твёрдости разница между отожжённым и нормализованным 3D образцами толщиной 2 мм для обеих партий составляет 130 ед. НВ (или 1,8 раза) и 125 ед. НВ для толщин 10 м (2,1 раза), что несколько выше, чем при использовании ПБ1 для прибора ИМШ, и примерно такая же с применением ПБ2. Высокая разница показаний твёрдости между отожжёнными и нормализованными образцами вызвана тем, что метод индентирования, в основном, предназначен для определения механических характеристик металла и малочувствителен к микроструктуре. Поэтому между нормализованным (3D) и литым образцами разницы практически нет (рисунок 3а, б), в то время как по данным МЭБ (рисунок 2а, б), между литым и 3D-образцами существует значительная разница (более чем в 1,5 раза). Возможно, разница в чувствительности обоих методов к микроструктуре и ФМС в пользу МЭБ вызвана тем, что в АГ-образцах в процессе изготовления могут образовываться зоны локального напряжённо-деформированного состояния, пористость, микротрещины и другие дефекты, которые на  $U_{эф}$  оказывают более сильное влияние, чем на твёрдость, а также применением ПБ2 и слоистостью образца. В подтверждение этому из таблицы видно, что удельная плотность литого образца 2-й партии образцов на  $\approx 10\%$  выше, чем у 3D-образцов, а о влиянии пористости на МШ в порошковой стали ШХ15 было указано в [21]. Кроме пористости на МШ может оказать воздействие изменение размера зерна 3D-образцов, приводящая к росту механической анизотропии, которая оказывает более сильное влияние на  $U_{эф}$ , чем на твёрдость.

Таким образом, магнитошумовой параметр  $U_{эф}$  обладает высокой информативностью к качеству термической постобработки за счёт связи не только с фазово-структурными превращениями, влияющими на микро- и макроструктуру 3D-образцов, но и селективностью к пористости, остаточным напряжениям, анизотропии и размеру зерна в металле, что позволяет использовать МЭБ в качестве одного из физических методов оценки качества и НК термообработки образцов, полученных аддитивным способом.

## Заключение

Проведены экспериментальные исследования возможности оценки и неразрушающего

контроля качества термической обработки образцов из низколегированной стали 09Г2С, полученных методом селективного лазерного сплавления и, для сравнения, методом литья, с помощью магнитошумового и контактно-динамического методов.

Установлено, что, как и метод твердометрии, магнитошумовой метод обладает высокой чувствительностью к термической обработке трёхмерных отожжённых и нормализованных образцов. Показано, что использование специальных сенсорных устройств с применением нового типа преобразователя Баркгаузена, способов перемагничивания и анализа магнитного шума позволило повысить в 2,5 раза чувствительность информативного магнитошумового параметра при разбраковке трёхмерных образцов. На основе анализа полученных данных, благодаря универсальности и селективности магнитошумового метода, дополнительно выявлена чувствительность к образцам, полученным с помощью литья, и возможность отбраковки от нормализованных синтезированных образцов, которые по данным рентгеноструктурного анализа близки между собой.

Интенсивность магнитного шума как критериальный параметр в комплекте с портативной измерительной аппаратурой и набором преобразователей может быть использована для оценки и экспресс-контроля качества термической и других видов обработок, при отработке режимов лазерного сплавления, оптимизации параметров металлического порошка и лазерного оборудования, с целью получения высоких прочностных и иных физических и механических характеристик аддитивных материалов.

## Список использованных источников

1. Гибсон Я. Технология аддитивного производства: пер. с англ. / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер // Москва: Техносфера. – 2016. – 656 с.
2. Стратегия развития аддитивных технологий // Аддитивные технологии. – 2021. – № 4. – С. 10–11.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33.
4. Аleshин Н.П. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества деталей

непосредственно в процессе аддитивного производства / Н.П. Алешин, Н.В. Григорьев, Н.А. Щипаков [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 64–71.

5. Алешин Н.П. Некоторые особенности исследований деталей, изготовленных по аддитивным технологиям, методом рентгеновской компьютерной томографии / Н.П. Алешин, Н.В., О.А. Крупнина [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 4. – С. 42–48.

6. Бусько В.Н. Особенности циклической усталостной прочности образцов, полученных селективным лазерным спеканием из стали 09Г2С / В.Н. Бусько, В.Л. Венгринович, Д.А. Винтов [и др.] // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 2020. – № 4. – С. 16–25.

7. Алешин Н.П. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества готовых деталей аддитивного производства / Н.П. Алешин, Н.В. Григорьев, Н.А. Щипаков Н.А [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 10. – С. 63–71.

8. Алешин Н.П. О возможности применения поверхностных и головных ультразвуковых волн при неразрушающем контроле качества изделий аддитивного производства / Н.П. Алешин, Н.В. Григорьев, Н.А. Щипаков Н.А [и др.] // Дефектоскопия. – 2017. – № 12. – С. 16–23.

9. Алешин Н.П. Оценка результатов исследования деталей, изготовленных по аддитивным технологиям, альтернативными методами / Н.П. Алешин, Н.В. Григорьев, Н.А. Щипаков [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 12. – С. 25–31.

10. Алешин Н.П. Экспериментальные исследования возможностей и особенностей ультразвукового контроля деталей, изготовленных по аддитивным технологиям / Н.П. Алешин, Н.В., Н.В. Григорьев, Н.А. Щипаков [и др.] // Дефектоскопия. – 2016. – № 12. – С. 17–24.

11. Ничипурук А.П. Структура и магнитные свойства стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления / А.П. Ничипурук, А.Н. Сташков, Е.А. Щапова [и др.] // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – С. 1719–1724.

DOI: 10.21883/FTT.2021.11.51567.25s

12. Tu Le Manh, Jose Alberto Perez Benitez, Jose Hiram Espina Hernandez, Jose Manuel Hallen Lo pez. Barkhausen Noise for Nondestructive Testing and Materials Characterization in Low-Carbon Steels. Cambridge, United States, Elsevier Ltd., 2020, 268 p.

13. Горкунов Э.С. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов (обзор I/обзор II) / Э.С. Горкунов, Ю.Н. Драгошанский, М. Миховски // Дефектоскопия. – 1999. – № 6. – С. 3–23 // Дефектоскопия. – 1999. – № 7. – С. 3–32.

14. Блаоу М.М. Магнитные шумы Баркгаузена для надежного измерения зоны термического влияния в сварной пластине из судостроительной стали / М.М. Блаоу, Б.А. Шау // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 4. – С. 70–75.

15. Ашвани Шарма. Влияние условий шлифования на магнитный отклик инструментальной стали AISI D2 / Шарма Ашвани, Чаудхари Абхиманью, Субхаш Акаш [и др.] // Дефектоскопия. – 2021. – №3. – С. 26–36.

DOI: 10.31857/SO130308221030039

16. Иванова Й. Сравнительные измерения напряженного состояния проката углеродистой стали посредством шума Баркгаузена и ультразвука / Й. Иванова, Т. Парталин // Дефектоскопия. – 2012. – № 4. – С. 83–94. DOI: 10.1134/S1061830912020040

17. Филинов В.В. Применение метода магнитных шумов для контроля технологических напряжений / В.В. Филинов, В.Е. Шатерников, В.А. Рукавишников [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 3. – С. 17–24.

18. Бусько В.Н. Исследование и оценка механической анизотропии сталей и сплавов магнитошумовым методом / В.Н. Бусько, А.А. Осипов // В мире неразрушающего контроля. – 2020. – № 3. – С. 50–56. DOI: 10.12737/1609-3178-2020-50-56

19. Rudnitsky V.A., Kren A.P., Lantsman G.A. Determining Yield Strength of Metals by Microindentation with a Spherical Tip // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, vol. 55, pp. 162–168.

DOI: 10.1134/S1061830919020098

20. Kren A., Delendik M., Machikhin A. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation // International Journal of Impact Engineering, 2022, vol. 162, p. 104141.

DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104141

21. Бусько В.Н. Оценка пористости порошкового материала подшипниковой стали с помощью метода магнитных шумов / В.Н. Бусько, А.А. Дмитриевич // Материалы 37-го межгосударственного семинара “Защитные покрытия, сварка и контроль” / Ред. А.Ф. Ильющенко и др. – Минск: 2006. – С. 66.

## References

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing: Springer, 2015, 498 p.
2. Strategy for the development of additive technologies. *Additivnye tekhnologii* [Additive Technologies], 2021, no. 4, pp. 10–11 (in Russian).
3. Kablov E.N. Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for



the period up to 2030. *Aviacionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2015, no. 1(34), pp. 3–33 (in Russian).

4. Aleshin N.P., Grigor'ev T., Shchipakov N.A., Prilutskii M.A., Murashov V.V. Using nondestructive testing methods for in-production quality control of additive manufactured parts. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, pp. 532–537.

**DOI:** 10.1134/S1061830916090023

5. Aleshin N.P., Grigor'ev M.V., Krupnina O.A., Shchipakov N.A. Some features of the study of parts manufactured using additive technologies using X-ray computed tomography. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 271–277.

**DOI:** 10.1134/S1061830918040022

6. Busko V.N., Vengrinovich V.L., Vintov D.A., Nichipuruk A.P., Stashkov A.N. Peculiarities of Cyclic Fatigue Strength of Specimens Produced by Selective Laser Sintering from Steel 09G2S. *Nondestructive testing and technical diagnostics*, 2020, no. 4, pp. 16–25 (in Russian).

7. Aleshin N.P., Grigor'ev T., Shchipakov N.A., Prilutskii M.A., Murashov V.V. Applying nondestructive testing to quality control of additive manufactured parts. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 10, pp. 600–609. **DOI:** 10.1134/S1061830916100028

8. Aleshin N.P., Grigor'ev M. V., Shchipakov N.A., Krys'ko N.V., Krasnov I.S., Prilutskii M.A., Smorodinskii Y.G. On the possibility of using surface and head ultrasonic waves for non-destructive quality control of additive manufacturing products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 830–838.

**DOI:** 10.1134/S1061830917120026

9. Aleshin N.P., Grigor'ev M.V., Murashov V.V., Krasnov I.S., Krupnina O.A., Smorodinskii Y.G. Assessing the results of ultrasonic testing of additive manufactured parts with alternative methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 12, pp. 691–696. **DOI:** 10.1134/S1061830916120032

10. Aleshin N.P., Murashov V., Shchipakov N., Krasnov I., Lozhkova D. Experimental research into possibilities and peculiarities of ultrasonic testing of additive manufactured parts. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 12, pp. 685–690.

**DOI:** 10.1134/S1061830916120020

11. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Shchapova E.A., Kazantseva N.V., Makarova M.V. Structure and Magnetic Properties of 09G2S Steel Obtained by the Selective Laser Melting Method. *Physics of the Solid State*, 2022, vol. 64, pp. 148–153.

**DOI:** 10.1134/S106378422030076

12. Tu Le Manh, Jose Alberto Perez Benitez, Jose Hiram Espina Hernandez, Jose Manuel Hallen Lopez. *Barkhausen Noise for Nondestructive Testing and Materials Characterization in Low-Carbon Steels*. Cambridge, United States, Elsevier Ltd. Publ., 2020, 268 p.

13. Gorkunov E.S., Dragoshansky Yu.N., Mihovskii M. Barkhausen effect and its use in structuroscopy of ferromagnetic materials (review I/review II). *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1999, no. 6, pp. 3–23 and // *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1999, no. 7, pp. 3–32 (in Russian).

14. Blaow M.M., Shau B.A. Barkhausen Magnetic Noises for Reliable Measurement of the Heat-Affected Zone in a Welded Shipbuilding Steel Plate. *NDT World*, 2014, no. 4, pp. 70–75.

15. Ashwani Sharma, Abhimanyu Chaudhary, Akash Subhash, Mohd Zahir Khan Yusufzay, Meganshu Vashista. Influence of grinding conditions on the magnetic response of AISI D2 tool steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2021, vol. 57, pp. 212–221.

**DOI:** 10.31857/SO130308221030039

16. Ivanova Y., Portalin T. Comparative Measurements of the Stressed State of Rolled Carbon Steel Using Barkhausen Noise and Ultrasonic methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2012, no. 4, pp. 83–94.

17. Filinov V.V., Shaternikov V.E., Rukavishnikov V.V., Naroditsky A.M., Pleshakov V.V., Kovalev D.A. Application of the method of magnetic noise to control process stresses. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2005, no. 3, pp. 17–24 (in Russian).

18. Busko V.N., Osipov A.A. Research and Evaluation of the Mechanical Anisotropy of Steel and Alloys by the Magnetic Noise Method. *NDT World*, 2020, no. 3, pp. 50–56 (in Russian).

**DOI:** 10.12737/1609-3178-2020-50-56

19. Rudnitsky V.A., Kren A.P., Lantsman G.A. Determining Yield Strength of Metals by Microindentation with a Spherical Tip. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 162–168.

**DOI:** 10.1134/S1061830919020098

20. Kren A., Delendik M., Machikhin A. Non-destructive evaluation of metal plasticity using a single impact microindentation. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, vol. 162, p. 104141.

**DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2021.104141

21. Busko V.N., Dmitrovich A.A. Evaluation of the porosity of bearing steel powder material using the magnetic noise method. Materials of the 37<sup>th</sup> interstate seminar “Protective coatings, welding and control”. Editor A. Ilyushchenko, Minsk, 2006, p. 66 (in Russian).