

МЕТОД АДАПТИВНО-ИНТЕРАКТИВНОЙ НАСТРОЙКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОГО МИКРОУДАРНОГО ГРАВИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕЧЁТКО ЗАДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Магомедов М.Х., Громов А.Е., Яковлев А.В.

Ключевые слова: технология ударного гравирования, микроудар, нечёткие параметры, критические параметры, *fuzzy*-поверхности, градационная шкала оттенков.

Аннотация. Формула ударного взаимодействия Г. Герца распространена на твердые тела, реальные физические характеристики которых имеют значительный разброс. Определены *fuzzy*-функции, характеризующие микроудар в условиях нечётко заданных прочностных свойств вещества обрабатываемого полупространства и геометрии ударного инструмента. Показано, что эффективным решением прикладных задач прецизионного гравирования в условиях неопределенности параметров является применение метода адаптивно-интерактивной настройки системы.

METHOD OF ADAPTIVE-INTERACTIVE CONFIGURATION OF THE TECHNOLOGY FOR PRECISION MICRO-IMPACT ENGRAVING UNDER FUZZY DEFINED CHARACTERISTICS

Magomedov M.Kh., Gromov A.E., Yakovlev A.V.

Keywords: impact engraving technology, micro-impact, non-clear parameters, critical parameters, fuzzy surfaces, grad-scale of shades.

Abstract. The formula of the G. Hertz shock interaction is extended to solid bodies, the real physical characteristics of which have a significant variation. The fuzzy functions that characterize a micro-impact under the conditions of vaguely defined strength properties of the substance of the processed half-space and the geometry of the impact tool are determined. It is shown that an effective solution to the applied problems of precision engraving in conditions of such uncertainty of parameters is the use of the method of adaptive-interactive system tuning.

Введение

Математической основой технологии прецизионного ударного гравирования [1] является концепция удара Г. Герца, базирующаяся на следующих трёх гипотезах:

1) упругая деформация соударяющихся твёрдых тел происходит в локальной зоне обрабатываемого хрупкого полупространства;

2) участок пластической деформации на диаграмме растяжения-сжатия (ДРС) отсутствует;

3) силы инерции тел в локальной зоне удара (ЛЗУ) модели удара пренебрежимо малы и поэтому не учитываются.

Ударная сила в упругой зоне ДРС полупространства является степенной функцией деформации сжатия z :

$$P_{y\partial} = k_{\Gamma} \times z^{3/2}, \quad (1)$$

где $k_{\Gamma} = 0,6666 \frac{E_3}{1-\mu^2} r_y^{1/2}$ – характеристический коэффициент Герца;

E_3 – модуль Юнга вещества полупространства заготовки, μ – коэффициент Пуассона; r_y – радиус сегментообразной вершины ударника [1].

В технологии управляемого микроударного гравирования (УМУГ) существенным фактором, влияющим на качество изделий, является естественный разброс (или априорная неопределённость) физических характеристик материала обрабатываемой заготовки, а также геометрических параметров ударного инструмента [2, 3].

Проблема качества гравирования в условиях такого рода неопределённостей в настоящее время находится лишь на стадии обсуждения и постановки. Теорией, наиболее близкой по содержательному смыслу к данной проблеме, является теория нечётких (*fuzzy*) множеств Л. Заде [4].

Вводя в модель удара (1) следующие *fuzzy*-функции:

$$- \sigma^{(Fu)} = f(\varepsilon) - \text{функция ДРС};$$

$$- k_{\Gamma}^{(Fu)} = \varphi_1(E_3; \mu_3; r_y) - \text{коэффициент Герца};$$

$$- v_{0\text{кр}}^{(Fu)} = \varphi_2(\sigma_{\text{кр}}; k_{\Gamma}) - \text{критическая скорость соударения};$$

$$- \tau_{\text{уд}}^{(Fu)} = \varphi_3(k_{\Gamma}; v_0) - \text{длительность фазы удара до момента достижения}$$

критической скорости, можно получить расширенную постановку задачи УМУГ. При этом предлагается метод адаптивно-интерактивной настройки (АИН) системы управления гравированием (СУГ), позволяющий получать необходимое качество гравирования при существенном разбросе характеристик материала заготовки, а также геометрических параметров инструмента с учетом его износа [2, 3].

Анализ *fuzzy* – функций

В зависимости от физического содержания задачи рассматриваемые *fuzzy*-функции являются функцией одной, двух или более независимых переменных.

Функция $\sigma^{(Fu)} = f(\varepsilon)$. В технологии УМУГ универсальная ДРС хрупкого вещества как функция относительной деформации обладает особыми свойствами. Функция $\sigma^{(Fu)} = f(\cdot)$ – строго линейная, не имеющая зоны пластической деформации и ограниченная сверху критической точкой K (для напряжения растяжения) с координатами $\varepsilon_{\text{кр}}$ и $\sigma_{\text{кр}}$, которые задают области определения и достижимых значений (рис. 1):

$$D(f(\cdot)) = [0; \varepsilon_{\text{кр}}), E(f(\cdot)) = [0; \sigma_{\text{кр}}), \|OK\| \ll \|OK_1\|. \quad (2)$$

Из-за естественного разброса прочностных свойств вещества характеристики ε , σ , а также пара переменных $\varepsilon_{\text{кр}}$ и $\sigma_{\text{кр}}$, являются нечёткими. Поэтому более адекватная математическая модель заготовки в задаче УМУГ должна быть описана в терминах нечётких подмножеств аргумента $\varepsilon^{(Fu)}$ и функции $\sigma^{(Fu)} = f(\varepsilon)$.

Свойства особых точек K и K_1 рассмотрены в [2]. Во-первых, ε -окрестность, включающая K , характеризует предел упругости. Во-вторых, при достижении этой окрестности в процессе активной фазы микроудара происходит разрушение кристаллической структуры вещества в ЛЗУ и её переход в пылеобразную агрегатную субстанцию с образованием соответствующего Br -элемента [5]. Яркостный Br -элемент является основным «выходным» примитивом изображения. Система (2) определяет область упругой деформации на ДРС за исключением точки K .

Множество ДРС некоторого вещества с учётом разброса характеристик $\varepsilon_{кр}^{(Fu)}$, $E_3^{(Fu)}$ представлено пучком полуотрезков с началом в точке O (рис. 2). Их концы – элементы множеств $\sigma_{кр}$ и $\varepsilon_{кр}$ – находятся внутри контура, например $L_1 \div L_2$. Эти подмножества можно отобразить на соответствующие координатные оси и зафиксировать их границы:

$$\sup_{\varepsilon} |\sigma_{кр}(\varepsilon)| = \sigma_{кр.экс}^{\max}(\varepsilon) \quad \inf_{\varepsilon} |\sigma_{кр}(\varepsilon)| = \sigma_{кр.экс}^{\min}(\varepsilon),$$

где правые части (3) могут быть получены из натурального эксперимента по идентификационной методике и использованы для определения критической скорости микроудара [2].

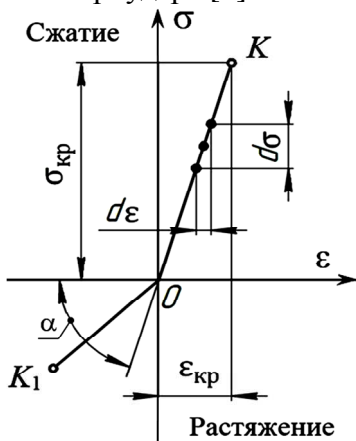


Рис. 1.

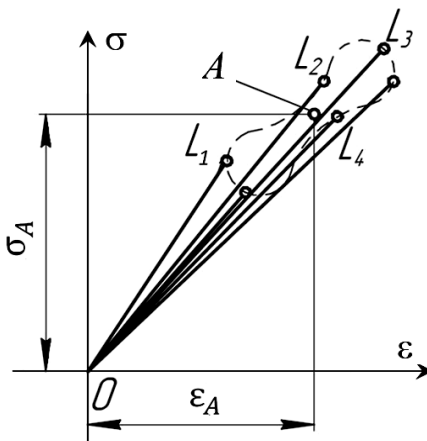


Рис. 2.

Функция $k_{\Gamma}^{(Fu)} = \varphi_1(E_3; \mu_3; r_y)$. Коэффициент k_{Γ} , представленный нелинейным выражением (1), устанавливает связь между ударной силой, развиваемой ударником, и упругой деформацией полупространства при точно заданных характеристиках ударника и заготовки. Применительно к задаче УМУГ имеем: полупространство – хрупкое вещество, r_y – радиус вершины ударника, переходящий в многогранную пирамиду с острыми режущими рёбрами, причём $E_y \gg E_3$ (где E_y – модуль Юнга материала ударника). Варьируя эталонные значения E_3 , μ_3 и r_y , например, для стекла и алмазного инструмента, получим множество $k_{\Gamma}^{(Fu)}$ в вариациях:

$$k_{\Gamma}^{(Fu)} = \frac{2}{3} (E_3 \pm \Delta E)(r_y + \Delta r_y)^{1/2} (1 - (\mu_3 \pm \Delta \mu_3))^{-1/2}. \quad (3)$$

Коэффициент $k_{\Gamma}^{(Fu)}$, являющийся функцией (3) двух переменных, заменим двумя функциями $\varphi_{11}(r_y; \mu_3; E_3 = \text{const})$ и $\varphi_{12}(r_y; \mu_3; E_3 = \text{const})$, которые можно представить в графическом формате в среде MatLab. Функции $\varphi_{11}(\cdot)$ и $\varphi_{12}(\cdot)$ представляют собой гладкие выпуклые поверхности $Q^{(E_3=\text{const})}$ и $Q^{(\mu_3=\text{const})}$. На рис. 3 в качестве примера показана *fuzzy*-поверхность $Q^{(\mu_3=\text{const})}$, отображающая $k_{\Gamma}^{(Fu)}$ при вариации переменных E_3 и r_y , которые можно интерпретировать следующим образом:

- множество значений E_3 описывает свойство некоторой группы материалов при постоянном r_y ;
- материал, характеризуемый модулем $E_3 = \text{const}$ в процессе гравирования обрабатывают инструментом, радиус r_y которого увеличивается вследствие эксплуатационного износа.

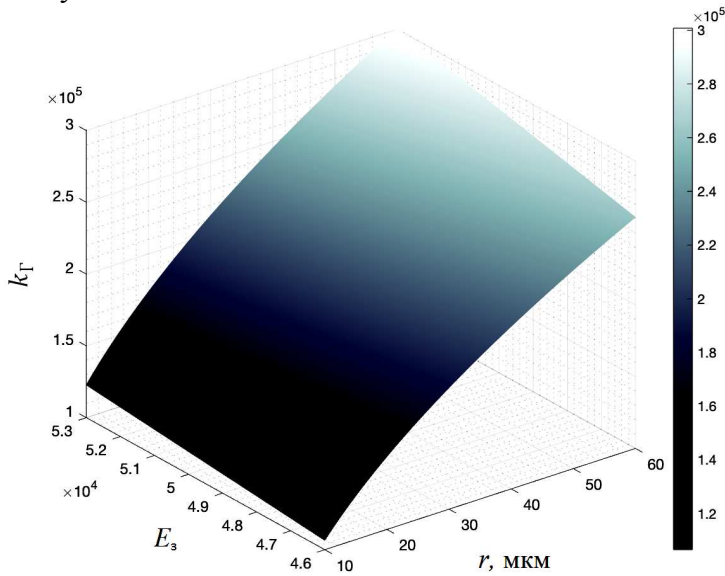


Рис. 3.

Функция $v_{0\text{кр}}^{(Fu)} = \varphi_2(\sigma_{\text{кр}}; k_{\Gamma})$. Критическое напряженное состояние вещества заготовки, характеризуемое переменными $\sigma_{\text{кр}}$ и $\varepsilon_{\text{кр}}$ в активной фазе микроудара, в соответствии (1) может быть достигнуто при начальной скорости соударения при $z = 0$:

$$v_{0\text{кр}} = \frac{4}{5} \frac{k_{\Gamma}^{1/2}}{m_{\text{экв}}} z_{\text{кр}}^{5/4}, \quad (4)$$

которая названа критической.

В выражении (4) $z_{кр} = E_3 \varepsilon_{кр}$ – деформация вещества по направлению линии удара, если начало ортогональной системы координат, в которой измеряется величина z , совмещено с точкой начала удара, расположенной на поверхности полупространства. Для определения $z_{кр}$ как элемента $z \in Z$ в НПО «САУНО» разработан экспериментально-оценочный метод, основанный на балансе между потенциальной энергией хрупкого вещества в ЛЗУ и кинетической энергией микроудара v -го индекса. Создана и расширяется информационная база данных для группы материалов, необходимая при настройке СУГ в режиме штатной эксплуатации. Так, для закалённого стекла марки ГОСТ P51136-99 экспериментально определена средняя величина $z_{кр}$ и получена оценочная *fuzzy* – функция:

$$v_{0кр}^{(Fu)} = \varphi_2(E_3; \mu_3; r_y = \text{const}) = 0,6388 E_3^{1/2} r_G^{1/4}. \quad (5)$$

Функция (5) как показательная функция переменных E_3 и r_y с дробным показателем α , удовлетворяющим неравенству $0 < \alpha < 1$, может быть отображена в форме выпуклой поверхности $Q^{(v_{0кр})}$ аналогично $Q^{(E_3=\text{const})}$ и $Q^{(\mu_3=\text{const})}$ (рис. 3).

Функция $\tau_{уд}^{(Fu)} = \varphi_3(k_G; v_0)$ с учётом (3) и (5) имеет вид:

$$\tau_{уд} = 2,9432 \left(\frac{5m_{экр}}{4k_G^{(Fu)}} \right)^{2/5} \cdot v_0^{-1/2},$$

если считать начальную скорость микроудара независимой переменной. Функция скорости v_0 от параметров ШИМ виброгенератора требует отдельного исследования и поэтому в этой статье не рассматривается.

Метод адаптивно-интерактивной настройки системы

Отсутствие точной априорной информации существенно усложняет аналитическое решение задачи УМУГ, отвечающей жёсткому критерию художественного качества изделия.

Исследования, проведенные в НПО «САУНО» показали, что наиболее эффективным решением задачи УМУГ является использование метода АИН системы в процессе штатной эксплуатации, на основе которого разработана и внедрена в серийное производство технология DCIE [6].

Упрощенная схема алгоритма, состоящего из двух ветвей, показана на рис. 4. Рассмотрим этапы технической реализации левой ветви алгоритма (правая ветвь представляет собой схему мониторинга нечеткого состояния ударного инструмента, изнашиваемого в процессе работы).

Первый этап заключается в решении второй задачи динамики: определить величину χ_0 пути, пройденного телом массой $m_{экр}$ (ударником), скорость которого $v_{0кр}$ в конечной точке пути должна быть равна величине, необходимой для нанесения микроудара, обеспечивающего минимальное разрушение в ЛЗУ, при заданной геометрии ударника. Активная сила –

эталонный ШИМ-импульс минимальной длительности, формируемый ударным ШД. Даламберовские связи – восстанавливающий момент ШД и упругий силовой момент, создаваемый подвесом. Предполагается, что силы нелинейного трения пренебрежимо малы.

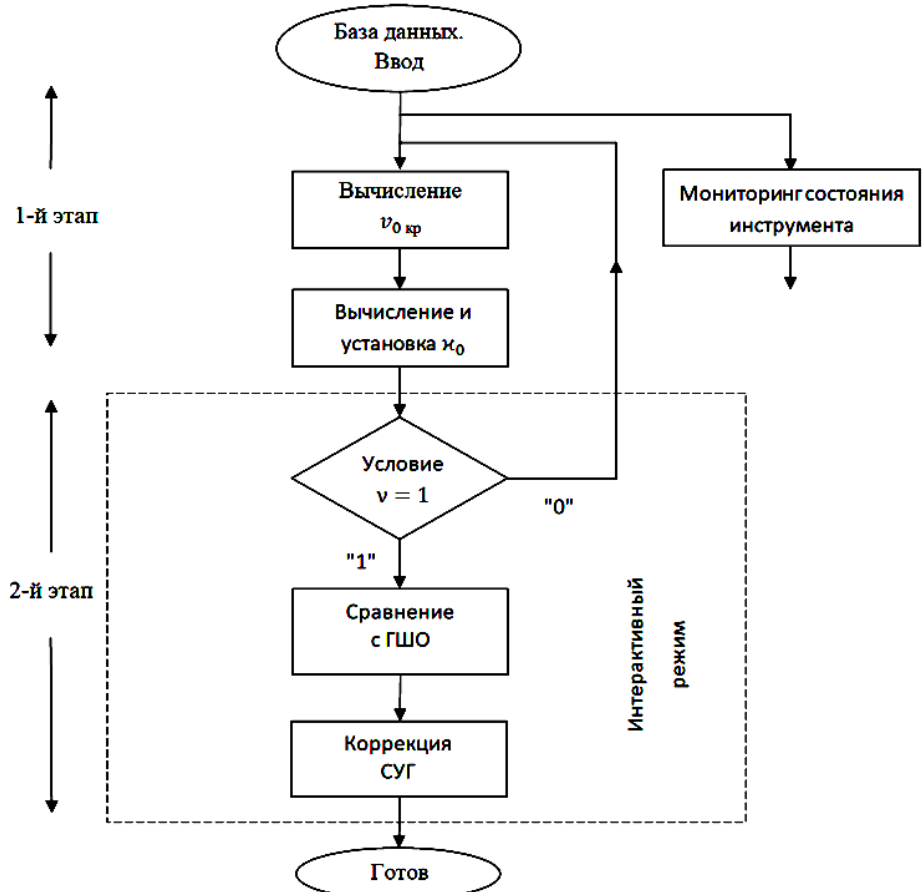


Рис. 4.

Скорость удара $v_{0кр}$, необходимую для интегрирования уравнения движения ударника, вычисляют по формуле (4) или (5). При заданном эталонном импульсе гарантируется минимальное разрушение вещества в ЛЗУ, поэтому путь, пройденный вершиной ударника, который в данной задаче представляет собой начальный технологический зазор,

$$\chi_0 = \frac{1}{m_{\text{экв}}} \left(\frac{4}{5} k_{\Gamma}^{(Fu)} C_y z_{\text{кр}}^{5/2} \right)^{1/2},$$

где $z_{\text{кр}} = E_3 \epsilon_{\text{кр}}$ – деформация, вычисляемая по выражениям (3) и (5), C_y – общий коэффициент линейного упругого сопротивления ШД и подвеса.

Введение в систему χ_0 как параметра является необходимым, но недостаточным условием для перевода СУГ в режим гравирования. Установка χ_0 представляет собой "привязку" B_r -элемента к нулю эталонной

градационной шкалы оттенков (ГШО), разработанной в НПО «САУНО». ГШО входит в состав экранного интерфейса, в среде которого оператор в режиме настройки взаимодействует с системой. Для этого режима на основе алгоритма Флойда разработано специальное программное обеспечение в составе ПО Grave.

Градационная шкала – упорядоченное объединение 16-ти подмножеств M_i яркостных элементов:

$$M_i^{(\text{ГШО})} = \cup_{j \in \{0,1,2,\dots,15\}} \{n_j\}, \quad (7)$$

где $\{n_j\}$ – элемент j -го подмножества (удельное число "белых" точек на площадке изображения).

Градационная шкала, имеющая 16 уровней оттенков, представлена на рис. 5. Если в выражении (7) $i = 0$, то имеем предельный "чёрный" оттенок, если $i = 15$ – "белый". Если, например, верхняя и нижняя грани соответственно равны:

$$\inf_n M_{i+1} = Gb(i+1), \quad \sup_n M_i = Ga(i),$$

то разность полутонов $Ga(i) - Gb(i+1)$ должна быть не больше разрешающей способности зрительного анализатора человека.

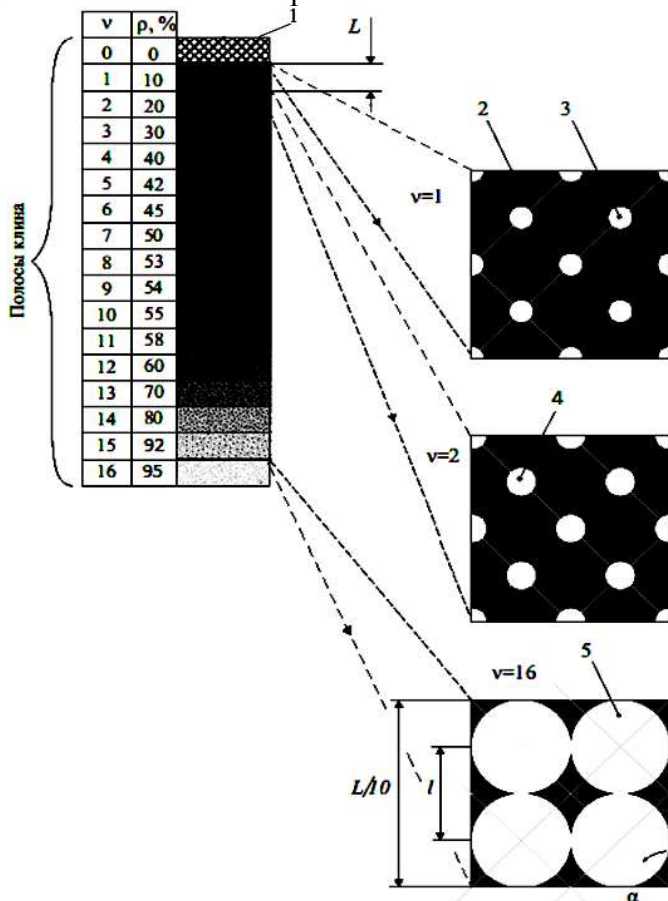


Рис. 5.

Из анализа (3), (4), (7) очевидно, что функция χ_0 является нечёткой. Поэтому второй этап алгоритма интерактивной настройки в случае невязки оттенков сводится к коррекции силы ударных импульсов, по крайней мере для индексов $\nu=8$ и $\nu=15$ ГШО. Эту операцию выполняет оператор СУГ. Для получения качественного результата требуется высокая квалификация и опыт работы оператора. Вопросы растривания и имитации оттенков изображения рассмотрены в [6].

Заключение

На основе анализа и цифрового моделирования нечётких функций, характеризующих физические свойства заготовки и геометрию ударного инструмента, в НПО “САУНО” разработаны метод и технология адаптивно - интерактивной настройки системы ударного гравирования. Эталонным элементом алгоритма является градационная шкала оттенков от $\nu=1$ до $\nu=15$, которую использует оператор СУГ для настройки системы на режим, обеспечивающий в соответствии с критерием заданное качество изображения [7].

Список литературы

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Dynamics, 2009. – 408 с.
2. Магомедов М.Х., Яковлев А.В. Управляемый микроудар с фазой хрупкого разрушения: исследование с использованием контактной модели Герца // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2014. – №4(49). – С. 3-21.
3. Магомедов М.Х., Магомедов Г.Х., Громов А.Е., Яковлев А.В. Прикладные аспекты механики управляемого высококачественного микроразрушения // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2018. – № 12. – С.58-64.
4. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления. Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
5. Магомедов М.Х., Громов А.Е., Яковлев А.В. Принципы разработки и проектирования систем управляемого ударного гравирования // Вестник машиностроения. – 2018. – № 3. – С. 54-61.
6. Магомедов М.Х., Громов А.Е., Яковлев А.В. Цифровая технология управляемого ударного гравирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – №10. – С. 2-9.

References

1. Biderman V.L. Theory of mechanical vibrations. – Moscow: Dynamics, 2009. – 408 p.
2. Magomedov M.Kh., Yakovlev A.V. Controlled microstrike with a brittle fracture phase: a study using the Hertz contact model // Bulletin of the BMSTU. Ser. Instrumentation. – 2014. – No.4(49). – P. 3-21.

3. Magomedov M.Kh., Magomedov G.Kh., Gromov A.E., Yakovlev A.V. Applied mechanics aspects of controlled high quality micro-destruction // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2018. – No.12. – P. 58-64.
4. Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control. Ed. by N.D. Egupov. – M.: Publ. House of BMSTU, 2002. – 744 p.
5. Magomedov M.Kh., Gromov A.E., Yakovlev A.V. Principles of development and design of controlled impact engraving systems // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2018. – No.3. – P. 54-61.
6. Magomedov M.Kh., Gromov A.E., Yakovlev A.V. Digital technology of controlled impact engraving // Bulletin of Computer and Information Technologies. – 2015. – No.10. –P. 2-9.

Магомедов Магомед Хабибович – доктор физико-математических наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия	Magomedov Magomed Khabibovich – doctor of physics and mathematics sciences, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Громов Александр Евгеньевич – заместитель Генерального директора НПО «САУНО», Москва, Россия	Gromov Alexander Evgeniyevich – Deputy General Director, NPO SAUNO, Moscow, Russia
Яковлев Альберт Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия	Yakovlev Albert Vasilyevich – candidate of technical sciences, associate professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Received 29.01.2021