

УДК 621.791.01

Опыт применения дифракции Фраунгофера для измерения зазора в стыке сварного соединения

А.С. Бабкин¹, И.А. Бабкин², В.В. Терехов¹¹ ЛГТУ² АО «НЛМК-ИНЖИНИРИНГ»

Application of Fraunhofer diffraction in measuring butt joint root opening width

A.S. Babkin¹, I.A. Babkin², V.V. Terekhov¹¹ LSTU Lipetsk State Technical University² JSC NLMK ENGINEERING

Ширина зазора в стыке сварного соединения оказывает значительное влияние на его размеры, структуру и механические свойства. Несоответствие ширины зазора нормативным значениям приводит к таким дефектам сварного соединения, как прожоги и непровары. Традиционные методы измерения ширины зазора, в том числе сварочные шаблоны, не обеспечивают необходимой точности для малых зазоров (менее 1 мм), широко применяемых при сварке неплавящимся электродом, электронно-лучевой и лазерной сварке. Рассмотрена проблема точного бесконтактного измерения малых зазоров в сварных соединениях. В качестве пути ее решения предложено использовать явление дифракции Фраунгофера на зазоре. Для экспериментальной проверки возможности применения метода собрана оптическая установка с лазером НГ-2П. Измерения проведены в диапазоне ширины зазора 0,10...0,58 мм на образцах однопроходных стыковых соединений без скоса кромок типа С2 толщиной 3 мм (ГОСТ 14771-76) и типа С7 толщиной 6 мм (ГОСТ 14771-76). Показано, что метод обеспечивает удовлетворительную точность: относительная ошибка определения ширины зазора по сравнению с таковой контрольных измерений микроскопом не превышала 26,5 %, а в 80 % случаев результаты микроскопии попали в доверительный интервал дифракционных измерений. Основными ограничениями применения метода являются искажение дифракционной картины для толстого (более 6 мм) металла из-за отражения луча от поверхности стенок зазора и трудности измерения ширины зазоров менее 0,1 мм, связанные с точностью позиционирования элементов измерительной установки. Установлено, что смещение кромок сварного соединения в пределах, регламентируемых ГОСТ 14771-76, не оказывает влияния на точность измерения ширины зазора исследованным методом. Сделан вывод о практической возможности применения метода в системах автоматического управления технологическими процессами и при проведении научных исследований влияния ширины зазора и параметров режима на формирование швов.

EDN: YXOMNB, <https://elibrary/uxomnb>

Ключевые слова: сварка, стыковое соединение, зазор сварного соединения, бесконтактное измерение, дифракция Фраунгофера, контроль качества сборки

Relevance of the study is due to the significant impact of the root opening width in a welding joint on the quality, structure, and mechanical properties of the joint. Non-compliance of the root opening width with regulatory values leads to defects in the welded joint, such as burn-through and lack of fusion. Traditional methods for measuring root opening width,

including welding gauges, do not provide the necessary accuracy for small root openings (less than 1 mm), widely used in GTAW, LBW and EBW. The paper addresses the problem of accurate non-contact measurement of small root openings in welded joints. As a solution, it is proposed to use the phenomenon of Fraunhofer diffraction on the root opening. To experimentally verify the possibility of applying the method, an optical setup with an NG-2P laser was assembled. Measurements were carried out on butt joint square weld samples with thicknesses of 3 mm (type C2 GOST 14771-76) and 6 mm (type C7 GOST 14771-76). The joint root opening was varied from 0,1 to 0,58 mm. It is shown that the method provides satisfactory accuracy: the relative error in determining the root opening width compared to control measurements using a microscope did not exceed 26,5%, and in 80% of cases, the microscopy results fell within the confidence interval of the diffraction measurements. The main limitations of the method's application are the distortion of the diffraction pattern for thick (over 6 mm) metal due to beam reflection from the root opening wall surfaces, and difficulties in measuring root opening widths less than 0,1 mm, related to the positioning accuracy of the measuring setup elements. It was established that the displacement of joint edges within the limits regulated by GOST 14771-76 does not affect the accuracy of measuring the gap width by the studied method. A conclusion is drawn about the practical possibility of applying the method in automatic control systems for technological processes and in scientific research on the influence of root opening width and regime parameters on weld formation.

EDN: YXOMNB, <https://elibrary/yxomnb>

Keywords: welding, butt joint, root opening, non-contact measurement, Fraunhofer diffraction, assembly quality control

Влияние зазора на формирование сварного шва и его свойства. Зазор в стыке сварного соединения наряду с параметрами режима является важнейшим фактором, определяющим качество такого соединения. Неверное соотношение между зазором и параметрами режима может привести к таким дефектам стыкового сварного соединения (далее СС), как прожог или непровар, несплавление кромок и уменьшение выпуклости шва [1]. Кроме того, изменяются условия охлаждения и кристаллизации и, как следствие, структура и механические свойства СС [2]. Известно влияние зазора на деформацию СС [3].

Геометрические параметры подготовленных кромок СС, в том числе и зазор, заданы государственными стандартами: при сварке в защитных газах — ГОСТ 14771-76 [4], при сварке под флюсом — ГОСТ 8713-79 [5] и т. д. Установка зазора в стыке соединяемых деталей по стандартам перед сваркой реальных конструкций является трудоемкой операцией, поэтому корневой зазор часто не соответствует рекомендациям стандартов.

Так, обследованием некоего шведского предприятия установлено [6] наличие значительного разброса ширины зазоров в СС. Кроме того, около 35 % исследованных СС на этом предприятии имели дополнительный корневой проход, вызванный чрезмерно большим зазо-

ром при сборке, что стало неожиданностью для технологов. Изменение ширины зазора относительно рекомендованной влияет на эффективность ресурсов, увеличивая образование дефектов и время производства. Авторы работы [7] указывают на большой потенциал повышения эффективности производства, которого можно достичь без крупных инвестиций путем уменьшения дисперсии зазора.

Измерению ширины зазора при сварке, по нашему мнению, уделяется недостаточно внимания. Широко используемый универсальный измеритель для СС (шаблон сварщика) WG1 [8] позволяет определять ширину зазора в диапазоне 0...5 мм, имеет разрешение (цену деления) 1 мм и погрешность $\pm 0,10$ мм. Однако зазор при сварке неплавящимся электродом в аргоне соединений типа С2, С4 и С6 согласно ГОСТ 14771-76 [4] изменяется от 0 до 0,3 мм, а для С7 — до 1 мм, поэтому точное измерение таких малых зазоров шаблонами сварщика невозможно и требует специальных методов.

Особенно актуально измерение малых зазоров неконтактными методами в труднодоступных местах сложных сварных изделий. Наиболее перспективны в этих случаях оптические методы, основанные на дифракции света.

При исследовании влияния зазора в стыке на формирование сварного шва требуется точное знание его размера. Также велика потребность в

системах контроля качества сборки СС и автоматизированных системах управления технологическим процессом, обрабатывающих возмущение по ширине зазора в процессе сварки.

Цель работы — исследование возможности применения дифракции Фраунгофера для измерения зазора в стыке СС.

Описание метода. Будем называть зазор в стыке СС щелью. Картина дифракции Фраунгофера, возникающая на экране при ширине щели b и длине волны излучения λ , показана на рис. 1. Там же приведен график зависимости интенсивности излучения от угла первого минимума дифракционной картины θ_1 [9].

Дифракционная картина имеет максимальную интенсивность при $\theta_1 = 0$ и ряд пиков уменьшающейся интенсивности. Большая часть дифрагированного света попадает между первыми минимумами.

Когда экран находится в бесконечности, тогда два угла θ_1 и θ'_1 становятся точно равными,

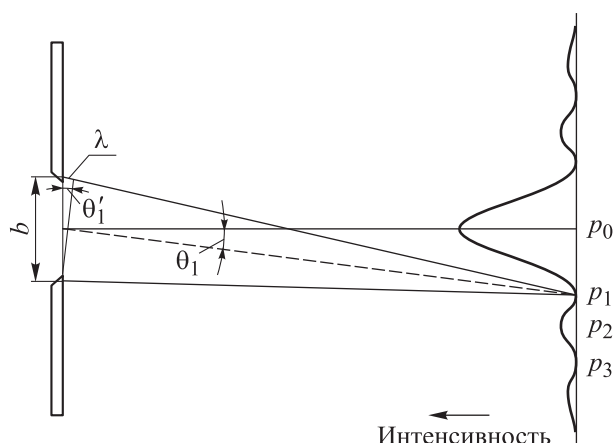


Рис. 1. Картина дифракции Фраунгофера

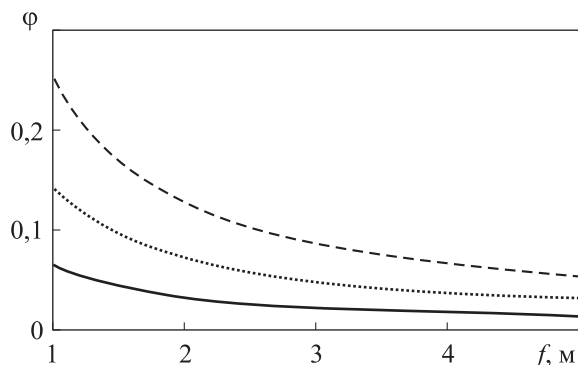


Рис. 2. Зависимости дифракции Фраунгофера φ от расстояния между щелью и экраном f при ширине щели $b = 0,2$ (—), $0,3$ (.....) и $0,4$ мм (---)

т. е. две штриховые линии будут перпендикулярны друг другу, и $\lambda = b \sin \theta_1$ для первого минимума, соответствующего π рад. Отсюда

$$\sin \theta_1 = \lambda / b.$$

Ширина центрального максимума d на расстоянии f от апертуры определяется из условия минимума в дифракционной картине [10]

$$b \sin \theta = m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Заменяя в этом выражении $\sin \theta$ приближенным отношением полуширины главного максимума y к расстоянию f , получаем при $m = 1$

$$y = \frac{\lambda}{b} f.$$

Отсюда при известных длине волны λ , ширине центральной интерференционной полосы $d = 2y$ и расстоянии между щелью и экраном f можно определить ширину щели

$$b = 2 \frac{\lambda}{d} f.$$

Дифракция Фраунгофера возникает, когда безразмерная функция много меньше единицы:

$$\varphi = \frac{b^2}{f \lambda} \ll 1.$$

Последнее выражение позволяет найти зависимость дифракции Фраунгофера от ширины щели и расстояния между щелью и экраном f (рис. 2).

Условия экспериментов. Для исследования дифракции Фраунгофера при измерении зазора в щели собрана установка на оптическом рельсе, состоящая из экрана для наблюдения дифракции, устройства для закрепления в вертикальном положении стыка СС, одномодового газового лазера НГ-2П и расширяющей его луч линзы. Лазер НГ-2П имеет следующие характеристики: длина волны — $0,63$ мкм; средняя мощность — $2,0$ мВт; поляризация — $100:1$; энергетическая расходимость — $1,3 \pm 0,2$ мрад.

Исследуемые образцы соединений С2 [4] собирали с требуемым зазором из двух пластин 100×40 мм толщиной 3 или 6 мм из аустенитной стали типа 18-8.

Сборку СС с требуемым зазором осуществляли приваркой к пластинам способом Ин [4] в аргоне выходных планок, используя измерительные щупы толщиной $0,05 \dots 1,00$ мм с шагом

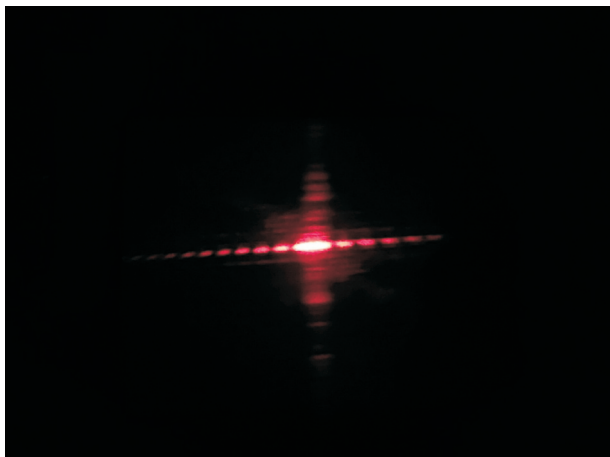


Рис. 3. Пример дифракционной картины, создаваемой прямоугольной щелью

0,05 мм. Выставленный зазор фиксировали прихватками на выходных планках. С помощью микроскопа МПБ-3 с 50-кратным увеличением три раза измеряли зазор собранного СС в трех местах стыка и рассчитывали выборочное среднее. Измерения зазора с использованием интерференции Фраунгофера в каждом опыте повторяли 4–5 раз.

Пример дифракционной картины, создаваемой прямоугольной щелью в ходе экспериментов, приведен на рис. 3. Так как луч лазера не освещает всю вертикальную длину щели, расстояние между вертикальными полосами определяется размерами освещающего луча. Изучение дифракционной картины показывает, что имеются очень тонкие горизонтальные дифракционные полосы выше и ниже основного пятна.

Для получения дифракции от щели с заранее известной шириной в нескольких опытах использовали штангенциркуль, измеряя расстояние между его губками для наружных измерений.

Статистическая обработка результатов экспериментов. Для оценки истинного значения зазора в щели b для каждого опыта при известном числе измерений n с заданной надежностью γ определяли точность оценки [11]

$$\Delta = t_{\gamma} \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где t_{γ} — квантиль распределения Стьюдента для заданных надежности γ и степени свободы $n-1$; σ — выборочное среднее квадратическое отклонение.

Надежность вычисляли по требуемому уровню значимости α в силу симметрии нормального распределения:

$$\gamma = 1 - \frac{\alpha}{2}.$$

Доверительный интервал измеренного зазора определяли как

$$\bar{b} - \Delta < b < \bar{b} + \Delta,$$

где $\bar{b}$ — выборочная средняя ширина зазора, мм.

Вычисления проводили в среде математического пакета Mathcad, где для расчета квантиля распределения Стьюдента t_{γ} использовали функцию $qt()$, принимая уровень значимости $\alpha = 0,1$.

Результаты и обсуждение. Результаты расчета — полученные измерением дифракции Фраунгофера значения выборочной средней ширины зазора $\bar{b}$, дисперсия σ^2 , среднее квадратическое отклонение σ и точность оценки зазора Δ , а также значения средней выборочной ширины зазора $\bar{B}$, измеренные микроскопом МПБ-3, приведены в табл. 1, где S — толщина образца.

Как следует из табл. 1, относительная ошибка определения ширины зазора с использованием интерференции Фраунгофера $\bar{b}$ по сравнению с измеренной микроскопом $\bar{B}$ не превышает 26,5 %. В то же время только в двух опытах (с относительными ошибками 20,0 и 26,5 %) из десяти средняя выборочная ширина зазора $\bar{B}$, определенная с помощью микроскопа, не попадает в доверительный интервал измерений, сделанных с помощью дифракции Фраунгофера.

Применение более толстого металла (> 6 мм) сопряжено с искажением дифракционной картины, что связано с отражением лазерного излучения от поверхностей зазора. Эту проблему можно решить уменьшением отражательной способности поверхностей зазора. Проблем с измерением ширины зазора при использовании металла толщиной менее 3 мм не было, как показали опыты с губками штангенциркуля для $\bar{B} = 0,2$ и $0,4$.

В ходе экспериментов не удалось получить дифракционную картину зазора 0,1 мм, что, по-видимому, связано с недостаточной точностью позиционирования источника лазерного излучения, линзы и стыка СС.

Таблица 1

Результаты исследования

Объект исследования	S, мм	$\bar{B}$, мм	$\bar{b}$, мм	σ^2 , мм ²	σ , мм	Δ , мм	Относительная ошибка, %
Щель между губками штангенциркуля	–	0,2	0,218	0,748	0,0273	0,032	–0,925
	–	0,5	0,454	1,144	0,0338	0,057	9,200
Образец № 5	3	0,40	0,374	0,837	0,0289	0,039	6,3
Образец № 4	3	0,275	0,236	1,21	0,0349	0,059	14,2
Образец № 3	3	0,10	–	–	–	–	–
Образец № 4м	3	0,60	0,541	0,060	0,0775	0,131	9,8
Образец № 8м	3	0,17	0,143	0,082	0,0906	0,039	15,9
Образец № 7м	3	0,60	0,479	2,333	0,0483	0,046	20,0
Образец № 16м	6	0,58	0,509	10,4	0,0102	0,120	15,2
Образец № 3м	3	0,20	0,147	0,64	0,025	0,029	26,5

Таблица 2

Результаты экспериментов с образцами, имеющими смещение кромок $1 \pm 0,2$ мм

Номер образца	S, мм	$\bar{B}$, мм	$\bar{b}$, мм	σ^2 , мм ²	σ , мм	Δ , мм	Относительная ошибка, %
1с	3	0,40	0,437	0,00026	0,039	0,046	–8,3
2с	6	0,55	0,542	0,00012	0,030	0,035	1,4

Часто собранные соединения перед сваркой имеют смещение кромок. ГОСТ 14771–76 [4] допускает смещение кромок не более $0,2S$ мм при толщине металла в стыке до 4 мм и $0,1S + 0,5$ мм при толщине металла в стыке 5...25 мм (но не более 3 мм во всех случаях)

Для исследования возможного влияния смещения кромок на дифракционную картину и, следовательно, на точность измерения ширины зазора проведены дополнительные опыты. Исследуемые образцы соединений С2 [4] собирали из двух пластин 100×40 мм толщиной 3 или 6 мм с зазором 0,3 и 0,6 мм соответственно из аустенитной стали типа 18-8 со смещением кромок $1 \pm 0,2$ мм. Сборку и измерение зазора соединений выполняли по методике, описанной выше. Измерения зазора в каждом опыте повторяли 4–5 раз.

Результаты статистической обработки экспериментальных данных приведены в табл. 2.

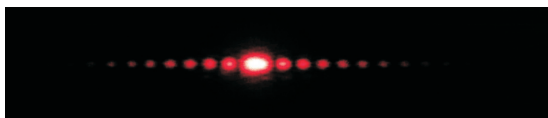


Рис. 4. Пример дифракционной картины, полученной в ходе экспериментов со смещением кромок $1 \pm 0,2$ мм

Дифракционная картина, создаваемая зазором в щели со смещением кромок $1 \pm 0,2$ мм в ходе эксперимента с образцом № 2с, приведена на рис. 4.

Сравнение результатов расчета показывает, что средние значения ширины зазора, полученные предлагаемым методом $\bar{b}$, близки к контрольным измерениям микроскопом $\bar{B}$: $\bar{b} - \Delta < \bar{B} < \bar{b} + \Delta$.

Относительная ошибка измерения для образцов со смещением кромок составляет –8,3 % для толщины $S = 3$ мм и 1,4 % для $S = 6$ мм. Это свидетельствует о том, что смещение кромок не вносит существенной погрешности в измерения ширины зазора с помощью предлагаемого метода.

Полученные результаты позволяют утверждать, что предлагаемый метод измерений можно использовать в практике сварочного производства ответственных изделий, в частности при сборке СС для сварки, в системах контроля сборки и сварки.

Выводы

1. Исследована возможность применения дифракции Фраунгофера для измерения ширины

ны зазора в стыке СС без скоса кромок из аустенитной стали толщиной 3 и 6 мм в диапазоне зазора 0,10...0,58 мм. Определено влияние смещения кромок, величина которого не превышает значений, определенных ГОСТ 14771–76, на точность изменения.

2. Установлено, что предлагаемый метод дает удовлетворительную точность.

3. Показано, что смещение кромок на значение меньше, чем регламентирует ГОСТ 14771–76, не влияет на точность изменения ширины зазора предлагаемым методом.

4. Отмечено, что предлагаемый метод можно применять в научно-исследовательских целях для измерения зазора в стыке при его ширине более 0,1 мм.

Литература

- [1] Wang Z., Chen H., Zhong Q. et al. Recognition of penetration state in GTAW based on vision transformer using weld pool image. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 119, no. 7–8, pp. 5439–5452, doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-021-08538-6>
- [2] Ferdinandov N., Gospodinov D., Ilieva M. et al. Effect of the root gap on the structure and properties of high strength steel S700MC welds. *KEM*, 2021, vol. 890, pp. 201–208, doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.890.201>
- [3] Jang G.B., Kim H.K., Kang S.S. The effects of root opening on mechanical properties, deformation and residual stress of weldments. *Weld. J.*, 2001, no. 3, pp. 80–89.
- [4] ГОСТ 14771–76. *Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры*. Москва, Изд-во стандартов, 1980. 56 с.
- [5] ГОСТ 8713–79. *Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры*. Москва, Изд-во стандартов, 1982. 63 с.
- [6] Öberg A.E., Wikstrand S., Mattsson V. Impact of gaps on resource efficiency in heavy welding industry. *6th Swedish Production Symposium*, 2014. URL: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/240909/local_240909.pdf (дата обращения: 15.10.2025).
- [7] Öberg A.E., Åstrand E. Improved productivity by reduced variation in gas metal arc welding (GMAW). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 1–4, pp. 1027–1038, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0214-4>
- [8] Сварочный шаблон WG1. *rktm.ee: веб-сайт*. URL: <http://rktm.ee/rus/welding-gauge.html> (дата обращения: 15.07.2025).
- [9] Jenkins F.A., White H.E. *Fundamentals of optics*. McGraw-Hill, 2001. 768 p.
- [10] Сивухин Д.В. *Общий курс физики. Т. 4. Оптика*. Москва, Наука, 1980. 751 с.
- [11] Гмурман В.Е. *Теория вероятностей и математическая статистика*. Москва, Высшая школа, 1972. 368 с.

References

- [1] Wang Z., Chen H., Zhong Q. et al. Recognition of penetration state in GTAW based on vision transformer using weld pool image. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 119, no. 7–8, pp. 5439–5452, doi: <http://doi.org/10.1007/s00170-021-08538-6>
- [2] Ferdinandov N., Gospodinov D., Ilieva M. et al. Effect of the root gap on the structure and properties of high strength steel S700MC welds. *KEM*, 2021, vol. 890, pp. 201–208, doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.890.201>
- [3] Jang G.B., Kim H.K., Kang S.S. The effects of root opening on mechanical properties, deformation and residual stress of weldments. *Weld. J.*, 2001, no. 3, pp. 80–89.
- [4] GOST 14771–76. *Dugovaya svarka v zashchitnom gaze. Soedineniya svarnye. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery* [Gas-shielded arc welding. Welded joints. Main types, design elements and dimensions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1980. 56 p. (In Russ.).
- [5] GOST 8713–79. *Svarka pod flyusom. Soedineniya svarnye. Osnovnye tipy, konstruktivnye elementy i razmery* [Flux welding. Welded joints. Main types design elements and dimensions]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1982. 63 p. (In Russ.).
- [6] Öberg A.E., Wikstrand S., Mattsson V. Impact of gaps on resource efficiency in heavy welding industry. *6th Swedish Production Symposium*, 2014. URL: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/240909/local_240909.pdf

- https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/240909/local_240909.pdf (accessed: 15.10.2025).
- [7] Öberg A.E., Åstrand E. Improved productivity by reduced variation in gas metal arc welding (GMAW). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 92, no. 1–4, pp. 1027–1038, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0214-4>
- [8] Svarochnyy shablon WG1. *rktm.ee: website* URL: <http://rktm.ee/rus/welding-gauge.html> (accessed: 15.07.2025).
- [9] Jenkins F.A., White H.E. *Fundamentals of optics*. McGraw-Hill, 2001. 768 p.
- [10] Sivukhin D.V. *Obshchiy kurs fiziki*. T. 4. *Optika* [General course of physics. Vol. 4. Optics]. Moscow, Nauka, 1980. 751 p. (In Russ.).
- [11] Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972. 368 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.12.2025

Информация об авторах

БАБКИН Александр Сергеевич — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Оборудование и процессы машиностроительных производств». ЛГТУ (398055, Липецк, Российская Федерация, Московская ул., д. 30, e-mail: bas-43@yandex.ru).

БАБКИН Игорь Александрович — руководитель группы разработчиков. АО «НЛМК-ИНЖИНИРИНГ» (398008, Липецк, Российская Федерация, Калинина ул., д. 1, e-mail: igor5594@gmail.com).

ТЕРЕХОВ Виктор Викторович — аспирант кафедры «Оборудование и процессы машиностроительных производств». ЛГТУ (398055, Липецк, Российская Федерация, Московская ул., д. 30, e-mail: terekhovvikt@yandex.ru).

Information about the authors

BABKIN Alexander Sergeevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department Equipment and Processes of Machine-building Industries. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 30, e-mail: bas-43@yandex.ru).

BABKIN Igor Alexandrovich — Group Head. NLMK ENGINEERING JSC (398008, Lipetsk, Russian Federation, Kalina St., Bldg. 1, e-mail: igor5594@gmail.com).

TEREKHOV Viktor Viktorovich — Postgraduate, Department Equipment and Processes of Machine-building Industries. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya St., Bldg. 30, e-mail: terekhovvikt@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бабкин А.С., Бабкин И.А., Терехов В.В. Опыт применения дифракции Фраунгофера для измерения зазора в стыке сварного соединения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 9, с. 38–44.

Please cite this article in English as:

Babkin A.S., Babkin I.A., Terekhov V.V. Application of Fraunhofer diffraction in measuring butt joint root opening width. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 9, pp. 38–44.