

Моделирование и разработка конструкции устройства для статико-импульсной обработки поверхностей деталей

Н.А. Швалева^a, А.А. Фадеев^b, Т.Т. Ереско^c

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
пр. «Красноярский рабочий» 31, Красноярск, Россия

^anatalyashvaleva@ya.ru, ^bfadeev.77@mail.ru, ^cereskottt@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>,

^b<https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>,

^c<https://orcid.org/0000-0001-9114-2490>

Статья поступила 20.02.2019, принята 29.03.2019

Эксплуатационные характеристики контактирующих элементов машин и механизмов в значительной степени определяются показателями качества слоя у поверхностей контакта. В настоящее время в машиностроении применяют разнообразные технологические методы поверхностно-пластического деформирования (ППД), где не образуется стружка, а происходит упругоэластическое деформирование поверхностного слоя заготовки. Одной из основных характеристик эффективно-сти динамического нагружения при ППД является доля энергии удара, затрачиваемая на упругоэластическую деформацию обрабатываемого материала в зоне деформации. Энергия наиболее полно передается через поджатый к нагружаемой поверхности с некоторым усилием инструмент. Это означает, что наиболее перспективно упрочнение в условиях комбинированного статического и динамического нагружения. Данное упрочнение может обеспечить статико-импульсная обработка (СИО) — один из новейших способов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин. СИО осуществляется в условиях сочетания периодического динамического и постоянного статического воздействия деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Воздействие позволяет создавать большие напряжения на пятне контакта инструмента и заготовки. При СИО глубина упрочнения достигает 10 мм и более при степени упрочнения до 100 %. Интересными являются случаи применения для статико-импульсной обработки устройств с электрическим двигателем. Эти устройства отличаются стабильностью и повторяемостью воспроизведения ударных импульсов, удобством и безопасностью эксплуатации, компактностью, широким диапазоном ускорений. На основе исследований рассчитана и спроектирована конструкция устройства для статико-импульсной обработки, описан принцип его работы, разработана математическая модель, которая позволяет оценить технологические параметры установки, а также определить величину упругоэластической деформации по составляющим. Разработанная конструкция устройства для статико-импульсной обработки на основе линейного электродвигателя способна повысить производительность обработки за счет полученной математической модели. Разработанное устройство может найти применение для обработки плоских поверхностей деталей из металла, мягких материалов (кожа, пластик, резина) клеем, чеканкой.

Ключевые слова: конструкция устройства для статико-импульсной обработки; математическая модель; упругоэластическая деформация; статико-импульсная обработка; упрочнение; линейный электродинамический привод.

Modeling and design of the device for static-pulse partssurface processing

N.A. Shvaleva^a, A.A. Fadeev^b, T.T. Eresko^c

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, KrasnoyarskyRabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

^anatalyashvaleva@ya.ru, ^bfadeev.77@mail.ru, ^cereskottt@mail.ru

^a<https://orcid.org/0000-0002-1031-3153>,

^b<https://orcid.org/0000-0003-3171-8528>,

^c<https://orcid.org/0000-0001-9114-2490>

Received 20.02.2019, accepted 29.03.2019

The operational characteristics of the contacting elements of machines and mechanisms are largely determined by the quality indicators of the layer at the contact surfaces. Nowadays, in the engineering industry, various technological methods of surface plastic deformation (SPD) are used, where chips are not formed, but elastic-plastic deformation of the surface layer of the workpiece occurs. One of the main characteristics of the efficiency of dynamic loading in the case of SPD is the fraction of the impact energy expended on the elastoplastic deformation of the material being processed in the deformation zone. Energy is most fully transmitted through a tool pressed to the loaded surface with some effort. This means that the most promising is hardening under combined static and dynamic loading. This hardening can provide static-pulse treatment (SPT) - one of the newest ways to improve the performance characteristics of

parts of machines. SPT is performed under the combination of a periodic dynamic and constant static effect of a deforming tool on the surface to be treated. The impact allows you to create large stresses on the contact patch of the tool and the workpiece. When SPT depth of hardening reaches 10 mm or more with a degree of hardening up to 100%. Interesting are the cases of application for static-pulse treatment of devices with an electric motor. These devices are distinguished by the stability and repeatability of shock pulse reproduction, convenience and safety of operation, compactness, a wide range of accelerations. Based on the studies, the design of the device for static-impulse processing has been calculated and designed, the principle of its operation has been described, a mathematical model has been developed which allows to evaluate the technological parameters of the installation and also determine the amount of elastic-plastic deformation by components. The developed design of the device for static-pulse treatment based on a linear electric motor can improve the processing performance due to the mathematical model obtained. The developed device can be used for processing the flat surfaces of metal parts, soft materials (leather, plastic, rubber) by branding, embossing.

Keywords: device design for static-pulse processing; mathematical model; elastoplastic deformation; static-pulse processing; hardening; linear electrodynamic drive.

Введение

Наиболее прогрессивным способом упрочнения поверхности-пластическим деформированием (ППД) является процесс статико-импульсной обработки, который позволяет осуществлять упрочнение материала в условиях комбинированного статического и динамического силового воздействия. Сочетание статической и динамической нагрузки создает дополнительные возможности при упрочнении поверхности. Технология упрочнения включает предварительное статическое и последующее периодическое импульсное нагружение инструмента. Предварительное статическое нагружение создает благоприятные условия для полной передачи потока ударной энергии импульса упрочняющей поверхности [1].

Преимуществами статико-импульсной обработки (СИО) перед другими способами ППД являются низкая энергоемкость, высокий коэффициент передачи энергии упрочняемой поверхности, возможность воздействия на упрочняемую поверхность управляемым импульсом, компактность устройства.

Существенный прогресс в обработке материалов давлением, в частности СИО, устанавливает задачи разработки новых технологических процессов, а также усовершенствования оборудования, включая разработку и проектирование новых конструкций, расширение номенклатуры и типоразмеров машин ударного действия, исследование процессов обработки и режимов работы оборудования для повышения эффективности их использования.

К настоящему времени сформировалась номенклатура специальных устройств для реализации статико-импульсной обработки. Исследованием и проектированием занимались А.Г. Лазуткин, Л.С. Ушаков, Б.С. Кузнецов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев и др. [2–6].

Основным элементом оборудования для осуществления статико-импульсной обработки является генератор механических импульсов (ГМИ). ГМИ позволяет обеспечить после удара неразрывный контакт элементов ударной системы со средой. Генераторы импульсов для СИО могут быть адаптированы из существующих конструкций (например, молоты для дорожно-строительных работ, горнодобывающей промышленности) или разработаны специально [7–9].

Так, ударные устройства с электромагнитным приводом обладают более высокой энергией ударов. Пневмо- и гидроударные устройства отличаются высокой надежностью и стабильностью генерируемой энергии и частоты ударов. Однако используемые в настоя-

щее время пневмо-, гидроударные устройства не позволяют регулировать энергию единичного удара в широком диапазоне. Устройства для упрочнения динамическими способами обладают низким КПД (8...12%), вследствие этого для увеличения полезной энергии ударов, затрачиваемой на осуществление упругопластической деформации, необходимо увеличивать их габаритные размеры. Высокие требования по обеспечению точности изготовления деталей гидроударных машин создают дополнительные трудности в использовании данного типа устройств.

Интересными являются случаи применения для статико-импульсной обработки устройств с электрическим двигателем. Они отличаются стабильностью и повторяемостью воспроизведения ударных импульсов, удобством и безопасностью эксплуатации, компактностью, широким диапазоном ускорений ($1...10^6 \text{ м/с}^2$) по сравнению с устройствами, в которых масса разгоняется при свободном падении и достигает скорости 20 м/с [10–12].

Исходя из вышесказанного, можно судить об актуальности и перспективах применения для статико-импульсной обработки устройств с электрическим двигателем.

Методика исследования. По известной методике расчета линейных электродинамических двигателей [13] рассчитана и спроектирована конструкция устройства для статико-импульсной обработки.

Конструкция устройства (рис. 1) состоит из следующих основных элементов: индуктор статический 1; индуктор динамический 2, посредством которого осуществляется периодическое импульсное нагружение инструмента (индентора); якорь 3, выполненный в виде стакана с двумя обмотками 4, 5; индентор 6; направляющие 7.

Принцип работы устройства включает несколько этапов.

Первый этап (устройство находится в нейтральном положении). На обмотки индукторов (статический 1 и ударный 2) и обмотку якоря 4 подается прямое напряжение, а на обмотку якоря 5 — постоянное обратное напряжение, вследствие чего происходит выталкивание якоря из зазора индуктора 1 и втягивание его в зазор индуктора 2.

Второй этап (статическая часть работы — прижатие индентора к обрабатываемой поверхности). На обмотку якоря 4 подается обратное напряжение, происходит втягивание якоря и прижатие бойка (индентора) к упрочняемой поверхности (контртелу), вместе с тем

на обмотку якоря 5 и на обмотки индукторов 1, 2 подается прямое напряжение, вследствие чего происходит взвод индуктора 2.

Третий этап (динамическая часть работы — удар). На обмотках индукторов — прямое напряжение, на обмотке якоря 4 — постоянное обратное напряжение, а на обмотку якоря 5 подается импульсное напряжение, вследствие чего происходят удар и передача импульса бойку (индентору).

Данная конструкция требует разработки математической модели работы для более точного изучения контактного взаимодействия, а также регулировки удара.

Математическая модель разработана по существующей методике проектирования линейного электродинамического двигателя (ЛЭДД) [13], а также на основе уравнения, описывающего движение якоря с инструментом в момент удара бойка о поверхность [14–15].

Расчет характеристик ЛЭДД и параметров технологического процесса производится на базе системы уравнений, представленной в [15], где на основании закона Ньютона движение бойка будет определять действующие на него силы, а механизм электромеханического преобразования энергии определяется уравнением напряжений для каждой обмотки ЛЭДД [16].

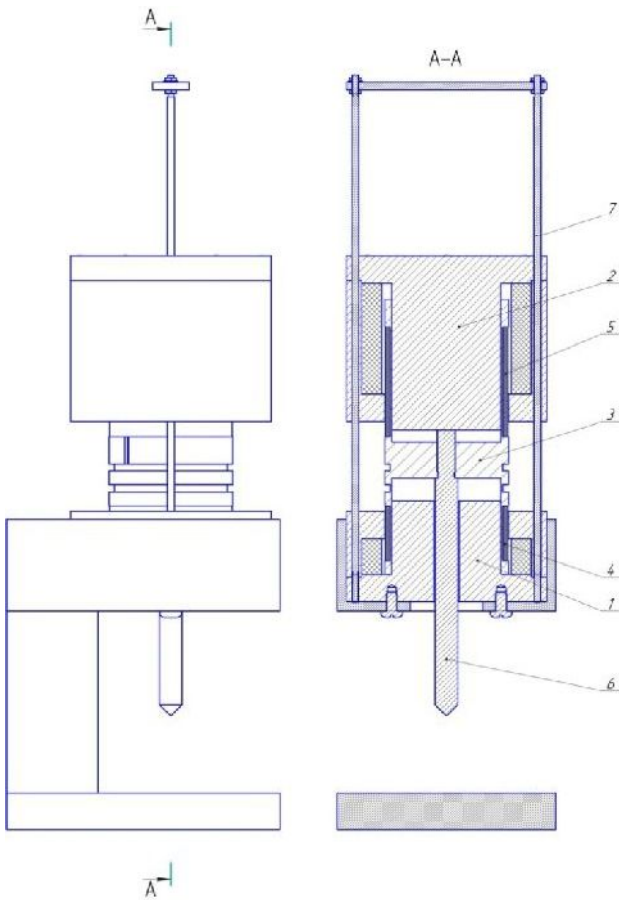


Рис. 1. Конструкция устройства для статико-импульсной обработки поверхностей деталей: 1 — индуктор статический; 2 — индуктор динамический; 3 — якорь; 4, 5 — обмотки якоря; 6 — индентор; 7 — направляющие

Сила удара будет определяться как сумма статического и динамического усилия, а также силы упруго-пластической деформации:

$$F_{y\partial} = F_{cm} + F_{дин} + F_{деф} .$$

Так, при подаче обратного напряжения на обмотку 4 якорь 3 втягивается в корпус индуктора 1 и прижимается индентором 6 к обрабатываемой поверхности детали. На индентор 6 (боек) будет действовать статическое усилие со стороны обмотки индуктора 1 и противодействовать усилие некой упруго-пластической деформации (статической составляющей). Выразим величину упруго-пластической деформации через k — коэффициент сопротивления внедрению:

$$m_{яв} \frac{d^2x}{dt^2} = F_{cm} - k\alpha_{y-ns} = \frac{I_{я4} N_{я4} \pi d_{ср.я4} B_{з1}}{P_{я4}} - k\alpha_{y-ns} \quad (1)$$

где $d_{ср.я4}$ — средний диаметр якоря 3 с обмоткой 4, м; $N_{я4}$ — число витков якоря 3 с обмоткой 4; $B_{з1}$ — магнитная индукция в зазоре индуктора 1, Тл; $I_{я4}$ — величина тока в обмотке якоря, А; $P_{я4}$ — коэффициент, принятый при расчете активной длины якоря, учитывающий отношение t_{ϕ} (толщина магнитного фланца) и $l_{оя}$ (длина обмотки).

Разгон динамического индуктора осуществляется под действием электромагнитной силы, за счет изменения направления тока в обмотке якоря 5 (подача импульсного напряжения) и его выталкивания и втягивания, поэтому со стороны обмотки индуктора 2 будет действовать статическое усилие:

$$m_u \frac{d^2x}{dt^2} = F_{cm} = \frac{I_{я5} N_{я5} \pi d_{ср.я5} B_{з2}}{P_{я5}} \quad (2)$$

$$m_u \frac{d^2x}{dt^2} = F_{эм} =$$

$$= \frac{\pi d_{ср.я5} N_{я5} B_{з2} \left(U_{я5} P_{я5} + \pi V_p d_{ср.я5} N_{я5} B_{з2} \right)}{R_{я.А5} P_{я5}^2} \quad (3)$$

где $U_{я5}$ — напряжение питания обмотки 5 якоря 3, В; V_p — реверсивная скорость движения якоря, мм/мин; $R_{я.А5}$ — активное сопротивление катушки якоря, Ом.

В конце разгона индуктора индентор (боек) производит импульсное нагружение поверхности, где противодействует сила упруго-пластической деформации (динамической составляющей). Поэтому уравнение (3) приобретает вид:

$$m_u \frac{d^2x}{dt^2} = F_{эм} - k\alpha_{y-nd} = \frac{\pi d_{ср.я5} N_{я5} B_{з2}}{R_{я.А5} P_{я5}^2} \cdot \left(U_{я5} P_{я5} + \pi V_p d_{ср.я5} N_{я5} B_{з2} \right) - k\alpha_{y-nd} \quad (4)$$

Уравнения (1) и (4) преобразуем относительно следующих параметров:

ЭДС, наводимая в обмотке якоря:

$$E = U_{я} = V_0 \pi d_{cp.я} 5 N_{я} 5 B_{32} ,$$

где V_0 — начальная скорость разгона якоря, м/с.

Реверсивная скорость движения:

$$V_p = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) = \frac{dx}{dt} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) ,$$

где t — время разгона, сек; T_m — постоянная времени разгона, сек.

Конструктивный параметр двигателя [14]:

$$z = \frac{\pi d_{cp.я} N_{я}}{P_{я}} .$$

Ток в обмотке якоря:

$$I_{я} = \frac{U_{я}}{R_{я.A}} .$$

Для более детального описания характера ударного взаимодействия необходимо учитывать волновые явления. При статико-импульсной обработке статическая составляющая нагрузки незначительна и выбирается из условия выхода местной деформации за пределы упругости и как можно более полной передачи энергии ударного импульса в зону обработки. Пластическая деформация осуществляется за счет энергии динамической, а именно импульсной составляющей нагрузки. В работах [17–22] установлены зависимости, отражающие взаимосвязь между прикладываемой контактной нагрузкой и внедрением инструмента.

В ходе преобразований получим следующее уравнение:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \left(\frac{z 4 B_{31} I_{я4}}{m_{яв}} - \frac{k \alpha_{ys}}{m_{яв}} \right) + \left[\left(\frac{z 5^2 \cdot B_{32}^2}{m_u \cdot R_{я.A5}} - \frac{k_D}{m_u} \right) \cdot \frac{dx}{dt} + \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \frac{z 5 B_{32} I_{я5}}{m_u} - \frac{k \alpha_{yd}}{m_u} \right] \quad (5)$$

где α_{ys} — статическая составляющая упругопластической деформации, м; α_{yd} — динамическая составляющая упругопластической деформации, м [17]:

$$\alpha_{ys} = \frac{\alpha_0}{\sqrt[3]{1 + 2hs / \alpha_y}} + \frac{F_{s1} + F_{s2}}{2\pi R_{np} H_D} ,$$

$$\alpha_{yd} = \frac{\alpha_0}{\sqrt[3]{1 + 2hd / \alpha_y}} + \frac{P_u}{2\pi R_{np} H_D n_D} ,$$

где hs, hd — остаточное сближение, равное глубине восстановленного отпечатка, статическое и динамическое соответственно; α_y — упругое сближение, исчезающее со снятием нагрузки вследствие упругого восстановле-

ния индентора и контртела; α_0 — сближение инструмента с нагружаемой поверхностью при чисто упругом силовом контакте (формула Герца), м; F_{s1}, F_{s2} — статическое усилие со стороны обмотки индуктора 1 и 2 соответственно, Н; P_u — амплитуда ступени импульса, проходящего к обрабатываемому металлу, Н; R_{np} — приведенный радиус кривизны, м; H_D — пластическая твердость обрабатываемого металла, МПа; n_D — динамический коэффициент пластической твердости:

$$n_D = 0,5 \left(1 - 137 \frac{v}{H_D} + \sqrt{1 + 2250 \frac{v}{H_D}} \right) \quad [17].$$

Расчеты выполнены для линейного электродинамического двигателя с типоразмером 60 мм (2Л60Л). Моделирование работы проводилось методом МКЭ в пакете Mathcad.

В результате математического моделирования получены графики зависимостей $x(t), v(t), E(t)$ (рис. 2–4), которые иллюстрируют характеристики (перемещение, скорость, энергия удара, быстродействие) линейного электродинамического двигателя в момент обработки поверхности детали. В ходе расчетов получена величина упругопластической деформации, где статическая составляющая $\alpha_{ys} = 7,3 \cdot 10^{-8}$ м, динамическая составляющая $\alpha_{yd} = 7,3 \cdot 10^{-8}$ м. Полученные равные значения величин составляющих упругопластической деформации можно объяснить использованием одинакового обрабатываемого материала и материала индентора.

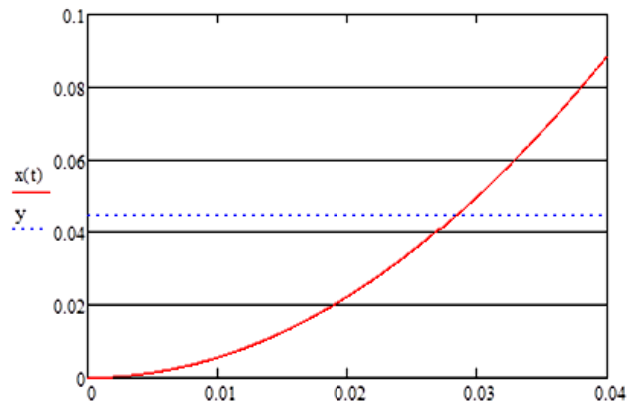


Рис. 2. График зависимости $x(t)$

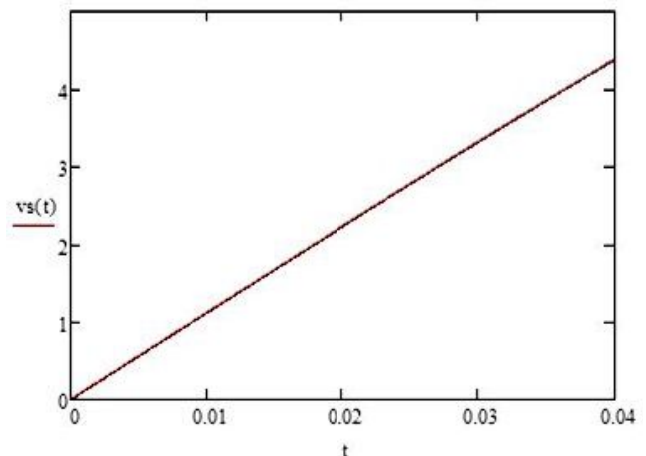


Рис. 3. График зависимости $v(t)$

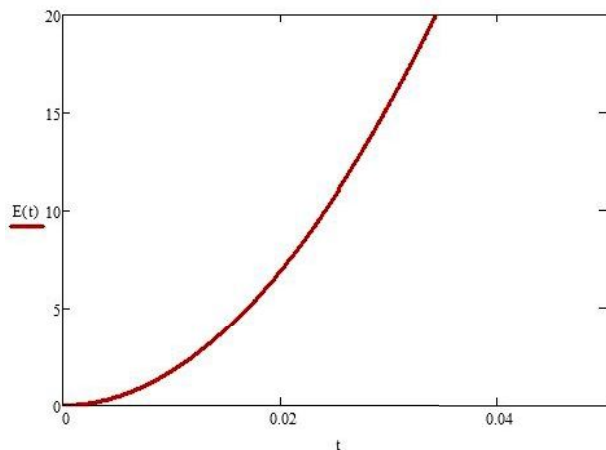


Рис. 4. График зависимости $E(t)$

Анализ графиков $v(t)$ и $E(t)$ показывает увеличение скорости движения ударного индуктора, а также увеличение энергии с течением времени. Параболический характер изменения графика $x(t)$ говорит о существенном влиянии индуцированной электродвижущей силы в обмотке якоря при перемещении индуктора.

Выводы

В результате расчетов получены следующие данные: предельная скорость $v = 3,148$ м/с; энергия удара $E = 13,87$ Дж; быстродействие $T = 220,7$ ударов/мин.

Уравнение (5) в полной мере описывает процесс работы предложенной конструкции устройства для статико-импульсной обработки. С помощью полученной модели можно оценить технологические параметры установки, а также определить величину упругопластической деформации. Разработанное устройство может найти применение для обработки плоских поверхностей деталей из металла и мягких материалов (кожа, пластик, резина) клейменем, чеканкой.

Литература

1. Швалева Н.А., Фадеев А.А., Ереско Т.Т. Математическая модель работы линейного электродинамического двигателя при ударе с учетом упругой деформации // Решетневские чтения: материалы XXII Междунар. науч.-практической конф., посвящ. памяти акад. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. Ч. 1. С. 515-516.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Технология и режимы упрочнения статико-импульсной обработкой // Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 2. С. 17-19.
3. Киричек А.В., Лазуткин А.Г., Соловьев Д.Л. Статико-импульсная обработка и оснастка для ее реализации // СТИИ. 1999. № 6. С. 20-24.
4. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А. Ударное устройство для статико-импульсной деформационной обработки // Кузнечно-штамповочное производство. 2002. № 10. С. 35-40.
5. Kirichek A. V., Silant'ev S.A. Determination of the Energy Parameters of the Shock Mechanism Used to Harden the Surface by Plastic Deformation // Applied Mechanics and Materials, 2015. Vol. 756. P. 85-91.
6. Kirichek A. V., Soloviev D.L. The methods of dynamic surface strengthening by plastic deformation Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo // Obrabotka Metallov Davleniem. 2001. Vol. 7. P. 28-32.

7. Ереско Т.Т., Тубольцев А.А. Совершенствование конструкций и рабочего процесса гидropневмоударных агрегатов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 148-153.

8. Ереско Т.Т. Совершенствование конструкций и рабочего процесса гидropневмоагрегатов ударного действия: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2005. 331 с.

9. Горбунов В.Ф., Лазуткин А.Г., Ушаков Л.С. Импульсный гидропривод горных машин. Новосибирск: Наука, 1986. 198 с.

10. Фадеев А.А., Швалева М.Е., Иванов Д.С., Дудкевич Н.А. Установка на основе линейного электропривода для исследования контактного взаимодействия твердых тел при статико-импульсной обработке // Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч.-практической конф., посвящ. памяти акад. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. Ч. 2. С. 594-595.

11. Shengtian Z. Elektricheskiy lineynyy udarnyy pribor garmonicheskikh udarov [Harmonic beat electric linear impact device] Patent CN. № 106685174, 2017.

12. Stryuk A.I., Bezyazykov S.A., Shestakov I. YA., Shelkovskij O.L. Elektrodinamicheskiy molot i sposob kontrolya yego raboty. [Electrodynamic hammer and method of control over its operation]. Patent RF. № 2063292, 1996.

13. Шестаков И.Я., Стрюк А.И., Фадеев А.А. Линейные электродинамические двигатели. Конструирование. Практическое использование: моногр. Красноярск, 2011. 148 с.

14. Фадеев А.А., Шестаков И.Я., Ереско Т.Т. Математическая модель работы ударного устройства на основе линейного электродинамического привода // Решетневские чтения: материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения акад. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 315-316.

15. Ереско С.П., Ереско Т.Т., Фадеев А.А. Совершенствование конструкций и методов проектирования виброударных механизмов: моногр. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2017. 190 с.

16. Фадеев А.А., Шестаков И.Я., Ереско Т.Т. Использование линейного электродинамического привода для исследования ударного взаимодействия материалов // Вестн. СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 1077-1087.

17. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 287 с.

18. Kirichek A.V., Solov'ev D.L. Strain hardening of metal parts with use of impulse wave // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. P. 012159.

19. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упруго – пластической деформации. М.: Машиностроение, 1986. 230 с.

20. Батуев Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов. М.: Машиностроение, 1977. 246 с.

21. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.

22. Швалева Н.А., Фадеев А.А., Ереско Т.Т. Моделирование ударного воздействия в среде APM Structure 3D // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы междунар. науч.-технической конф. Тюмень, 2018. С. 324-329.

Reference

1. Shvaleva N.A., Fadeev A.A., Eresko T.T. [Mathematical model of the operation of a linear electrodynamic motor upon impact with allowance for elastic deformation]. Materialy XXII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya" [Materials XXII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2018, P. 515-516.

2. Kirichek A.V., Soloviev D.L. [Technology and hardening modes with static-pulse processing]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*. 2003. No. 2, P. 17-19.
3. Kirichek A.V., Lazutkin A.G., Soloviev D.L. [Static-pulse processing and equipment for its implementation]. *Stin*. 1999. Vol. 6. P. 20-24.
4. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Silant'ev S.A., [Shock device for static-pulse deformation processing]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo*. 2002. No. 10. P. 35-40.
5. Kirichek A.V., Silant'ev S.A. Determination of the Energy Parameters of the Shock Mechanism Used to Harden the Surface by Plastic Deformation. *Applied Mechanics and Materials*, 2015. Vol. 756, P. 85-91.
6. Kirichek A.V., Soloviev D.L. The methods of dynamic surface strengthening by plastic deformation *Kuznechno-shtampovochnoe Proizvodstvo (Obработка Metallov Davleniem)* 2001. Vol. 7. P. 28-32.
7. Eresko T.T., Tuboltsev A.A. Sovershenstvovaniye konstruktivnyy i rabocheho protsessa gidropnevmodarnykh agregatov [Improving the design and working process of hydropneumatic impact aggregates] *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2009, No. 3 (23), P. 148–153.
8. Eresko, T.T. Sovershenstvovaniye konstruktivnyy i rabocheho protsessa gidropnevmoagregatov udarnogo deystviya [Improving the design and working process of percussion hydropneumatic units]/ dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Krasnoyarsk Publ., 2005. 331 p.
9. Gorbunov V.F., Lazutkin A.G., Ushakov L.S. Impul'snyy gidroprivod gornykh mashin [Pulse hydraulic mining machines]. Novosibirsk: Nauka. Publ., 1986, 198 p.
10. Fadeev A.A., Shvaleva N.A., Ivanov M.E., Dudkevich D.S. [Installation on the basis of the linear actuator for the research of contact interaction of solid bodies under static and pulse treatment] *Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XXI Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2017, P. 594–595.
11. Shengtian Z. Elektricheskiy lineynyy udarnyy pribor garmonicheskikh udarov [Harmonic beat electric linear impact device] Patent CN. no. 106685174, 2017.
12. Stryuk A.I., Bezyazykov S.A., Shestakov I.Ya., Shelkovskij O.L., Elektrodinamicheskiy molot i sposob kontrolya yego raboty. [Electrodynamic hammer and method of control over its operation]. Patent RF. no. 2063292, 1996.
13. Chestakov I.Y., Stryuk A.I., Fadeev A.A. Lineynyye elektrodinamicheskiye dvigateli. Konstruirovaniye. Prakticheskoye ispol'zovaniye [Linear electrodynamic motors. Designing. Practical use] SibGAU, 2011, 148 p.
14. Fadeev A.A., Chestakov I.Y., Eresko T.T. [A mathematical model of the percussion device on the basis of the linear electrodynamic actuator]. *Materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVIII Intern. Scientific. Conf "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2014, P. 315–316.
15. Eresko S.P., Eresko T.T., Fadeev A.A. Sovershenstvovaniye konstruktivnyy i metodov proyektirovaniya vibroudarnykh mekhanizmov [Improvement of designs and methods of design of vibroshock mechanisms]: monografiya. Krasnoyarsk Publ., 2017, 190 p.
16. Fadeev A.A., Chestakov I.Y., Eresko T.T. [Use of the linear electrodynamic actuator for the research of shock interaction of materials]. *Vestnik SibSAU*. 2016, No. 4, P. 1077–1087.
17. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G. Tekhnologiya i obirudovanie statiko-impul'snoy obrabotki poverchnosti plasticheskim deformirovaniem: Biblioteka tekhnologa [Technology and equipment, staticpulse processing surface plastic deformation: a Library technologist]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, 287 p.
18. Kirichek A.V., Solov'ev D.L. Strain hardening of metal parts with use of impulse wave.// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124, 012159.
19. Drozd M.S., Matlin M.M., Sidyakin Yu.I. Inzhenernyye raschety uprugoplasticheskoy deformatsii. [Engineering analysis of elastic-plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 230 p.
20. Batuev G.S., Golubkov Yu.V., Efimov A.K., Fedoseev A.A. Inzhenernyye metody issledovaniya udarnykh protsessov [Engineering methods of research of percussive processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 264 p.
21. Markovets M.P. Opredeleniye mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti [Determination of the mechanical properties of metals by hardness]. Moscow. Mechanical Engineering Publ., 1979, 191 p.
22. Shvaleva N.A., Fadeev A.A., Eresko T.T. [Simulation of impact integration in APM Stricture 3D] *Nazemnyye transportnyye i tekhnologicheskiye kompleksy i sredstva: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2018. P. 324-329.