

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-52

doi: 10.30987/2782-5957-2023-5-26-38

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Михаил Аркадьевич Тамаркин¹, Элина Эдуардовна Тищенко^{2✉}, Омар С.А. Хашаш³,
Роман Геннадьевич Тищенко⁴

^{1,2,3,4} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ tehn_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>

² lina_tishchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>

³ omar-hashash@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5208-4117>

⁴ tishchenkoroma@icloud.com, <https://orcid.org/0000-001-5495-8749>

Аннотация

Целью исследований являются изучение технологических возможностей и разработка методики проектирования высокоэффективных технологических процессов упрочняющей обработки деталей осциллирующим инструментом – эксцентрикным упрочнителем.

Задачами являются теоретическое моделирование динамики процесса обработки осциллирующим инструментом, теоретическое моделирование и экспериментальные исследования формирования шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя и степени деформации деталей при обработке осциллирующим инструментом, а также разработка методики проектирования высокоэффективных технологических процессов.

Предложен новый метод обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. Получены зависимости влияния режимов обработки, конструктивных характеристик оборудования и физико-механических свойств материала обрабатываемых деталей на параметры качества поверхностного слоя (шероховатость поверхности, глуби-

ну упрочненного слоя и степень деформации). Представлена зависимость для определения времени обработки.

Полученные теоретические зависимости прошли экспериментальную проверку и признаны адекватными по результатам экспериментальных исследований. Разработаны закономерности проектирования технологических процессов, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей. Разработана методика инженерных расчетов оптимальных параметров технологических процессов обработки деталей осциллирующим инструментом с целью повышения их эксплуатационных свойств. Предложена методика оптимизации технологических процессов обработки деталей осциллирующим инструментом. Разработан программный продукт, позволяющий выполнять технологическое проектирование с помощью микропроцессорной техники.

Ключевые слова: осциллирующий инструмент, упрочнитель, шероховатость, поверхность, глубина, слой, деформация.

Благодарности: авторы выражают благодарность издательству журнала за внимательное отношение к статье.

Ссылка для цитирования:

Тамаркин М.А. Оптимизация процесса упрочняющей обработки деталей осциллирующим инструментом / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, О.С.А. Хашаш, Р.Г. Тищенко // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 05. – С. 26-38. doi: 10.30987/2782-5957-2023-5-26-38.

Original article

Open Access Article

OPTIMIZATION OF STRENGTHENING TREATMENT OF PARTS WITH AN OSCILLATING TOOL

Mikhail Arkadyevich Tamarkin¹, Elina Eduardovna Tishchenko^{2✉}, Omar S.A. Hashash³,
Roman Gennadyevich Tishchenko⁴

^{1,2,3,4} Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, Russia

¹ tehn_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>

² lina_tishenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>

³ omar-hashash@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5208-4117>

⁴ tishenkoroma@icloud.com, <https://orcid.org/0000-001-5495-8749>

Abstract

The research objective is to study the technological capabilities and develop methods for designing highly efficient technological processes of strengthening treatment of parts with an oscillating tool - an eccentric strengthener.

The tasks are theoretical modeling of the the oscillating tool processing dynamics, theoretical modeling and experimental studies of forming surface roughness, the depth of the strengthened layer and the degree of parts deformation during treatment with an oscillating tool, as well as the development of a technique for designing high-efficiency technological processes.

A new method of machining parts by surface plastic deformation is proposed. The dependences of the influence of treatment modes, design characteristics of the equipment and physical and mechanical properties of treated part materials on the quality parameters of the surface layer (surface roughness, depth of the

strengthened layer and the degree of deformation) are obtained. The dependence for determining the treatment time is presented.

The theoretical dependences obtained are experimentally verified and found to be adequate according to the results of experimental studies. The regularities of designing technological processes ensuring an increase in the operational properties of the machined parts are developed. An engineering calculation technique of optimal parameters of technological processes for machining parts with an oscillating tool is developed in order to increase their operational properties. A method for optimizing the technological processes of machining parts with an oscillating tool is proposed. A software product is developed that allows performing technological design using microprocessor technology.

Keywords: oscillating tool, strengthener, roughness, surface, depth, layer, deformation.

Acknowledgements: the authors express their gratitude to the publishing house of the journal for a careful attitude to the paper.

Reference for citing:

Tamarkin MA, Tishchenko EE, Hashash OSA, Tishchenko RG. Optimization of strengthening treatment of parts with an oscillating tool. *Transport Engineering*. 2023; 5:26-38. doi: 10.30987/2782-5957-2023-5-26-38.

Введение

Задача повышения эксплуатационных свойств деталей в современном машиностроении была и остается актуальной. Для ее решения создаются новые материалы, разрабатываются новые высокоэффективные технологии чистовой и отделочной обработки. Как известно, параметры качества поверхностного слоя имеют особое значение для надежной и продолжительной работы детали в конструкции машины. При этом множество известных методов финишной обработки, обеспечивающие геометрическую точность и взаимное расположение размеров обрабатываемой детали, не обеспечивают требуемого качества поверхностного слоя. Из-за возникновения при механической обработке, как правило, растягивающих остаточных напряжений, неблагоприятной формы микронеровностей, неблагоприятных структурных изменений в материале, задача обеспечения высоких эксплуатационных свойств деталей при реализации та-

ких методов обработки на финишных этапах остается нерешенной.

Особую роль для повышения надежности деталей машин, в том числе и работающих в условиях повышенного износа, циклических, знакопеременных нагрузок, играют технологии поверхностного упрочнения. Таких технологий обработки используется множество: термические, химико-термические, криогенные, физические, физико-химические, поверхностного пластического деформирования (силовые и ударные) и другие. В настоящее время многие ведущие предприятия-разработчики авиационной, космической и автомобильной техники используют в конструкторской документации целевое предписание выполнять финишную обработку деталей ударным упрочнением [1,2]. При этом масштабы применения ударных методов упрочнения неоправданно малы, что вызывает необходимость разрабатывать и внедрять новые методы обработки поверх-

ностным пластическим деформированием (ППД), основанные на ударе о поверхность. К таким методам относится обработка осциллирующим инструментом – эксцентриковым упрочнителем.

На рис. 1 представлена кинематическая схема эксцентрикового упрочнителя, состоящего из вибрирующего корпуса 1, подвешенного на плоских пружинах 2. Колебания вибрирующего корпуса 1, действующие нормально к обрабатываемой поверхности, возбуждаются вращением эксцентриковой массы (дебаланса) 3 вокруг вертикальной оси. Ось вращения эксцентриковой массы ограничена от перемещений относительно вибрирующего корпуса 1. Вращательное движение эксцентрики передаётся от электродвигателя 5 через гибкий вал 6. К корпусу 1 прикреплена инструментальная головка 4 с инструментом соответствующей геометрической формы. Движение инструмента 4

ограничивается ограничителем 7 (обрабатываемая деталь). При этом инструмент представляет собой индентор со сферической заточкой или может выполняться в виде ролика или шарика. Вибрационную систему в эксцентриковых упрочнителях можно представить как одномассовую систему с двумя степенями свободы, находящуюся под действием силы, изменяющейся по гармоническому закону. Для исследования динамики системы рассмотрим особенности её свободного колебания под действием центробежного вибровозбуждения и характер движения системы, ударяющейся об ограничитель (деталь).

При свободном колебании вибрирующая система, закрепленная на конце плоских пружин 2 (рис. 1), совершает гармонические колебания, которые возбуждаются вращением эксцентрика 3 с постоянной угловой скоростью.

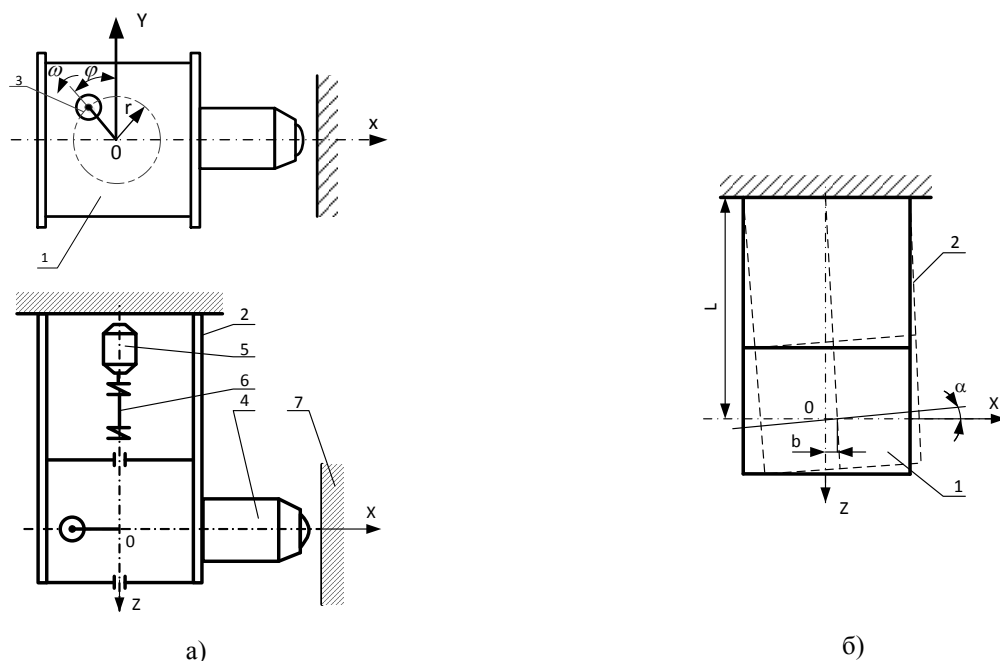


Рис. 1. Схема эксцентрикового упрочнителя (а) и повороты корпуса упрочнителя в процессе колебаний (б): 1 – корпус; 2 – плоская пружина; 3 – эксцентриковая масса; 4 – инструментальная головка; 5 – электродвигатель; 6 – гибкий вал; 7 – ограничитель (обрабатываемая деталь)

Fig. 1. Diagram of the eccentric strengthener (a) and the rotations of the strengthener case during vibrations (b): 1 – the case; 2 – a flat spring; 3 – an eccentric mass; 4 – tool head; 5 – electric motor; 6 – flexible shaft; 7 – limiter (work piece)

Предложенное устройство может быть эффективным при обработке фасонных деталей не самого сложного профиля,

а в некоторых случаях и обработке простых поверхностей, типа плоскостей и тел вращения.

Материалы и методы

Как показывает опыт многочисленных исследований процессов поверхностного пластического деформирования для расчета параметров качества поверхностного слоя обработанных деталей (шероховатости обработанной поверхности, степени деформации, глубины упрочненного слоя и остаточных напряжений) необходимо знать основные параметры динамики взаимодействия обрабатываемого инструмента с поверхностью детали. К их числу следует отнести скорость и энергию ударного воздействия инструментов-инденторов, число взаимодействий в единицу времени на единице площади детали. Второй важной группой параметров, определяющих качество поверхностного слоя, являются физико-механические характеристики обрабатываемой детали (твердость и микротвердость, предел текучести, коэффициент несущей способности контактной

поверхности, относительное сужение и т.п.). [1-5].

Для создания адекватных теоретических моделей, описывающих явления, происходящие в поверхностном слое детали, обработанной эксцентриковым упрочнителем, следует провести подробный анализ динамических процессов, происходящих при обработке осциллирующим инструментом. Рассмотрим процесс динамического взаимодействия индентора осциллирующего инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. Инструментальная головка под действием пружины совершает перемещения и гармонические колебания с некоторой частотой. Учитывая конструкцию эксцентрикового упрочнителя, осуществляющего осциллирующие перемещения, можно записать уравнение движения инструментальной головки [6]:

$$\text{в направлении } Y: m_c \frac{d^2 y}{dt^2} = -c_1 y - \mu \frac{dy}{dt} + m_{cam} r \omega^2 \cos \omega t - m_c g, \quad (1)$$

$$\text{в направлении } X: m_c \frac{d^2 x}{dt^2} = -c x - \mu \frac{dx}{dt} + m_{cam} r \omega^2 \sin \omega t, \quad (2)$$

где $m_c \frac{d^2 y}{dt^2}$, $m_c \frac{d^2 x}{dt^2}$ – проекции сил инерции системы на оси Y и X соответственно; $c_1 y$, $c x$ – проекции сил сопротивления пружины на оси Y и X ; $\mu \frac{dy}{dt}$, $\mu \frac{dx}{dt}$ – проекции сил сопротивления среды на оси Y и X ; $m_{cam} r \omega^2 \cos \omega t$, $m_{cam} r \omega^2 \sin \omega t$ – проекции возмущающей силы на оси Y и X ; $m_c g$ – сила тяжести (вес) вибрирующей системы; m_c – масса вибрирующей системы; c_1 , c – жёсткость пружин в направлении Y и X , μ – сопротивление среды; m_{cam} – масса эксцентрика; r – расстояние от оси вращения эксцентрика до его центра тяжести; ω –

угловая скорость; t – текущее значение времени; y , x – текущее значение координат. Ввиду значительно большей жёсткости пружин в направлении Y по отношению с жёсткостью в направлении X , амплитуда перемещения индентора в направлении Y значительно меньше амплитуды в направлении X . Поэтому примем допущение, что система совершает гармонические колебания только в направлении X , т.е. будем рассматривать движение инструментальной головки только с одной степенью свободы. При этом проведя преобразования кинетическую энергию индентора можно определить по формуле:

$$T = \frac{m_c V_x^2}{2} = \frac{m_c m_{cam}^2 r^2 \omega^6}{2[(c - \omega^2 m_c)^2 + \omega^2 \mu^2]}. \quad (3)$$

где V_x – максимальная скорость инструментальной головки с индентором.

Для описания процесса единичного взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью при обработке осцил-

лирующим инструментом необходимо учитывать: скорость вращения, размеры и массу эксцентрика; количество инденторов на инструментальной головке; форму и размеры инденторов (радиус сферической

заточки при использовании шарика и радиус скругления при использовании ролика); размеры и жесткость плоских пружин; коэффициент полезного действия устройства, который зависит от величины сближения индентора с поверхностью детали; физико-механические свойства материала обрабатываемой детали.

Процесс динамического воздействия сферического индентора на обрабатываемую поверхность при динамических методах ППД наиболее полно исследован в работах И.В. Кудрявцева [7]. Применительно к обработке деталей осциллирующим инструментом можно записать формулу для расчета диаметра пластического отпечатка индентора:

$$d = \sqrt[4]{\frac{D_i \cdot T \cdot \eta}{M \cdot HD}}, \quad (4)$$

При этом глубина пластического отпечатка может быть определена как

$$h = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{T \cdot \eta}{M \cdot D_i \cdot HD}}, \quad (5)$$

где T – кинетическая энергия инструментальной головки (индентора), HD – динамическая твердость материала детали (отношение энергии удара сферического индентора к объему вытесненного материала при ударе), D_i – диаметр индентора, η – коэффициент полезного действия устройства, M – число инденторов.

Согласно [8] динамическую твердость можно определить из соотношения

$$HB = 0,2HD^{0,89},$$

где HB – твердость материала по Бринеллю (кг/мм^2).

Следовательно, можно записать

$$HD = 6,1HB^{1,12}, \quad (6)$$

Можно сделать предположение, что коэффициент полезного действия устройства будет зависеть от соотношения размеров составных частей и предварительного сближения инструментальной головки с поверхностью детали.

При обработке эксцентриковым упрочнителем параметры шероховатости обрабатываемой поверхности могут получать постоянное (установившееся) значение, которое воспроизводится при даль-

нейшей обработке поверхности детали. Формирование шероховатости при работе осциллирующего инструмента происходит при многократном переформировании локальных микрообъемов металла поверхностного слоя в результате пересечения следов единичных ударов, оставляемых при прохождении инструмента по участку поверхности [9-11].

В начальный период времени инденторы будут деформировать выступы микронеровностей. При этом будет происходить подъем металла во впадинах микронеровностей. В процессе обработки с течением времени наступает полное передеформирование профиля исходной шероховатости. На поверхности детали формируется новый специфический для рассматриваемого метода упрочнения микрорельеф, который имеет изотропные свойства по всем направлениям.

Параметры установившейся шероховатости при этом не зависят от исходной, а определяются только режимами обработки и конструктивными параметрами устройства.

Анализируя научную литературу, в которой описано формирование шероховатости поверхности при финишной обработке детали, можно сделать вывод, что наиболее удачная теоретико-вероятностная модель формирования шероховатости поверхности при различных видах абразивной обработки, представлена в работе Королева А.В. [12]. Методика расчета высотных параметров профиля шероховатости обработанной поверхности, предложенная в этой работе, может быть использована и при обработке деталей осциллирующим инструментом.

С использованием этой методики получена зависимость для определения установившейся шероховатости поверхности при обработке эксцентриковым упрочнителем:

$$Ra = 0,0075 \sqrt{\frac{T \cdot \eta}{D_i \cdot M \cdot HD}} \quad (7)$$

При проектировании технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки, одной из основных задач является аналитический расчет параметров

упрочнения поверхностного слоя: ожидаемой степени деформации и глубины упрочненного слоя [13-15]. При внедрении индентора в поверхность детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина (пластический отпечаток) вокруг которой всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину. Расчет глубины упрочненного слоя и степени деформации в зависимости от технологических параметров процесса обработки, представляет собой сложную задачу. Известные технологические зависимости, представленные в известных работах, получены с учетом многочисленных допущений.

При выводе теоретических зависимостей для определения глубины упрочненного слоя и степени деформации учитывалось условие пластичности Генки-Мизеса, при котором $\sigma_i = \sigma_T$, где σ_i – интенсивность напряжений.

Получены зависимости для определения глубины упрочненного слоя и степени деформации при обработке эксцентриковым упрочнителем:

$$h_n = \sqrt[8]{\frac{\left(\frac{T \cdot \eta}{D_i \cdot M \cdot HD}\right)^3}{D_i}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon = 1,134 \sqrt{\frac{T \cdot \eta}{D_i^3 \cdot M \cdot HD}}. \quad (9)$$

Приведенные зависимости соответствуют физическому смыслу явлений, происходящих при обработке, и прошли проверку в ходе проведения комплексных экспериментальных исследований.

При проектировании технологических процессов обработки деталей значительное внимание уделяется рациональному определению времени обработки. Важно учитывать, что для методов обработки ППД следует предусмотреть возможность появления перенаклепа поверхностного слоя и ограничить верхнюю границу продолжительности обработки. Назначение

рационального (близкого к минимальному) времени обработки позволит повысить производительность процесса и сократить количество единиц используемого оборудования.

Учитывая, что как правило на инструментальной головке расположен один индентор в виде шарика или ролика, следует предусмотреть значительное перекрытие отпечатков от единичных соударений, которое можно обеспечить за счет правильного назначения подачи устройства относительно обрабатываемой детали. Проанализировав опыт, накопленный в области динамических методов обработки ППД, примем для проведения исследований величину подачи на оборот в долях диаметра отпечатка d :

$$S = 0,4d$$

Предположим, что нам нужно осуществить местное упрочнение детали осциллирующим инструментом. В этом случае время обработки детали будет зависеть от площади обрабатываемого участка. Обозначим размеры участка: Z_{yc} – длина и Y_{yc} – ширина. Тогда время обработки такого участка может быть определено по зависимости:

$$t = \frac{Z_{yc}}{S} \cdot \frac{Y_{yc}}{0,4d} = 2,5 \frac{Z_{yc} \cdot Y_{yc}}{Sd}, \quad (10)$$

с учетом того, что после каждого продольного прохода индентора устройство будет сдвигаться в направлении ширины участка на расстояние $0,4d$.

Для проведения серии экспериментов сделаем допущение, что обработка детали может быть осуществлена за один проход осциллирующего инструмента. Если нам потребуется получить значительную величину параметров упрочнения поверхностного слоя, будем использовать возможность обработки деталей в несколько проходов. Количество проходов также возможно увеличивать при обработке деталей из материалов с высокой твердостью.

Результаты

Экспериментальные исследования процесса упрочнения поверхностей осциллирующим инструментом проводились на

токарно-винторезном станке модели 1К62. Для возможности получения на шпинделе станка меньшего по сравнению с паспор-

том станка числа оборотов, коробка скоростей станка была модернизирована. Упрочнитель с помощью сварного кронштейна устанавливается на поперечной каретке станка и перемещается от механизма его подачи в поперечном и продольном направлениях. Исследовались образцы, выполненные из различных материалов, применяемых для производства машиностроительной продукции: сталей 30, 45, ХВГ, 30ХГСА, а также упрочняемых цветных сплавов АВТ, АЛ1, Д16 и др. Они обрабатывались на различных режимах. В качестве индентора использовались шарики и ролики.

По теоретическим формулам были построены графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности, глубины упрочненного слоя и степени деформации от режимов обработки и характеристик обрабатываемых материалов. Теоретические кривые на рис. 2-6 показаны сплошными линиями. Точками на рисунках показаны результаты экспериментальных исследований. Приведены результаты экспериментов для шариковых инденторов (устанавливался один индентор). Выполнено построение доверительных интервалов с доверительной вероятностью 95%.

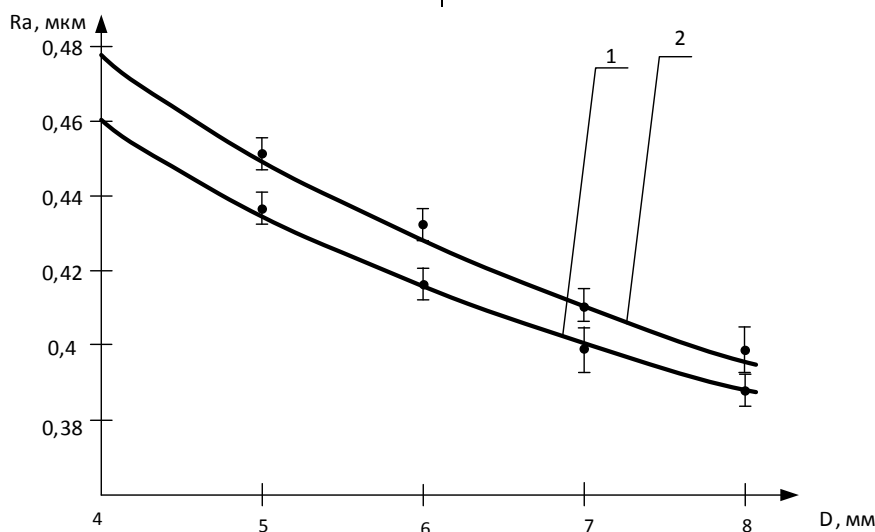


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от диаметра индентора: 1 – материал образца сталь 30ХГСА, 2 – материал образца сталь 30
 Fig. 2. Dependence of the surface roughness on the indenter diameter: 1 – the material of 30XGSA steel sample, 2 – the material of 30 steel sample

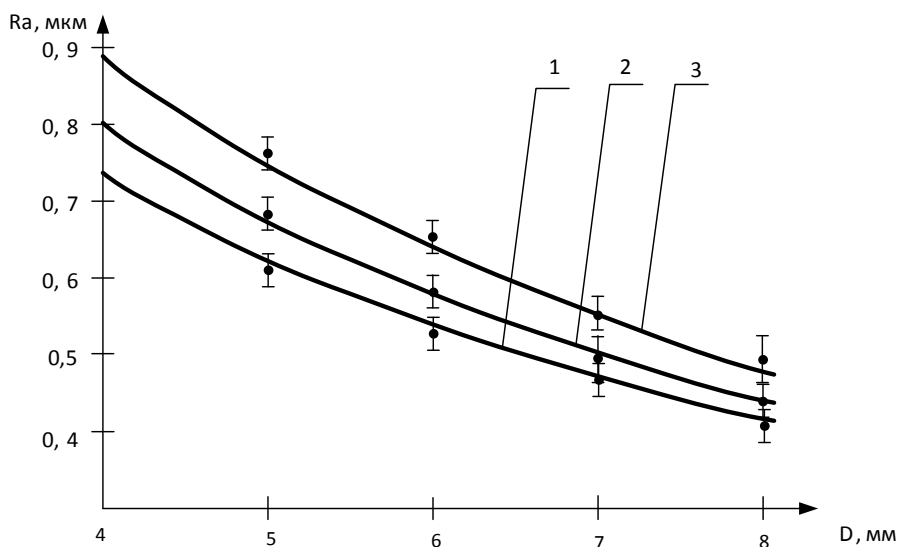


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от диаметра индентора: 1 – материал образца Д16, 2 – материал образца АВТ, 3 – материал образца АЛ1
 Fig. 3. Dependence of the surface roughness on the indenter diameter: 1 – the material of Д16 sample, 2 – the material of АВТ sample, 3 – the material of АЛ1 sample

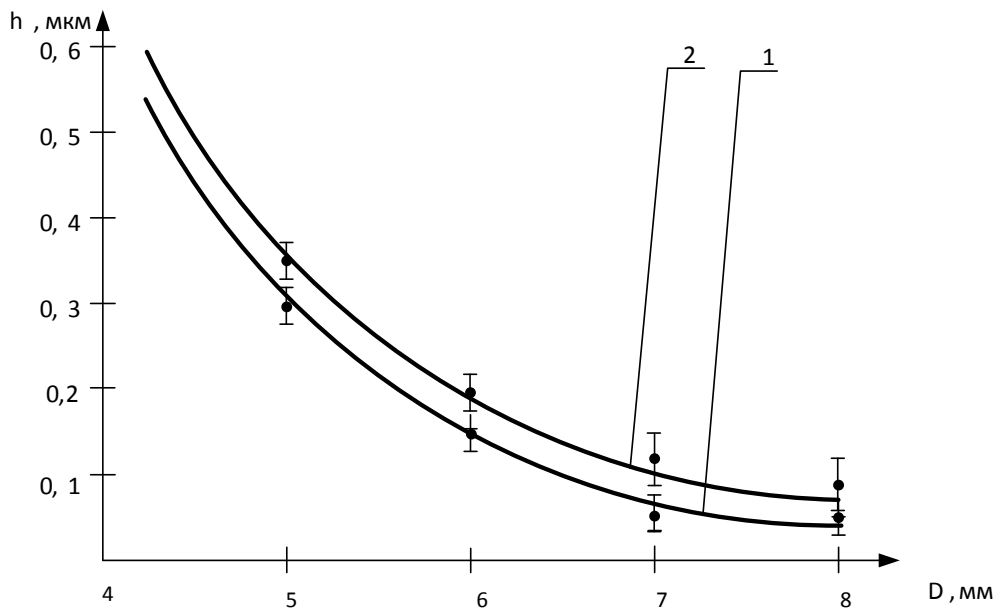


Рис. 4. Зависимость глубины упрочненного слоя от диаметра индентора:
 1 – материал образца ХВГ, 2 – материал образца сталь 45
 Fig. 4. Dependence of the strengthened layer depth on the indenter diameter:
 1 – material of XBG sample, 2 – material of 45 steel sample

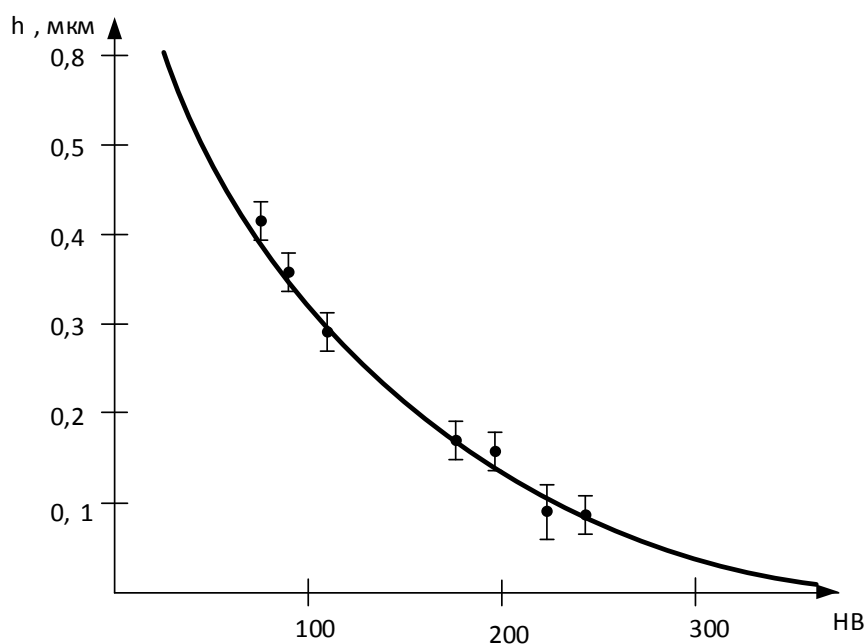


Рис. 5. Зависимость глубины упрочненного слоя от твердости детали по Бринеллю.
 Диаметр индентора 7 мм
 Fig. 5. Dependence of the strengthened layer depth on part hardness by Brinell.
 The indenter diameter is 7 mm

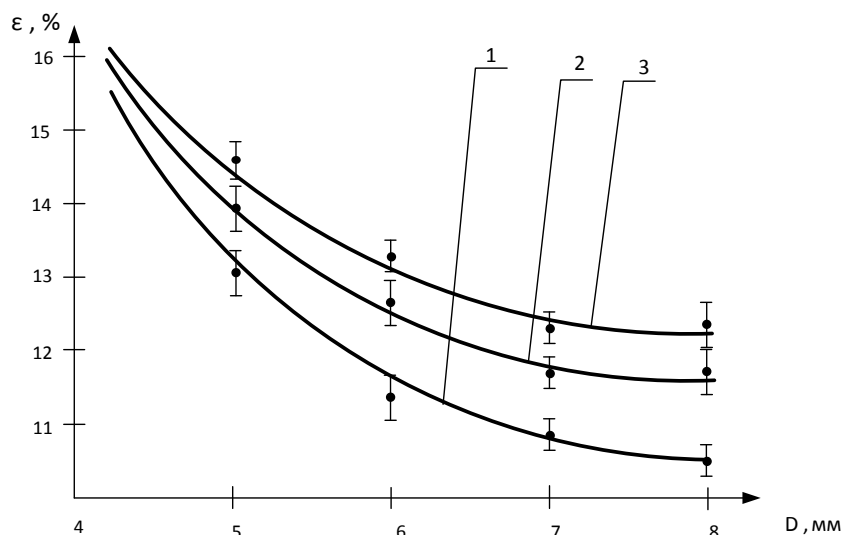


Рис. 6. Зависимость степени деформации от диаметра индентора:
 1 – материал образца АЛ1, 2 – материал образца АВТ, 3 – материал образца Д16
 Fig. 6. Dependence of the deformation degree on the indenter diameter:
 1 – material of АЛ1 sample, 2 – material of АВТ sample, 3 – material of Д16 sample

Заключение

Выполнено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса обработки эксцентриковым упрочнителем. Расхождение результатов не превышает 15%, что позволяет сделать вывод об адекватности полученных зависимостей для определения шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя и степени деформации и рекомендовать их к использованию при технологическом проектировании процесса обработки эксцентриковым упрочнителем.

Разработаны методические рекомендации по проектированию технологических процессов обработки осциллирующим инструментом. При проектировании технологического процесса отделочной обработки на первом этапе следует выбрать конструктивные характеристики устройства и мощность его привода из имеющихся в распоряжении технолога. Указанный выбор осуществляется в соответствии с результатами теоретических расчетов и экспериментальных исследований. Для деталей из мягких и средних по твердости материалов рекомендуется выбирать устройство небольшой мощности (до 0,5 кВт), для твердых материалов мощность двигателя соответственно увеличивается до 1,0-1,2 кВт. В зависимости от решаемой технологической задачи выбирается форма и размеры индентора. Ро-

лики рекомендуется применять при обработке деталей типа тело вращения. Для остальных поверхностей рекомендуется применять шарики. Два и большее количество шариков необходимо применять при обработке участков большой площади.

Диаметр индентора и величина его сближения с поверхностью детали выбираются в зависимости от обрабатываемой поверхности и уточняется при проведении технологических расчетов. После выбора конструктивно-технологических параметров эксцентрикового упрочнителя определяются границы варьируемых технологических режимов (число оборотов, масса инструментальной головки, масса эксцентрика) и для определенного их массива производятся расчеты шероховатости обработанной поверхности, глубины упрочненного слоя и степени деформации. По результатам расчета отбираются варианты, удовлетворяющие заданным характеристикам качества поверхностного слоя, затем для этих вариантов рассчитывается время обработки. Вариант, обеспечивающий минимальное время, т.е. наивысшую производительность признается наиболее рациональным и рекомендуется к промышленному использованию.

Коллективом научно-педагогических работников кафедры «Технология машиностроения» ДГТУ разработана структура

САПР ТП обработки деталей различными методами ППД, базирующаяся на опыте многолетних исследований технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей [15-22]. Комплексная система моделей процесса обработки осциллирующим инструментом, разработанная по результатам вышеприведенных исследований, позволяет предложить алгоритм оптимизации технологических процессов обработки, что позволит расширить возможности предлагаемой САПР ТП и в дальнейшем использовать ее в создании цифрового производства различных деталей машиностроения. Разработан программный продукт с использованием среды разработки программного обеспечения *Microsoft Visual Studio* на языке программирования *C#*, который позволяет по характеристике обрабатываемой детали вы-

брать средства технологического оснащения, и технологические режимы при обработке осциллирующим инструментом. Программа имеет удобный интерфейс (рис. 7) и позволяет в диалоговом режиме задавая материал, конструктивные особенности обрабатываемой детали, необходимые параметры качества поверхностного слоя в автоматическом режиме проектировать технологический процесс, выполняя оптимизацию по производительности (времени) обработки (рис. 8). На рис. 7 и 8 представлены интерфейсы программного продукта с введенными данными, иллюстрирующие проектирование технологического процесса обработки осциллирующим инструментом с обеспечением основных параметров качества (шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя и степени деформации).

Рис. 7. Ввод исходных данных для проектирования
Fig. 7. Input of initial data for design

Рис. 8. Результаты проектирования технологического процесса
Fig. 8. Results of technological process design

Предлагается следующая методика автоматизированного проектирования тех-

нологических процессов обработки осциллирующим инструментом:

1. Задаются граничные значения необходимых параметров качества поверхностного слоя обрабатываемой детали. Выбирается жесткость пружины, количество инденторов, мощность двигателя, диаметр индентора, величина сближения индентора с поверхностью детали, размеры обрабатываемой поверхности и материал обрабатываемой детали. Базы необходимых данных создаются заранее и подгружаются в виде файлов. Выбрать значения исходных можно в выпадающих окнах.

2. Затем в автоматическом режиме производится расчет заданных параметров качества (среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обработанной поверхности, глубины упрочненного слоя, степени деформации) по формулам, полученным по результатам теоретических исследований. Расчет параметров качества поверхности позволяет получить множество вариантов технологических процессов. Варианты, не обеспечивающие

заданное качество поверхностного слоя, программой отбрасываются.

3. Для оставшихся вариантов определяется время обработки по зависимостям, представленным в главе 2. Программа предлагает пользователю варианты начиная с того, который обеспечивает минимальное время при обработке.

4. Для предложенных вариантов выдаются рекомендуемые параметры устройства и режимы обработки.

Разработка нескольких вариантов позволяет применять в условиях конкретного предприятия уже имеющееся оснащение без дополнительных затрат на его приобретение. Планируется внедрение модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов обработки осциллирующим инструментом на ведущих предприятиях машиностроительного профиля. Ведутся переговоры по апробации программного продукта на ПАО «Роствертол».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабичев А.П., Мотренко П.Д. и др. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом. Ростов н/Д, Издательский центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
2. Мотренко П.Д. Технологическое обеспечение качества крупногабаритных и длинномерных деталей сложной формы при виброударной обработке : дисс. доктора технических наук : 05.02.08 : Орел, 2008. – 237 с.
3. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования/Асланян И.Р., Блюменштейн В.Ю. и др. Монография / Иркутск, 2007.
4. Технологические основы оптимизации процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей в гранулированных рабочих средах Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С., Исаев А.Г. /Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 11 (131). С. 12-16
5. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011 – 568 с.
6. Попов М.Е., Хашаш О., Моргунов Д.Ю. Виброударные и виброволновые методы упрочняющей и стабилизирующей обработки деталей горных машин/ Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 6. С. 107-112.
7. Кудрявцев И.В. Основы выбора режима упрочняющего поверхностного наклепа ударным способом. В кн.: Повышение долговечности деталей машин методами поверхностного наклепа. Тр. ЦНИИТМАШ, вып. 108, 1965. С. 6-34.
8. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. Машиностроение, 1996. – 224 с.
9. Tamarkin M., Tishchenko E, Murugova E., Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener/ E3S Web of Conferences. - 2020. - Vol. 175. - 6 p. - Article 05008. - (XIII International Scientific and Practical Conference “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020” Rostovon-Don, Russia, February 26-28, 2020).
10. Tamarkin M., Tishchenko E., Fedorov V. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.(2016). Vol. 124, Is. 1. Article number 012169.
11. Tamarkin M., Tishchenko E., Astashkin A. Module system developing of computer-aided engineering for process technologies with ball-shaft hardener /Lecture Notes in Networks and Systemsthis link is disabled, 2023, 509, pp. 1605–1613 (2023).
12. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки: в 2-х т. / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. - Саратов: Изд-во Саратов. Унта, 1989. – 191 с.

13. Beskopylnyi A., Meskhi B., Beskopylny N., Chukarina I., Isaev A., Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening/ Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Proceedings of XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". "Smart Innovation, Systems and Technologies" Singapore, (2022). p. 1-12.
14. Beskopylny A., Meskhi B., Veremeenko A., Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020" (2020). p. 012047.
15. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Тищенко Р.Г. Технологическое обеспечение цифрового производства при обработке деталей шарикостержневым упрочнителем/ iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 2. С. 184-196.
16. Blumenstein V., M. Makhlov The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes/ MATEC Web of Conferences. The conference proceedings (ISPCIME-2019). (2019). p. 05001.

REFERENCES

1. Babichev AP, Motrenko PD. Finishing and strengthening treatment of parts with a multi-contact vibro-impact tool. Rostov n/A: Publishing Center of DSTU; 2003.
2. Motrenko PD. Technological quality assurance of large-sized and long-length parts of complex shapes during vibration shock treatment [dissertation]. [Orel (RF)]; 2008.
3. Aslanyan IR, Blumenstein VYu. Technological processes of surface plastic deformation: monograph. Irkutsk; 2007.
4. Tamarkin MA, Tishchenko EE, Shvedova AS, Isaev AG. Technological bases of optimizing finishing and strengthening treatment of parts in granular media. Strengthening Technologies and Coatings. 2015;11(131):12-16.
5. Kopylov YuR. Dynamics of vibration shock strengthening processes: monograph. Voronezh: Nauchnaya Kniga; 2011.
6. Popov ME, Khashash O, Morgunov DYu. Vibropercussion and vibro-wave methods for reinforcement and stabilizing treatment of mining machine parts. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2017;6:107-112.
7. Kudryavtsev IV. Fundamentals of choosing the mode of strengthening surface cold working by impact method. In: Increasing the durability of machine parts by methods of surface cold working. Tr. TSNIITMASH; 1965. p. 6-34.
8. Drozd MS, Matlin MM, Sidiyakin YuI. Engineering calculations of elastic-plastic contact deformation. Moscow: Mashinostroenie; 1996.

17. Smolentsev V., Kuzovkin A., Safonov S. Nano-transformations in the surface layer of materials under combined processing by unbound granules/ Materials Today: Proceedings. (2019). pp. 20-25.
18. Smolentsev V., Safonov S. The technological methods of surface layer modification in construction materials/ MATEC Web of Conferences. (2017). p. 01077.
19. Makhlov M.S., Blumenstein V.Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration/Solid State Phenomena. (2022). Vol. 328. p. 27-37.
20. Blumenstein V., Makhlov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes/ MATEC Web of Conferences. The conference proceedings (ISPCIME-2019). 2019. C. 05001.
21. Chigirinskii Y.L. Surface quality after different treatments/Russian Engineering Research. (2011). Vol. 31. № 8. pp. 816-819.
22. Plotnikov A.L., Chigirinskii Yu.L., Frolov E.M., Krylov E.G. Formulating CAD/CAM modules for calculating the cutting conditions in machining/Russian Engineering Research. (2009). Vol. 29. № 5. p. 512-517.

9. Tamarkin M, Tishchenko E, Murugova E, Melnikov A. Surface quality assurance and process reliability in the processing with a ball-rod hardener/ E3S Web of Conferences. Proceedings of XIII International Scientific and Practical Conference, February 26-28, 2020: State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2020. Rostov-on-Don; 2020.
10. Tamarkin M, Tishchenko E, Fedorov V. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by SPD in flexible granular environment/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016.
11. Tamarkin M, Tishchenko E, Astashkin A. Module system developing of computer-aided engineering for process technologies with ball-shaft hardener. Lecture Notes in Networks and Systems this link is disabled. 2023;509:1605–1613.
12. Korolev AV, Novoselov YuK. Theoretical and probabilistic foundations of abrasive treatment. Saratov: Saratov University Publishing House; 1989.
13. Beskopylnyi A, Meskhi B, Beskopylny N, Chukarina I, Isaev A, Veremeenko A. Strengthening of welded joints of load-bearing structures of robotic systems with ball-rod hardening. Proceedings of XIV International Scientific Conference, 2022: INTERAGROMASH 2021. Smart Innovation, Systems and Technologies. Singapore; 2022.
14. Beskopylny A, Meskhi B, Veremeenko A, Isaev A. Influence of boundary conditions on the strengthening technology of a welded joint with a ball-rod hardener. IOP Conference Series: Materials Science

- and Engineering. International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020; 2020. p. 012047.
15. Tamarkin MA, Tishchenko EE, Tishchenko RG. Technological support of digital production when machining parts with a ball and bar reinforce. iPolytech Journal. 2022;26(2):184-196.
 16. Blumenstein V, Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes. The conference proceedings, 2019: ISPCIME-2019.
 17. Smolentsev V, Kuzovkin A, Safonov S. Nano-transformations in the surface layer of materials under combined processing by unbound granules. Proceedings of the conference, 2019: Materials Today. 2019.
 18. Smolentsev V, Safonov S. The technological methods of surface layer modification in construction materials. MATEC Web of Conferences; 2017.

19. Makhalov MS, Blumenstein VYu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration. Solid State Phenomena. 2022;328:27-37.
20. Blumenstein V, Makhalov M. The metal surface layer mechanical condition transformation in machining processes. Proceedings of the conference, 2019: MATEC Web of Conferences, ISPCIME-2019; 2019.
21. Chigirinskii YL. Surface quality after different treatments/Russian Engineering Research. 2011;31(8):816-819.
22. Plotnikov AL, Chigirinskii YuL, Frolov EM, Krylov EG. Formulating CAD/CAM modules for calculating the cutting conditions in machining. Russian Engineering Research. 2009;29(5):512-517.

Информация об авторах:

Тамаркин Михаил Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, тел. 8-903-405-51-01, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, почетный работник Высшей школы.
Тищенко Элина Эдуардовна – кандидат технических наук, доцент, тел. 8-903-433-95-83, доцент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета.

Tamarkin Mikhail Arkadyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology of Don State Technical University, Honorary Worker of the Higher School; phone: 8-903-405-51-01.
Tishchenko Elina Eduardovna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology of Don State Technical University; phone: 8-903-433-95-83.

Хашаш Омар С.А. – студент кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, тел. 8-988-996-13-15.
Тищенко Роман Геннадьевич – студент кафедры «Программное обеспечение и вычислительная техника» Донского государственного технического университета, тел. 8-928-112-67-7.

Hashash Omar S.A. – Student of the Department of Mechanical Engineering Technology of Don State Technical University; phone: 8-988-996-13-15.
Tishchenko Roman Gennadyevich - Student of the Department of Software and Computing Technology of Don State Technical University; phone: 8-928-112-67-7.

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 05.04.2023; одобрена после рецензирования 14.04.2023; принята к публикации 27.04.2023. Рецензент – Киричек А.В., доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 05.04.2023; approved after review on 14.04.2023; accepted for publication on 27.04.2023. The reviewer is Kirichek A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Long-term Development at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.