

Определение оптических свойств материалов, используемых в голографической фотоупругости для решения контактной задачи «рельс – колесо»

Е. В. Брюховецкая, О. В. Конищева, М. В. Брунгардт, А. Н. Щепин ✉

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ stepler8@yandex.ru

Резюме

В данной статье рассматривается возможность использования трехэкспозиционного метода голографической фотоупругости для определения оптических постоянных материалов, используемых для создания объемных моделей рельсов при решении контактной задачи «рельс – колесо». Для определения оптических постоянных C_1 и C_2 надо подобрать такой вид нагружения, при котором по оси симметрии образца одно из напряжений было равно нулю. Этому требованию соответствует задача Фламана. Трехэкспозиционный метод голографической фотоупругости позволяет получать различные семейства интерференционных полос в универсальном интерферометре, что значительно упрощает проведение эксперимента. Для проведения испытаний используются объемные составные модели, основная часть которых изготовлена из оргстекла, а в центральную часть вклеена тонкая пластинка из оптически чувствительных материалов. Одна модель имеет вклейку из эпоксидной смолы, вторая – из поликарбоната. К материалам объемных составных моделей предъявляются такие требования, как равенство упругих постоянных оргстекла основного блока модели, оптического материала вклейки и отвердевшего клея и различие оптических постоянных C_1 и C_2 , поэтому возникает необходимость проведения тарировочных испытаний. Для данных целей была решена задача «действие жесткого штампа на упругую полуплоскость». Тарировочные испытания проводились в универсальном интерферометре. Сравнение экспериментальных результатов с теоретическим решением показало достаточно высокую точность определения оптических постоянных с помощью трехэкспозиционного метода голографической фотоупругости.

Ключевые слова

метод голографической фотоупругости, рельс, контактная задача «колесо – рельс», железная дорога, объемное напряженное состояние, теория упругости

Для цитирования

Брюховецкая Е. В. Определение оптических свойств материалов, используемых в голографической фотоупругости для решения контактной задачи «рельс – колесо» / Е. В. Брюховецкая, О. В. Конищева, М. В. Брунгардт, А. Н. Щепин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 10–15. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).10-15

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.03.2020, поступила после рецензирования: 30.03.2020, принята к публикации: 10.04.2020

Determination of optical properties of materials used in holographic photoelasticity to solve the “rail – wheel” contact problem

E. V. Bryukhovetskaya, O. V. Konishcheva, M. V. Brungardt, A. N. Shchepin ✉

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉ stepler8@yandex.ru

Abstract

This article considers the possibility of using a three-exposure method of holographic photoelasticity to determine optical constants of materials used to create three-dimensional models of rails in solving the “rail – wheel” contact problem. In order to determine the optical constants C_1 and C_2 , it is necessary to select a type of loading at which one of the stresses is equal to zero along the axis of symmetry of the sample. The Flamant problem meets these requirements. The three-exposure method of holographic photoelasticity makes it possible to obtain different sets of interference strips in a universal interferometer, which greatly simplifies the experiment. For testing, volumetric composite models are used, the main part of which is made of organic glass, and a thin plate of optically sensitive materials is glued into the central part. One model has an epoxy gluing-in, the other is made of polycarbonate. The materials of the volumetric composite models are subject to certain requirements, such as the equality of the elastic constants of the plexiglass of the main unit of the model, the optical material of the gluing-in and the hardened adhesive, and the difference of optical constants C_1 and C_2 , so that calibration tests need to be carried out. For these purposes, the problem of “the effect of a rigid stamp on the elastic half-plane” was solved. Calibration check tests were carried out by a universal interferometer. Comparison of experimental results with theoretical solution showed rather high accuracy of determination of optic constants by means of three-exposure method of holographic photoelasticity.

Keywords

holographic photoelasticity method, rail, wheel-rail contact problem, railway, volumetric stress state, elasticity theory

For citation

Bryukhovetskaya E. V., Konishcheva O. V., Brungardt M. V., Shchepin A. N. Opredeleniye opticheskikh svoystv materialov, ispol'zuyemykh v golograficheskoy fotouprugosti dlya resheniya kontaktnoy zadachi «rel's – koleso» [Determination of optical properties of materials used in holographic photoelasticity to solve the “rail – wheel” contact problem]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 10–15. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.2(66).10-15

Article info

Received: 16.03.2020, Revised: 30.03.2020, Accepted: 10.04.2020

Введение

В настоящее время явно прослеживается тенденция к повышению пропускной и провозной способности железных дорог, что приводит к увеличению как статических, так и динамических нагрузок на пару «рельс – колесо» [1–3]. Проведение экспериментальных исследований непосредственно на железной дороге сопряжено с большими трудностями, поэтому широкое применение для исследования контакта колеса с рельсом получили экспериментальные исследования, проводимые в специализированных лабораториях [4, 5].

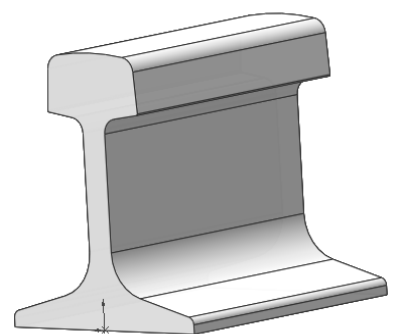
Метод голографической фотоупругости [6, 7] имеет большие возможности при исследовании объемного напряженного состояния моделей реальных объектов, так как объединяет возможности как метода фотоупругости, так и метода интерферометрии. Его недостатком является то, что при исследовании модели в классическом интерферометре можно получить интерференционные картины, промодулированные несколькими семействами интерференционных полос (изоклин, изопахик и изодром). Если расстояние между этими семействами достаточно велико и они практически ортогональны, то расшифровка такой интерференционной картины не составит труда. Однако в большинстве случаев различные семейства интерференционных полос практически параллельны друг другу, и качественная расшифровка таких интерферограмм практически невозможна.

Применение трехэкспозиционного метода голографической фотоупругости для тарировочных испытаний

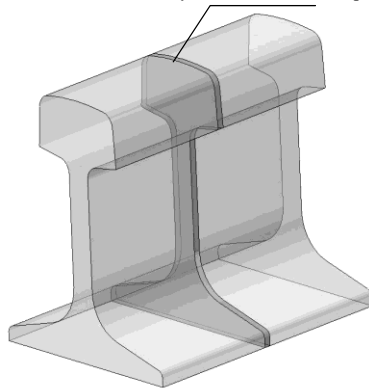
На основе методов голографической фотоупругости и фотоупругости был разработан метод трех экспозиций, позволяющий разделить интерференционные картины изоклин, изопахик и изодром (изолиний постоянной разности хода) [8–11]. На основе данных, которые содержат три семейства интерференционных полос, разработана методика разделения напряжений пространственных задач теории упругости.

Применим разработанный метод трех экспозиций для исследования напряженного состояния при контакте колеса и рельса. Для этого необходимо

изготовить три объемные модели рельса. Одна модель выполнена из блочного стекла (рис. 1, а). Основная часть двух других рельс изготовлена из оргстекла, а в центральную часть вклеена тонкая пластинка из оптически чувствительных материалов (рис. 1, б). Первая модель имеет вклейку из эпоксидной смолы, вторая – из поликарбоната.



а
Вклейка из оптически чувствительного материала



б

Рис. 1. Объемные модели рельса: а – без вклейки из оптически чувствительного материала; б – с вклейкой из оптически чувствительного материала

Fig. 1. Volumetric models of a rail: а – without a gluing-in of an optically sensitive material; б – with a gluing-in made of an optically sensitive material

К материалам составной модели предъявляются следующие требования:

– упругие постоянные оргстекла основного блока модели, оптического материала вклейки и отвердевшего клея должны быть одинаковы;

– оптические постоянные C_1 и C_2 должны быть различны.

Для нахождения материалов, отвечающих таким требованиям, проводятся тарировочные испытания.

Упругие постоянные материала определяются при одноосном растяжении образца, имеющего форму прямоугольной полоски. Образец растягивают при его ступенчатом нагружении на прессе типа УП-3. Продольные Δl и поперечные Δb линейные деформации измеряются с помощью тензодатчиков сопротивления. На основании этих измерений определяется модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

Примерно одинаковые упругие постоянные имеют такие материалы, как блочное оргстекло, эпоксидная смола ЭД-6М и поликарбонат [12, 13].

Для определения оптических постоянных C_1 и C_2 надо подобрать такой вид нагружения, при котором по оси симметрии образца одно из напряжений будет равно нулю. Этому требованию соответствует задача Фламана (нагружение полуплоскости сосредоточенной силой F).

В задаче Фламана при $y = 0$ и $\theta = 0$ имеется теоретическое решение

$$\sigma_z = -\frac{2F}{\pi z t}; \quad \sigma_y = 0,$$

где F – сила, действующая на полуплоскость; t – толщина образца.

Экспериментальное значение σ_z вычислялось с использованием картины интерференционных полос (см. рис. 1) по формуле

$$\sigma_z = \sigma_0^{1,0} n,$$

где n – номер фотоупругой полосы; $\sigma_0^{1,0}$ – цена полосы модели.

Для определения оптических постоянных C_1 и C_2 используются картины изодром [4]. Изодромы – это изолинии постоянной абсолютной разности хода δ_1 и δ_2

$$\delta_1 = (C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2)t;$$

$$\delta_2 = (C_2\sigma_1 + C_1\sigma_2)t,$$

где C_1 и C_2 – оптические постоянные; t – толщина образца

Разработанный ранее универсальный интерферометр, позволяет получать интерференционную картину изодром трехэкспозиционным методом голографической фотоупругости [4, 5].

Последовательность трехэкспозиционного метода получения изодром следующая:

1. Фотографируется модель в ненагруженном состоянии, свет поляризован по кругу (полярископ темного поля).

2. Фотографируется та же модель в нагруженном состоянии (полярископ темного поля).

3. Фотографируется та же модель в нагруженном состоянии, только меняется поляризация света, т. е. имеем круговой полярископ светлого поля.

При первых двух экспозициях получается совместная картина изохром – изолиний разности главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$), и изодром (рис. 2). При третьей экспозиции на картину изохром темного поля накладывается картина изохром светлого поля и получается серый фон, на котором отчетливо видны изодромы (рис. 3).



Рис. 2. Совместная картина изохром и изодром
Fig. 2. Joint picture of isochromats and isodromics

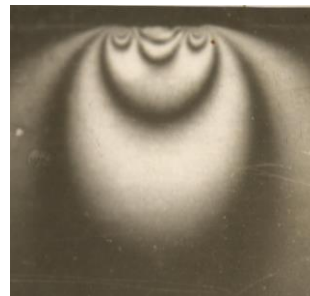


Рис. 3. Картины изодром, полученные трехэкспозиционным методом голографической фотоупругости

Fig. 3. Pictures of the isodromics obtained by the three-exposure method of holographic photoelasticity

Определение оптических постоянных C_1 и C_2 при решении задачи Фламана

Оптические постоянные C_1 и C_2 определялись для эпоксидной смолы и поликарбоната [14]. Испытывались образцы следующих размеров: $80 \times 80 \times 3$. Сила, действующая на плоскость $F = 800$ Н.

Формулы для определения C_1 и C_2 выводятся из уравнения Максвелла – Неймана [15, 16]:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1\sigma_1 + C_2\sigma_2; \\ n_2 - n_0 &= C_1\sigma_2 + C_2\sigma_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления для света, поляризованного соответственно в направлении σ_1 и σ_2 ; n_0 – показатель преломления в начальном ненагруженном состоянии.

Применительно к задаче Фламана уравнения (1) примут вид:

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \sigma_1; \\ n_2 - n_0 &= C_2 \sigma_1. \end{aligned}$$

Так как

$$n_1 - n_0 = \frac{N_1 \lambda}{t}; \quad n_2 - n_0 = \frac{N_2 \lambda}{t},$$

то

$$C_1' = \frac{N_1 \lambda}{t \sigma_1}; \quad C_2' = \frac{N_2 \lambda}{t \sigma_1}, \quad (2)$$

где N_1 – номер изодромы при вертикальной поляризации света; N_2 – номер изодромы при горизонтальной поляризации света; λ – длина волны света.

Так как картина изодром учитывает не только изменения абсолютной разности хода, но и изменение толщины образца и показателя преломления [17–19], то по формулам (2) можно определить только оптические постоянные C_1' и C_2' , а оптические постоянные C_1 и C_2 определяются по формулам

$$C_1 = C_1' + \frac{\mu}{E}(n_0 - n_1);$$

$$C_2 = C_2' + \frac{\mu}{E}(n_0 - n_2),$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Результаты исследований

Результаты тарировочных испытаний приведены (табл.).

Таблица. Упругие и оптические постоянные материалов объемных моделей
Tables. Elastic and optical constants of volumetric model materials

Наименование материала	$E \cdot 10^3$, Н/мм ²	μ	$C_1 \cdot 10^{-5}$, мм ² /Н	$C_2 \cdot 10^{-5}$, мм ² /Н
Оргстекло	3,00	0,35	–3,9	–3,30
ЭД-6М	2,97	0,34	0,28	–3,93
Поликарбонат	3,12	0,335	–8,34	–16,38

Для подтверждения правильности определения оптических постоянных материалов были проведены тарировочные испытания на примере решения задачи о действии прямоугольного жесткого штампа на упругую полуплоскость.

Ниже приведены графики распределения напряжения σ_y по горизонтальному сечению Oy_1 , расположенному на 2 мм ниже края полуплоскости (рис. 3).

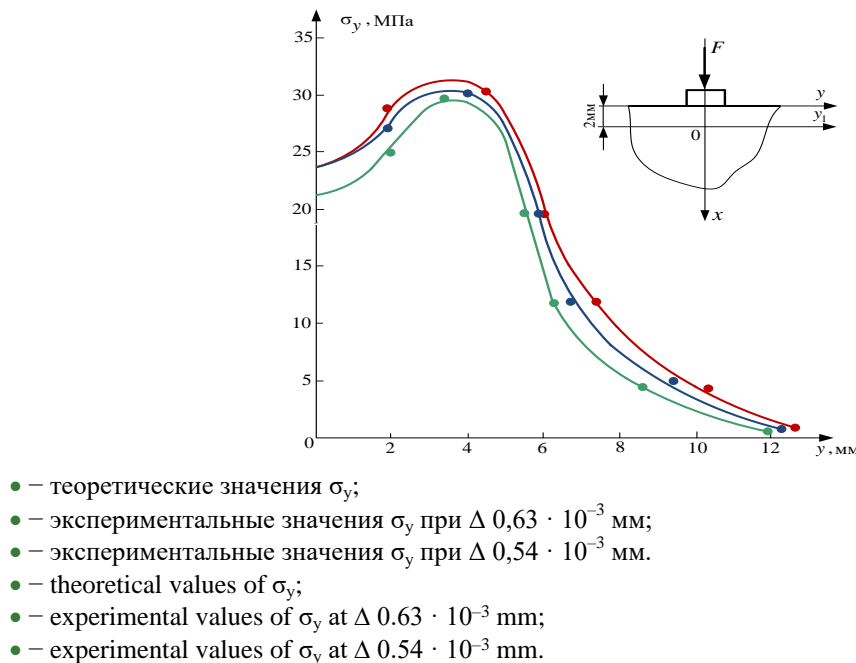


Рис. 4. Графики распределения напряжения σ_y по горизонтальному сечению Oy_1 , расположенному на 2 мм ниже края полуплоскости

Fig. 4. Plots of the stress distribution σ_y over the horizontal section Oy_1 , located 2 mm below the edge of the half-plane

Заключение

Сравнение экспериментальных результатов с теоретическим решением показало достаточно высокую точность определения оптических постоян-

ных C'_1 и C'_2 с помощью трехэкспозиционного метода голографической фотоупругости.

Список литературы

1. Фрохт М. Фотоупругость // М. : ГИТТЛ ; Мир, 1950. 488 с.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М. : Мир, 1982. 316 с.
3. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in leaf contaminated wheel-rail contacts / O. Arias-Cuevas et al. // STLE/ASME 2008 International Joint Tribology Conference / American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. 2008. P. 213–215.
4. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 240 с.
5. Брюховецкая Е.В., Конищева О. В. Универсальный голографический интерферометр // Вестник МГТУ Станкин. 2013. № 2. С. 102–104.
6. Брюховецкая Е.В., Брюховецкая Т.М. Прикладные задачи строительной механики. Экспериментальные методы исследования напряжено-деформированного состояния конструкций. СПб. : Изд-во СибГТУ, 1999.
7. Mijajlović M. Numerical simulation of the material flow influence upon heat generation during friction stir welding // Facta universitatis-series: Mechanical Engineering. 2013. Т. 11. № 1. Pp. 19–28.
8. Modeling thermal effects in braking systems of railway vehicles / M.S. Milošević et al. // Thermal science. 2012. Т. 16. № 2. P. 515–526.
9. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев и др. М. : Машгиз. 1958. Т. 2. 974 с.
10. Determination of friction heat generation in contact of wheel-rail set using FEM / A. Miltenović et al. // proc. XVI International Scientific-expert Conference on Railway Railcon. 2014. № 1+4, Niš. P. 21–24.
11. Determination of friction heat generation in wheel-rail contact using fem / A. Miltenović et al. // Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2015. Т. 13. № 2. Pp. 99–108.
12. Дюрелли А. Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод). М. : Мир, 1970. 48 с.
13. Степанова Л.В. Математические методы механики разрушения. М. : Физматлит, 2009. 336 с.
14. Albaut G.N. Nelinejnaja fotouprugost' v prilozhenii k zadacham mehaniki razrusheniya. Novosibirsk : NGASU, 2002. 112 p.
15. Thomas B.P., Pillai S.A., Narayanamurthy C.S. Photoelastic digital holographic polariscope // Journal of Modern Optics. 2019. Т. 66. № 8. Pp. 817–828.
16. Forte P., Paoli A., Razonale A.V. A CAE approach for the stress analysis of gear models by 3D digital photoelasticity // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2015. Т. 9. № 1. P. 31–43.
17. Takao S., Yoneyama S., Takashi M. Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry // Optics and lasers in engineering. 2002. Т. 38. № 5. Pp. 233–244.
18. Ju Y. et al. Experimental visualisation methods for three-dimensional stress fields of porous solids // Experimental Techniques. 2017. Т. 41. № 4. P. 331–344.
19. Zuccarello B., Tripoli G. Photoelastic stress pattern analysis using Fourier transform with carrier fringes: influence of quarter-wave plate error // Optics and lasers in engineering. 2002. Т. 37. № 4. P. 401–416.

References

1. Frokht M. Fotouprugost' [Photoelasticity]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury Publ. Moscow: Mir Publ., 1950, 488 p.
2. Vest Ch. Golograficheskaya interferometriya [Interferometric holography]. Moscow: Mir Publ., 1982, 316 p.
3. Arias-Cuevas O. et al. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in leaf contaminated wheel-rail contacts. STLE/ASME 2008 International Joint Tribology Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2008, pp. 213–215.
4. Razumovskii I.A. Interferentsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruемого tverdogo tela [Interference-optical methods of deformable solid body mechanics]. Moscow: Bauman MGTU Publ., 2007, 240 p.
5. Bryukhovetskaya E.V., Konishheva O.V. Universal'nyi golograficheskii interferometr [A scheme of the universal interferometer]. Vestnik MGTU "Stankin", 2013, No. 2, pp. 102–104.
6. Bryukhovetskaya E.V., Bryukhovetskaya T.M. Prikladnye zadachi stroitel'noi mekhaniki. Eksperimental'nye metody issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktssii [Application tasks of construction mechanics. Experimental methods of investigation of stress-strain state of structures]. A monograph. SibGTU Publ., 1999.
7. Mijajlović M. Numerical simulation of the material flow influence upon heat generation during friction stir welding. Facta universitatis-series: Mechanical Engineering, 2013, Vol. 11, No. 1, pp. 19–28.
8. Milošević M. S. et al. Modeling thermal effects in braking systems of railway vehicles. Thermal science, 2012, Vol. 16, No. 2, pp. 515–526.
9. Ponomarev S.D. et al. Raschety na prochnost' v mashinostroenii [Strength Calculations in Mechanical Engineering]. Moscow: Mashgiz Publ., 1958, Vol. 2, 974 p.
10. Miltenović A. et al. Determination of friction heat generation in contact of wheel-rail set using FEM. Proc. XVI International Scientific-expert Conference on Railway Railcon '1+4, Niš, 2014, pp. 21–24.

11. Miltenović A. et al. Determination of friction heat generation in wheel-rail contact using FEM. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 13, No. 2, pp. 99–108.
12. Durelli A. J., Riley W.F., Introduction to Photoelasticity. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1965. (Russ. ed.: Dyurelli A. Vvedenie v fotomekhaniku: (polarizacionno-opticheskiy metod. Per. s angl. Mir Publ., 1970, 484 p.).
13. Stepanova L.V. Matematicheskie metody mekhaniki razrusheniya. [Mathematical Methods of Fracture Mechanics]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2009, 336 p.
14. Albaut G.N. Nelineinaya fotouprugost' v prilozhenii k zadacham mekhaniki razrusheniya [Nonlinear photoelasticity in addition to fracture mechanics tasks]. Novosibirsk: NGASU Publ., 2002, 112 p.
15. Thomas B.P., Pillai S.A., Narayanamurthy C.S. Photoelastic digital holographic polariscope. *Journal of Modern Optics*, 2019, Vol. 66, No. 8, pp. 817–828.
16. Forte P., Paoli A., Razionale A. V. A CAE approach for the stress analysis of gear models by 3D digital photoelasticity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2015, Vol. 9, No. 1, pp. 31–43.
17. Takao S., Yoneyama S., Takashi M. Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry. *Optics and lasers in engineering*, 2002, Vol. 38, No. 5, pp. 233–244.
18. Ju Y. et al. Experimental visualisation methods for three-dimensional stress fields of porous solids. *Experimental Techniques*, 2017, Vol. 41, No. 4, pp. 331–344.
19. Zuccarello B., Tripoli G. Photoelastic stress pattern analysis using Fourier transform with carrier fringes: influence of quarter-wave plate error. *Optics and lasers in engineering*, 2002, Vol. 37, No. 4, pp. 401–416.

Информация об авторах

Брюховецкая Елена Викторовна – к. т. н., доцент, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: ebruhoveckaya@mail.ru

Конищева Ольга Васильевна – к. т. н., доцент, доцент кафедры прикладной механики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: olgakon13@mail.ru

Брунгардт Максим Валерьевич – к. т. н., доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: maxbrung@gmail.com

Щепин Александр Николаевич – старший преподаватель кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: stepler8@yandex.ru

Information about the authors

Elena V. Bryukhovetskaya – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Design-technology support of machine-building productions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: ebruhoveckaya@mail.ru

Ol'ga V. Konishcheva – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Subdepartment of Applied Mechanics, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: olgakon13@mail.ru

Maksim V. Brungardt – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Design-technology support of machine-building productions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: maxbrung@gmail.com

Aleksandr N. Shchepin – Senior Lecturer of the Subdepartment of Design-technology support of machine-building productions, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: stepler8@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).15-22

УДК 621.7.019.7

Перспективы применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей сверхвысокочастотной электроники

Ю. И. Карлина¹, В. Е. Гозбенко^{2,3}✉, С. К. Каргапольцев²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

³ Ангарский государственный технический университет

✉ vgozbenko@yandex.ru

Резюме

Статья посвящена исследованию перспектив применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев с деталей сверхвысокочастотной электроники, которые являются малогабаритными, имеющими высокие требования точности до 7 квалитета, конструкцию с труднодоступными поверхностями. Заусенцы на этих деталях по техническим требованиям не допускаются. Исключить появление заусенцев на этапе лезвийной механообработки не удастся. Применяемые на производстве методы ручного и механического удаления заусенцев являются затратными. Поиск менее затратных методов удаления заусенцев с малогабаритных деталей сверхвысокочастотной электроники, имеющих труднодоступные поверхности, является актуальной задачей. Цель исследования оценить перспективы применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев для данных деталей. В статье приведен обзор электрофизикохимических методов удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей сверхвысокочастотной электроники, рассмотрены образцы