

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.891

doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18

АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММЫ ПРИРАБОТКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Алексей Васильевич Волченков^{1✉}, Любовь Геннадьевна Никитина²

^{1,2}Муромский институт (филиал) «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Муром, Россия

¹c067bk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6536-8218>

²nikitina-nlg@yandex.ru

Аннотация

Представлены результаты дифференциально-геометрического моделирования и лабораторных исследований приработки упрочненных материалов сложных пространственных поверхностей. Описаны критерии высокопроизводительной приработки. Показано, что для сложных пространственных поверхностей мгновенная скорость приработки может быть описана через скорость износа, которая определяет интенсивность удаления частиц износа в процессе приработки детали в соответствии с выбранным способом приработки. Другим критерием

производительности приработки предлагается мгновенная скорость износа. Полученные зависимости позволяют совершенствовать режимы технологической приработки материалов деталей по критерию ее производительности. Лабораторная проверка полученных режимов позволяет сформулировать критериальные условия высокоэффективной приработки упрочненных криволинейных поверхностей.

Ключевые слова: приработка, режим, приработка, износ, шероховатость.

Ссылка для цитирования:

Волченков А.В. Алгоритм разработки программы приработки криволинейных поверхностей / А.В. Волченков, Л.Г. Никитина // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 02. – С. 12 – 18. doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18.

Original article

Open Access Article

ALGORITHM FOR DEVELOPING THE PROGRAM OF CURVED SURFACES BURN-IN

Aleksey Vasilyevich Volchenkov^{1✉}, Lyubov Gennadyevna Nikitina²

^{1,2} Murom Institute (branch) of Vladimir State University, Murom, Russia

¹ c067bk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6536-8218>

² nikitina-nlg@yandex.ru

Abstract

The results of differential geometric modeling and laboratory studies of the burn-in of hardened materials for complex sculpted surfaces are presented. The criteria of high-performance burn-in are given. It is shown that for complex sculpted surfaces, the instantaneous wear rate can be considered in terms of the wear rate, which determines the intensity of removing wear particles during the burn-in of the part in accordance with the selected method. Another criterion for the

burn-in productivity is the instantaneous wear rate. The obtained dependences allow improving the modes of technological burn-in of part materials according to the criterion of its productivity. Laboratory verification of the obtained modes makes it possible to formulate criteria conditions for highly efficient burn-in of hardened curved surfaces.

Keywords: burn-in, mode, wear, roughness.

Reference for citing:

Volchenkov AV, Nikitina LG. Algorithm for developing the program of curved surfaces burn-in. Transport Engineering. 2023; 2:12-18. doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-12-18.

Введение

Применяемые и разрабатываемые в промышленности программы технологической приработки сложных упрочненных поверхностей деталей обеспечивают приработку деталей в соответствии с техническими требованиями [1-4]. Одновременно с этим, они должны обеспечивать возможно большую производительность приработки, для чего необходимо предусматривать возможность оптимизации режимов приработки по критерию скорости приработки [5-8].

Скорость приработки сложной поверхности детали измеряется площадью прирабатываемой поверхности детали и определяет интенсивность увеличения площади касания поверхности детали при ее приработке некоторым способом [9-12]. В качестве показателя скорости приработки может быть принята средняя скорость приработки

$$R_a = A/t$$

где A – площадь сложной поверхности детали, прирабатываемой за время t .

Другим показателем эффективности процесса приработки служит мгновенная скорость приработки, рассчитываемая по формуле

$$R = dA/dt \quad (1)$$

Если $A(t) = at$, то $R_a = R = a$. Выражение для определения скорости приработки сложной поверхности для общего случая можно найти, если $A(t)$ изменяется во времени.

Векторное двухпараметрическое уравнение скорости приработки детали можно представить в виде

$$\vec{r}_p = \vec{r}_p(U_p; V_p)$$

где U_p и V_p – Гауссовы координаты на сложной поверхности детали.

Площадь прирабатываемой поверхности детали можно рассчитать по следующей формуле:

$$A_p = \iint_A |dA_p|$$

где dA_p – векторный элемент площади, определяемый из выражения

$$\vec{dA} = \left(\frac{\partial \vec{r}_p}{\partial U_p} \cdot \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial V_p} \right) dU_p dV_p$$

Модуль вектора \vec{dA} , определяющий

элемент площади сложной поверхности детали,

$$|\vec{dA}| = \left| \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial U_p} \cdot \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial V_p} \right| dU_p dV_p$$

В общем случае криволинейные координаты U_p и V_p зависят от времени t :

$$U_p = U_p(\omega; t); V_p = V_p(\omega; t) \quad (2)$$

где ω – некоторая новая переменная.

Тогда площадь прирабатанной сложной поверхности детали можно вычислить по формуле

$$A_p = \iint_A \left| \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial U_p} \cdot \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial V_p} \right| |D_p| dt d\omega \quad (3)$$

где D_p – якобиан преобразования (2),

$$D_p = \begin{vmatrix} \frac{\partial U_p}{\partial \omega} & \frac{\partial U_p}{\partial t} \\ \frac{\partial V_p}{\partial \omega} & \frac{\partial V_p}{\partial t} \end{vmatrix}$$

Следует отметить, что рассматривается область, где знак якобиана D_p сохраняется постоянным.

Подставив выражение (3) в формулу (1), получим зависимость для вычисления мгновенной СП сложной поверхности детали

$$W(t) = \iint_{\omega_1(t)}^{\omega_2(t)} \left| \frac{d\vec{r}_p}{dU_p} \cdot \frac{d\vec{r}_p}{dV_p} \right| |D_p| d\omega \quad (4)$$

где $\omega_2(t)$ и $\omega_1(t)$ – предельные значения переменной ω на координатной линии вида $t = const$, соответствующие границам прирабатываемого участка сложной поверхности детали.

Выражение (4) непосредственно связывает функцию приработки с одной из характеристик ее производительности.

Скорость износа сложной поверхности прирабатываемой детали можно представить как объем износа, удаляемого с детали в единицу времени [4-7]. Здесь по износом упрочненной стальной поверхности следует рассматривать вместе с упругой объемной деформацией контактирующих поверхностей, также эллиптический точечный контакт, профиль давления, фактическую площадь контакта и текущие размеры контурной площади контакта. Таким образом, скорость износа определяет интенсивность «удаления» частиц износа в процессе приработки детали в соответствии с выбранным способом.

Для расчета скорости износа необ-

ходимо знать векторные уравнения исходной поверхности детали и приработанной поверхности детали, записанные в одной и той же системе координат. В качестве показателей скорости износа можно использовать среднюю скорость износа

$$R_r = V_r/t,$$

где V_r – объем материала, удаленного с поверхности за время t .

Другим показателем эффективности процесса приработки сложной поверхности может служить мгновенная скорость износа

$$R_r = dV_p/dt.$$

Элемент объема определяется по формуле

$$dV_p = \vec{b}_r \cdot \vec{dA}_p, \quad (5)$$

Выразим криволинейные координаты U_p и V_p через новые переменные ω и t (где t – текущее значение времени приработки сложной поверхности детали, а ω – некоторая переменная). Тогда получим выражение для расчета мгновенной скорости износа:

$$R_r = \int_{\omega_1(t)}^{\omega_2(t)} \left(\vec{b}_r \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial U_p} \cdot \frac{\partial \vec{r}_p}{\partial V_p} \right) |D_p| d\omega, \quad (6)$$

где $\omega_2(t)$ и $\omega_1(t)$ – предельные значения переменной ω на координатной линии вида $t = const$, соответствующие границам прирабатываемого участка сложной поверхности детали.

При определении мгновенной скорости износа R_r по формуле (6), так же как и при определении скорости приработки R по формуле (4), предполагается, что на приработанной поверхности не остается участков исходной шероховатости.

Скорость приработки может быть определена и еще одним способом. Для этого рассмотрим поверхность трения, по которой происходит непрерывный или прерывистый мгновенный контакт прирабатываемых деталей. Радиус-вектор r_m этой поверхности может быть найден из функции приработки путем подстановки вместо всех переменных, зависящих от времени, соответствующих им выражений. В результате получаем уравнение производности в одном из двух вариантов.

где \vec{dA}_p – векторный элемент площади сложной поверхности детали;

\vec{b}_r – вектор удаляемого слоя, определяемый как разность векторов

$$\vec{b}_r = \vec{r}_r - \vec{r}_p;$$

где \vec{r}_r – радиус-вектор некоторой точки на поверхности приработанной детали;

\vec{r}_p – радиус-вектор соответствующей точки на прирабатываемой поверхности детали.

Радиусы-векторы \vec{r}_r и \vec{r}_p записываются в одних и тех же криволинейных координатах U_p и V_p .

Интегрируя выражение (5) по поверхности, получим соотношение для объема износа

$$V_p = \iint_A \vec{b}_r \cdot \vec{dA}_p = \iint_A \left(\vec{b}_r \frac{dr_p}{dU_p} \cdot \frac{dr_p}{dV_p} \right) dU_p dV_p.$$

При непрерывном контакте исходной поверхности в процессе приработки

$$r_m = r_m(U_b; V_b; T),$$

где U_b и V_b – Гауссовы координаты на исходной поверхности; T – фиксированный момент времени.

При дискретном контакте исходной поверхности в процессе приработки ограниченного ею тела

$$r_m = r_m(U_c; T),$$

где U_c – координата вдоль кромки прерывистой поверхности.

Векторный элемент \vec{dA}_m поверхности имеет вид:

для первого варианта

$$\vec{dA}_m = \left(\frac{\partial \vec{r}_m}{\partial U_m} \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial V_m} \right) dU_c dV_c,$$

для второго варианта

$$\vec{dA}_m = \left(\frac{\partial \vec{r}_m}{\partial U_m} \cdot \frac{\partial \vec{r}_m}{\partial V_m} \right) dU_c dt.$$

Этот элемент поверхности, перемещаясь, теряет в единицу времени объем износа

$$dV_p = \vec{\omega}_p \cdot \vec{dA}_m,$$

где $\vec{\omega}_p$ – скорость перемещения элемента \vec{dA}_m относительно прирабатываемой детали, определяемая дифференцированием по времени вектора \vec{r}_p . Тогда интенсивность износа, т. е. скорость износа

$$R(t) = \iint_A \vec{r}_p \cdot \vec{dA}_m.$$

Для случая приработки сложной

прерывистой поверхности детали эта формула имеет вид

$$R(t) = \sum_{m=1}^N \iint_{A_{mL}} \overrightarrow{r_{pL}} \cdot \overrightarrow{dA_{mL}},$$

Материалы, модели, эксперименты и методы

В соответствии с приведенными зависимостями при разработке программ приработки сложных поверхностей деталей следует предусматривать возможность оптимизации приработки по критерию его производительности, достигая при этом максимума скорости приработки. Выход в область оптимальных условий приработки производится путем варьирования всех параметров процесса, влияющих на его производительность, и, в первую очередь, путем варьирования режимов приработки и установления соответствующих условий приработки.

Алгоритм определения режимов приработки должен быть широкоуниверсальным. Чем на более общем уровне выполнено моделирование процессов приработки, тем большими потенциальными возможностями обладает разработанная программа, тем рациональнее получается алгоритм решения оптимизационных задач, тем эффективнее технологический процесс обкатки.

Разработанная модель должна являться основой для создания обобщенного метода компьютерного моделирования процесса приработки сложных поверхностей деталей, охватывающего и комплексно учитывающего широкий круг факторов, влияющих на ход процесса, модели, системы. Чтобы модель процесса приработки деталей со сложными поверхностями обладала большей эффективностью, она должна допускать активное вмешательство в процесс управления им на любом его этапе.

Алгоритм процесса приработки должен раскрывать внутренние функциональные связи между особенностями

Результаты

В таблице показаны результаты приработки указанных шестерён по типовому и разработанному режимам по критерию

где N – число прерывистых поверхностей, одновременно участвующих в контакте; A_{mL} – площадь L -ой поверхности прерывистого контакта.

приработки сложных поверхностей деталей, особенностей материалов, смазки и режимов нагружения (скорости, нагрузки, температуры и пр.), что позволит проектировать программы приработки, создавать высокоэффективные методики назначения режимов обкатки, целенаправленно управлять микрогеометрическими, физико-механическими и иными параметрами приработанных сложных упрочненных поверхностей деталей.

Указанным требованиям удовлетворяет разрабатываемая модель программы, учитывающая дифференциально-геометрические особенности приработываемых поверхностей. Ее применение позволит оптимизировать основные параметры процесса приработки сложных поверхностей по критерию максимальной производительности приработки при гарантированном обеспечении заданного качества поверхностей.

В результате экспериментальных исследований выявлено, что при приработке шестерён ($m = 4.5$, сталь 20ХГНМ, с цементацией 600 HV глубиной 0,6 мм – первая ведущая, и 12ХНЗА с цементацией 700 HV глубиной 0,8 мм – вторая ведомая), существует некоторый диапазон изменения внешних параметров (нагрузки, скорости, температуры), в котором скорость приработки существенно меняется. Так же следует отметить, что время достижения равновесной шероховатости также заметно варьируется. На данном этапе работы критерием оценки приработки являлась снижение времени и шероховатости рабочих поверхностей от технологической до равновесной.

достигаемой равновесной шероховатости Ra и Rz .

Изменение параметров шероховатости рабочих поверхностей шестерен, прирабатываемых по типовому и новому режиму

Table

Changing the roughness parameters of gear working surfaces run-in on according to the standard and new mode

Параметры шероховатости, мкм		Нагрузка 0,9 ГПа				Время, мин	Нагрузка 1,7 ГПа		
		Первая шестерня		Вторая шестерня			Первая шестерня	Вторая шестерня	Время, мин
		до	после	до	после				
типовой режим	Ra	0,32	0,10	0,36	0,12	5,5	0,03	0,08	5
	Rz	2,27	0,55	2,41	0,55		0,37	0,34	
новый режим	Ra	0,08	0,01	0,09	0,01	3,7	0,01	0,01	3,8
	Rz	0,75	0,15	0,76	0,09		0,08	0,08	

Приработка проводилась на специальном стенде с возможностью регулирования нагрузки (тормозного момента) и скорости, масло ИЗОА. Обкатку проводили первоначально по достижению макси-

мального давления в контакте 0,9 гПа. После этого измерялась шероховатость рабочей поверхности зубьев шестерен (рис.).

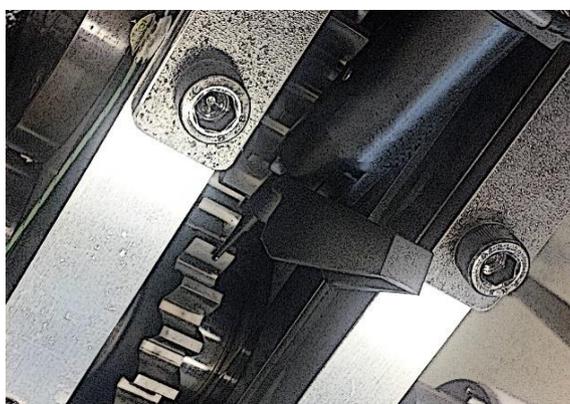


Рис. Измерение параметров шероховатости рабочих поверхностей шестерен в процессе испытаний

Fig. Measurement of the roughness parameters of the working surfaces of gears during testing

Затем, те же шестерни прирабатывались до давления в контакте 1,7 ГПа. В таблице приведены усредненные данные по шероховатости в начале испытаний и

по их завершению всех испытанных шестерен (8 пар). Окончание приработки определялось по времени выбега шестерен после отключения привода.

Заключение

Полученные результаты позволят сделать выводы о новых режимах:

- равновесная шероховатость Ra и Rz , достигаемая после приработки по новому режиму ниже;
- при повышении давления до 1,7 ГПа, приработанные при давлении 0,9 ГПа

поверхности снижают шероховатость;
– скорость изменения шероховатости при приработке с учетом геометрических особенностей поверхностей также выше.

Полнота прохождения процесса приработки определяется оптимальным

соотношением нагрузочной способности материалов, и внешними нагрузочными показателями. Производительность при-

работки материалов определяется степенью ее завершенности на каждом из этапов нагружения [13].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Miracle, D.B., Senkov, O.N.: A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater.* 122, 448–511 (2017)
2. Green, D.A., Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S.: Wear effects and mechanisms of sootcontaminated automotive lubricants. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part J J. Eng. Tribology* 220(3), 159–169 (2006)
3. Gorsse, S., Miracle, D.B., Senkov, O.N.: Mapping the world of complex concentrated alloys. *Acta Mater.* 135, 177–187 (2017)
4. Jao, T.C., Li, S., Yatsunami, K., Chen, S.J., Csontos, A.A., Howe, J.M.: Influence of soot contamination in API CI-4 engine oil on four-ball metallic wear using electron microscopy image analysis. *Lubr. Sci.* 16, 111–126 (2006). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/886/1/012003>
5. Pickering, E.J., Jones, N.G.: High-entropy alloys: A critical assessment of their founding principles and future prospects. *Int. Mater. Rev.* 61, 183–202 (2016). <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1180020>
6. Zhang, Y., et al.: Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Prog. Mater. Sci.* 61, 1–93 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
7. Supanamok, C., Karin, P., Benyajati, C., Hanamura, K.: Influence of soot contamination in API CI-4 engine oil on four-ball metallic wear using electron microscopy image analysis. In: *Proceedings of the International Conference on 2015 JSAE Annual Congress Proceedings (Yogohama)*, p. 1673–1679 (2015).

8. Otto, F., Dlouhý, A., Somsen, C., Bei, H., Eggeler, G., George, E.P.: The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Mater.* 61, 5743–5755 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
9. Troparevsky, M.C., Morris, J.R., Kent, P.R.C., Lupini, A.R., Stocks, G.M.: Criteria for predicting the formation of single-phase high-entropy alloys. *Phys. Rev. X* 5, 011041 (2015). <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.011041>
10. Suárez, A., Veiga, F., de Lacalle, L.N.L., Polvorosa, R., Lutze, S., Wretland, A.: Effects of ultrasonics-assisted face milling on surface integrity and fatigue life of ni-alloy 718. *J. Mater. Eng. Perform.* 25(11), 5076–5086 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2343-6>
11. Ahmed, N., Mitrofanov, A.V., Babitsky, V.I., Silberschmidt, V.V.: Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718. *Mater. Sci. Eng., A* 424, 318–325 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.025>
12. Chen, W., Huo, D., Shi, Y., Hale, J.M.: State-of-the-art review on vibration-assisted milling: Principle, system design, and application. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 97(5–8), 2033–2049 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2073-z>
13. Tribological principles of regimes of the rolling testing of engines. Volshenkov A.V., Bushe N.A. *Journal of Friction and Wear.* 1991. T. 12. № 3. C. 506-514.

REFERENCES

1. Miracle DB, Senkov ON. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater.* 2017;122:448–511.
2. Green DA, Lewis R, Dwyer-Joyce RS. Wear effects and mechanisms of soot contaminated automotive lubricants. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part J J. Eng. Tribology.* 2006;220(3):159–169.
3. Gorsse S, Miracle DB, Senkov ON. Mapping the world of complex concentrated alloys. *Acta Mater.* 2017;135:177–187.
4. Jao TC, Li S, Yatsunami K, Chen SJ, Csontos AA, Howe JM. Influence of soot contamination in API CI-4 engine oil on four-ball metallic wear using electron microscopy image analysis. *Lubr. Sci.* 2006;16:111–126. Available from: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/886/1/012003>
5. Pickering EJ, Jones NG. High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects. *Int. Mater. Rev.* 2016;61:183–202.

6. Zhang Y. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Prog. Mater. Sci.* 2014;61:1–93. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
7. Supanamok C, Karin P, Benyajati C, Hanamura K. Influence of soot contamination in API CI-4 engine oil on four-ball metallic wear using electron microscopy image analysis. In: *Proceedings of the International Conference on 2015 JSAE Annual Congress Proceedings; 2015; Yogohama.* p.1673–1679. Available from: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/886/1/012003>
8. Otto F, Dlouhý A, Somsen C, Bei H, Eggeler G, George EP. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Mater.* 2013;61:5743–5755. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>

9. Troparevsky MC, Morris JR, Kent PRC, Lupini AR, Stocks GM. Criteria for predicting the formation of single-phase high-entropy alloys. *Phys. Rev. X* 5. 2015;011041. Available from: <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.011041>
10. Suárez A, Veiga F, de Lacalle LNL, Polvorosa R, Lutze S, Wretland A. Effects of ultrasonics-assisted face milling on surface integrity and fatigue life of ni-alloy 718. *J. Mater. Eng. Perform.* 2016;25(11):5076–5086. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2343-6>
11. Ahmed N, Mitrofanov AV, Babitsky VI, Silberschmidt VV. Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718. *Mater. Sci. Eng.* 2006;424:318–325. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.025>
12. Chen W, Huo D, Shi Y, Hale JM. State-of-the-art review on vibration-assisted milling: Principle, system design, and application. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2018;97(5–8):2033–2049. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2073-z>
13. Volshenkov AV, Bushe NA. Tribological principles of regimes of the rolling testing of engines. *Journal of Friction and Wear.* 1991;12(3):506-514.

Информация об авторах:

Волченков Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, тел. 9209006939, доцент кафедры ТМС МИ ВлГУ.

Volchenkov Aleksey Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering at Vladimir State University; phone: 9209006939.

Никитина Любовь Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент, тел. 9157555211, доцент кафедры ТМС МИ ВлГУ.

Nikitina Lyubov Gennadyevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering at Vladimir State University; phone: 9157555211.

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 25.11.2022; одобрена после рецензирования 17.01.2022; принята к публикации 26.01.2023. Рецензент – Ширококов К.П., кандидат технических наук, доцент, ООО Научно-технический центр «ТехПром».

The article was submitted to the editorial office on 25.11.2022; approved after review on 17.01.2022; accepted for publication on 26.01.2023. The reviewer is Shiroboikov K.P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Research and Development Centre *TechProm*.