

УДК 621.983.044

*В.С. Мамутов, И.А. Шапошников***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ***V.S. Mamutov, I.A. Shaposhnikov***EXPERIMENTAL ESTIMATION OF EFFICACY
OF COIL SYSTEMS
FOR ELECTROMAGNETIC STAMPING BY POLYURETHANE**

Для процессов магнитно-эластоимпульсной штамповки (МЭИШ) разработана методика экспериментальной оценки давления магнитного поля плоского спирального индуктора в системе с подвижным элементом из хорошо проводящего материала. Методика построена на основе обработки измерений напряженности магнитного поля вдоль радиального направления спирали при помощи индукционного датчика и расчета коэффициента эффективности. Предложена система безразмерных параметров, влияющих на коэффициент эффективности. На основе обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость коэффициента эффективности от безразмерных параметров. Данная зависимость может быть использована в практике расчетов технологического устройства и технологий МЭИШ.

МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА; ПЛОСКИЙ СПИРАЛЬНЫЙ ИНДУКТОР; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ; НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ; ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК; БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ; ЭМПИРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ.

The procedure of an experimental estimation of pressure of a magnetic field of a flat spiral inductor in system with a mobile element from good conduction is developed for processes electromagnetic stamping by polyurethane (EMSP). The procedure is based on measurement of magnetic density along a radial direction of a spiral by means of the induction sensor and effectiveness factor calculation. The system of the dimensionless parameters influencing effectiveness factor is offered. Empirical dependence of effectiveness factor on the dimensionless parameters is received. This dependence can be used in practice of calculations of the technological devices and technologies of EMSP.

ELECTROMAGNETIC STAMPING BY POLYURETHANE; FLAT SPIRAL INDUCTOR; EXPERIMENTAL ESTIMATION OF EFFECTIVENESS FACTOR; MAGNETIC DENSITY; INDUCTION SENSOR; DIMENSIONLESS PARAMETERS; EMPIRICAL DEPENDENCE.

В условиях мелкосерийного производства деталей из тонколистовых материалов экономически эффективны технологии штамповки, использующие один жесткий рабочий инструмент. Роль второго инструмента обычно выполняет эластичная среда, в качестве которой часто используют полиуретаны. К такой технологии от-

носится магнитно-эластоимпульсная штамповка (МЭИШ) [1–3].

Схема установки МЭИШ показана на рис. 1. При электрическом разряде конденсаторной батареи магнитно-импульсной установки (МИУ) на плоский спиральный индуктор I в зазоре между спиралью индуктора и подвижным

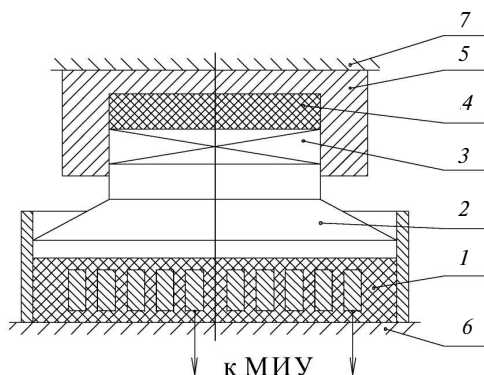


Рис. 1. Схема МЭИШ:

- 1 — плоский индуктор; 2 — подвижный элемент;
3 — объект нагружения; 4 — эластичная среда;
5 — контейнер; 6, 7 — механический прижим

элементом 2, выполненным из материала с высокой электропроводностью, возникает сильное импульсное магнитное поле. При перемещении подвижного элемента под действием электромагнитного усилия в замкнутом контейнере 5 с эластичной средой 4 возникает импульсное давление, которое воздействует на объект нагружения 3 (заготовка с инструментом).

Одна из наиболее важных задач при проектировании технологических устройств МЭИШ — повышение эффективности преобразования энергии [4]. В значительной степени это определяется эффективностью системы «индуктор — подвижный элемент». Преобразование импульсного давления самим подвижным элементом — механическим концентратором — можно оценить относительно просто [5]. В последнее время появилась возможность с помощью программного комплекса LS-DYNA 980 проводить расчет электромагнитных полей реальных индукторных систем, обеспечивающий определение электромагнитного давления [6]. Однако низкая сходимость вычислительного процесса требует для одного варианта расчета несколько десятков часов машинного времени, даже на суперкомпьютере. Поэтому цель нашей работы — экспериментальная оценка эффективности системы «индуктор — подвижный элемент». Экспериментальные данные нужны также для оценки корректности компьютерного моделирования.

Измерение напряженности магнитного поля индуктора

Электромагнитное давление может быть определено по величине напряженности маг-

нитного поля в конкретной точке зазора между спиралью индуктора и подвижным элементом, где помещается датчик. Для измерения напряженности магнитного поля могут применяться датчики, основанные, например, на эффектах Холла, Фарадея, Зеемана, изменения удельного сопротивления и др. [7]. Однако с точки зрения удовлетворения габаритных требований, простоты конструкции и применения, точности измерения в условиях МЭИШ наиболее целесообразно использовать индукционный датчик, представляющий собой катушку связи, в которой наводится напряжение, если поместить ее в изменяющийся во времени магнитный поток [7, 8].

Типичный индукционный датчик для измерения сильных импульсных магнитных полей в условиях МЭИШ [9] представляет собой катушку из 15–25 витков медной изолированной проволоки толщиной не более 0,05 мм, намотанных на каркас из лавсанового диэлектрика. Величина изоляционного зазора между индуктором и подвижным элементом до момента нагружения обычно не превышает 0,5–1,0 мм. Поэтому толщина датчика должна быть менее 0,5 мм. Размеры катушки вдоль силовых линий магнитного поля также должны быть достаточно малыми, чтобы усреднение вдоль этого направления не приводило к значительной погрешности измерения. Длина катушки задается в пределах 1–2 мм, а ширина — 5–10 мм. Для уменьшения паразитной индуктивности подводов провода перекручиваются и подсоединяются к коаксиальному кабелю, а для стабилизации параметров катушка и подводы пропитываются клеем.

Для индукторных систем, используемых для МЭИШ, характерно незначительное искривление силовых линий магнитного поля. Поэтому объемное электромагнитное усилие может быть заменено электромагнитным давлением [10]. При разряде конденсаторной батареи на спираль индуктора в зазоре между спиралью и подвижным элементом из электропроводного материала возникает импульсное магнитное поле с напряженностью H , наводящее вихревые токи в поверхностном слое материала подвижного элемента, что приводит к силовому воздействию на него. Для подвижного элемента, толщина которого значительно превышает скин-слой магнитного потока, просачивание поля практи-

чески отсутствует, и давление магнитного поля в этом случае определяется соотношением

$$p_m \cong \mu_0 H^2 / 2,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума.

Если вдоль силовых линий магнитного поля в изоляционный зазор между индуктором и подвижным элементом поместить катушку индукционного датчика с эффективной поверхностью S , то наведенное в ней напряжение будет пропорционально производной напряженности магнитного поля H по времени t :

$$V(t) = \mu_0 S (dH/dt).$$

Для получения на осциллографе сигнала, пропорционального напряженности магнитного поля на выход катушки перед осциллографом можно поставить RC -интегратор. Если постоянная времени интегрирования $\tau = RC$ намного превышает длительность сигнала, а входное сопротивление осциллографа намного больше сопротивления интегратора, тогда напряженность поля может быть определена по величине напряжения $U(t)$ сигнала на осциллографе следующей зависимостью:

$$H(t) = U(t)\tau / (\mu_0 S).$$

Эффективная поверхность S зависит от числа витков катушки датчика, площади витков и дополнительной паразитной площади подводов и контактов. Для практических измерений напряженности магнитного поля в условиях МЭИШ определяют некоторую интегральную характеристику чувствительности индукционного датчика [9]

$$k_H = \tau / (\mu_0 S).$$

Данный параметр можно определить, поместив катушку в однородное магнитное поле известной напряженности. В диапазоне 2–30 кГц частот разрядного тока такое поле с погрешностью неоднородности менее 1 % может быть создано внутри полоскового шунта из нихромовой фольги. Разрядный ток $I(t)$, измеренный при помощи пояса Роговского, и ширина шунта b_s определяют тарировочную напряженность магнитного поля

$$H_T = I(t) / b_s.$$

Сопоставление напряжения на осциллографе от индукционного датчика с этой величиной H_T позволяет определить величину k_H .

Для измерений использовался индукционный датчик с коэффициентом чувствительности $k_H = 1,06 \cdot 10^6$ (А/м)/В. Постоянная времени RC -интегратора была больше 1 мс, что обеспечивало погрешность интегрирования менее 5 %. Паспортная величина сопротивления входа осциллографа равнялась 1 МОм.

Схема измерений представлена на рис. 2. При разряде конденсаторной батареи C магнитно-импульсной установки 4 по спирали индуктора 1 протекает импульсный ток, а в изоляционном зазоре 2 между спиралью индуктора и подвижным элементом 3 возникает магнитное поле. Напряженность магнитного поля измеряется индукционным датчиком 6 с интегрирующей RC -цепочкой 7 . Измерение разрядного тока осуществлялось поясом Роговского 8 с интегрирующей RC -цепочкой 9 . Запуск развертки осциллографа 10 осуществлялся вспомогательным поясом Роговского 5 . В изоляционной прокладке 2 был выполнен паз для перемещения индукционного датчика 6 .

Пример осциллограммы разрядного тока и напряженности магнитного поля приведен на рис. 3, а. Распределение относительной напряженности магнитного поля (H/H_i) в зависимости от относительного радиуса (r/R_2) для момента максимума разрядного тока представлено на рис. 3, б. Здесь принято нормировочное значение напряженности, определяемое выражением напряженности поля идеального индуктора

$$H_i = I_m n / (R_1 - R_2),$$

где I_m — величина максимума тока; n — число витков индуктора; R_1, R_2 — внешний и внутренний радиусы спирали индуктора.

Измерения проводились для индуктора из медной шины шириной $b = 3$ мм, высотой $h = 14$ мм, с числом витков $n = 13$. Внешний и внутренний радиусы спирали: $R_2 = 65$ мм, $R_1 = 15$ мм. Толщина изоляционной прокладки была $\Delta \cong 1,75$ мм. С учетом изоляции спирали индуктора общий изоляционный зазор составлял примерно 2 мм. Подвижный элемент 3 был сделан из алюминия.

Экспериментальная оценка эффективности индуктора

Для идеального индуктора средняя величина электромагнитного давления на подвижный элемент равна

$$p_i = \mu_0 [In / (R_2 - R_1)]^2 / 2.$$

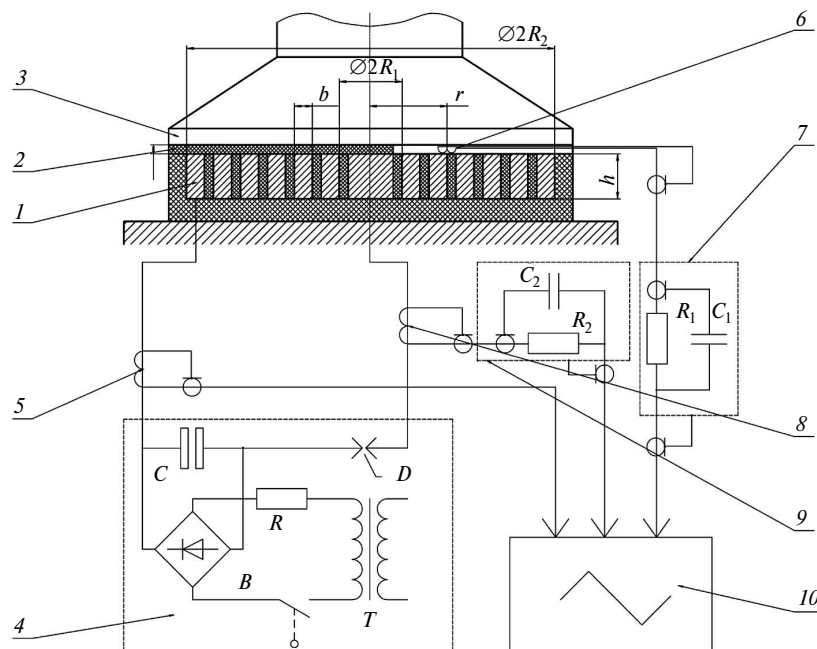


Рис. 2. Схема измерений напряженности магнитного поля:

1 — плоский спиральный индуктор; 2 — изоляционная прокладка; 3 — металлический подвижный элемент; 4 — магнитно-импульсная установка; 5 — пояс Роговского; запускаящий развертку осциллографа; 6 — индукционный датчик; 7 — интегрирующая цепочка; 8 — пояс Роговского для измерения разрядного тока; 9 — интегрирующая цепочка; 10 — осциллограф

Для расчета среднего электромагнитного давления реального индуктора целесообразно скорректировать данное выражение экспериментальной поправкой

$$P_M = P_i K_{IH},$$

где K_{IH} — некоторый поправочный коэффициент. Величина этого коэффициента может быть определена экспериментально на основе соотношения

$$K_{IH} = \bar{H}^2(I_m) / H_i^2(I_m),$$

где $\bar{H}^2(I_m)$ — среднее по площади спирали индуктора значение квадрата напряженности магнитного поля при максимальном значении тока I_m , протекающего через спираль; $H_i^2(I_m)$ — квадрат напряженности магнитного поля идеально индуктора. Параметр K_{IH} можно определять интегрированием квадрата экспериментальной

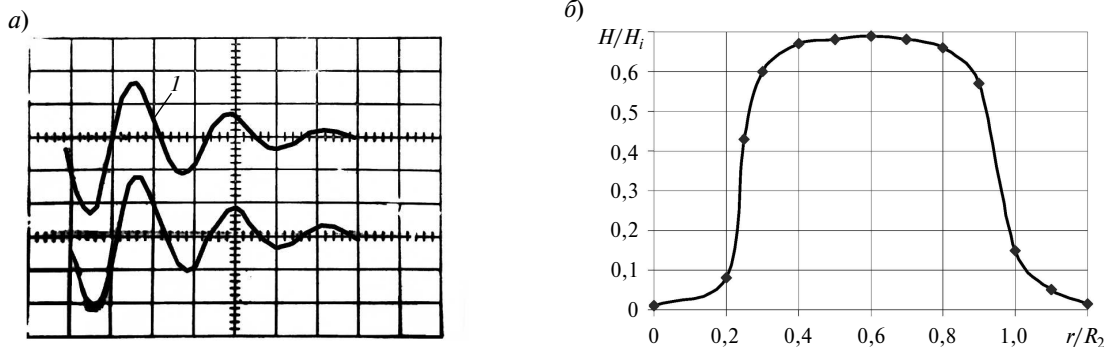


Рис. 3. Пример измерения напряженности магнитного поля для плоского спирального индуктора:

а) осциллограмма разрядного тока (1 — при масштабе по вертикали 4,1 кА/дел) и напряженности поля (2 — при масштабе по вертикали 0,53 МА/м/дел), масштаб по горизонтали — 20 мкс/дел; б) распределение относительной напряженности магнитного поля в радиальном направлении спирали индуктора

зависимости $K_{IH}(r) = \bar{H}^2(r, I_m) / H_i^2(I_m)$ в диапазоне $r \in [R_1, R_2]$. Данный параметр по величине меньше единицы и, по сути, определяет эффективность конкретной индукторной системы.

Измерения проводились на специальной опытной магнитно-импульсной установке, позволяющей устанавливать емкость конденсаторной батареи на уровнях $C = 50$ мкФ, $C = 100$ мкФ, $C = 200$ мкФ за счет частичного отключения последовательно и параллельно включенных отдельных конденсаторов. Изменение емкости батареи позволяло при прочих равных условиях варьировать частоту разрядного тока. Для получения зависимости параметра K_{IH} от геометрических параметров спирали индуктора в эксперименте были использованы три индуктора с числом витков спирали $n = 6$, $n = 9$ и $n = 13$. Спираль была выполнена из медной шины двух типоразмеров: $b = 3$ мм, $h = 14$ мм и $b = 4$ мм, $h = 8$ мм. Спирали имели внешний радиус $R_2 \cong 60$ мм и $R_2 \cong 70$ мм. Величина изоляционного зазора Δ варьировалась: были три фиксированных уровня — 1, 3 и 5 мм. Для подвижного элемента применялись следующие материалы с соответствующими значениями коэффициента магнитной диффузии: медь ($\chi_2 = 0,014$ м²/с), алюминиевый сплав ($\chi_2 = 0,021$ м²/с) и магний ($\chi_2 = 0,035$ м²/с).

Был проведен факторный эксперимент типа 2^4+1 , в котором на двух крайних уровнях варьировались емкость конденсаторной батареи, вид спирали индуктора, величина изоляционного зазора и марка материала подвижного элемента. Кроме того был выполнен эксперимент для центральной точки плана, определяющей некоторое среднее значение. При аппроксимации результатов эксперимента данные для центральной точки задавались с увеличенным в 4 раза весом коэффициентом по сравнению с результатами в других точках плана.

При обработке результатов эксперимента выбраны три комплексных безразмерных параметра, влияющих на параметр K_{IH} :

$$\lambda_1 = b\sqrt{f/\chi_1},$$

$$\lambda_2 = (\delta_1 + \delta_2) / (\delta_1 + \delta_2 + \Delta),$$

$$\lambda_3 = [1 - \Delta / (R_2 - R_1)] [1 - h / (R_2 - R_1)] nb / (R_2 - R_1).$$

где χ_1 — коэффициент магнитной диффузии материала шины; b — ширина шины спирали ин-

дуктора; δ_1 — скин-слой магнитного потока в материале индуктора; δ_2 — скин-слой магнитного потока в материале подвижного элемента при частоте f ; Δ — величина изоляционного зазора;

Величина скин-слоя магнитного потока с учетом нестационарности процесса диффузии магнитного поля определялась по формуле [7]

$$\delta = 0,78\sqrt{2\chi/\omega},$$

где ω — круговая частота разрядного тока, определяемая по величине первого периода.

С учетом диапазонов изменения размерных факторов безразмерные параметры варьировались в следующих диапазонах:

$$\lambda_1 \in [1,6; 3,7], \quad \lambda_2 \in [0,24; 0,78], \quad \lambda_3 \in [0,40; 0,71].$$

Обработкой экспериментальных данных получена зависимость параметра K_{IH} от безразмерных независимых параметров:

$$K_{IH} = 0,739\lambda_1^{0,249}\lambda_2^{0,791}\lambda_3^{0,118}.$$

Средняя погрешность аппроксимации опытных данных составила примерно 13 %. Данная зависимость может быть использована в практике расчетов технологического устройства и технологий МЭИШ. В компьютерной модели вместе с расчетом параметров разрядного тока данная зависимость позволит скорректировать давление магнитного поля идеального индуктора за счет «просачивания» поля в межвитковые зазоры и за счет движения подвижного элемента.

Разработана методика экспериментальной оценки давления магнитного поля плоского спирального индуктора в системе с подвижным элементом из хорошо проводящего материала. Экспериментальная методика построена на обработке измерений напряженности магнитного поля вдоль радиального направления спирали индукционным датчиком. Предложена система безразмерных параметров, определяющих напряженность магнитного поля. Данные параметры отражают геометрию спирали индуктора, величину изоляционного зазора между индуктором и подвижным элементом, частоту разрядного тока и характеристики диффузии магнитного поля в материалы спирали и подвижного элемента. На основе обработки экспериментальных

данных получена эмпирическая зависимость параметра, определяющего эффективность индукторной системы, от безразмерных параме-

тров, которая может быть использована в практике расчетов технологического устройства и технологий МЭИШ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богоявленский К.Н., Гиндин В.Б., Мамутов В.С. [и др.]**. Магнитно-импульсная штамповка с применением промежуточных эластичных сред. Л.: Изд-во ЛДНТП, 1982. 35 с.

2. **Богоявленский К.Н., Гиндин В.Б., Мамутов В.С. [и др.]**. Магнитно-эластоимпульсная вырубка-пробивка тонколистовых материалов // КШП. 1984. № 7. С. 12–14.

3. **Мамутов В.С.** Вырубка-пробивка особо тонколистовых металлов на магнитно-импульсной установке // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы международной науч.-практ. конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 867–874.

4. **Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С. [и др.]**. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубki-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. 2001. №2. С. 28–32.

5. **Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Пре-

образование импульсного давления механическим концентратором с учетом волновых процессов // Доклады национальной академии наук Беларуси. Технические науки. 2002. Т. 46. № 3. С. 115–119.

6. **L'Eplattenier P., Cook G., Ascraft C., Burger M., Imbert J. Worswick M.** Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations. *Steel Research Int.* 2009. Vol 80, No. 5. P. 351–358.

7. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.

8. **Winkler K.** Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1973. 456 s.

9. **Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С.** Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 207 с.

10. **Брон О.Б.** Электромагнитное давление // Межвуз. сб.: Механические взаимодействия в сильных магнитных полях. Л.: Изд-во СЗПИ, 1974. С. 7–13.

REFERENCES

1. **Bogoiavlenskiy K.N., Gindin V.B., Mamutov V.S., Oreshenkov A.I.** Magnitno-impul'snaya shtampovka s primeneniem promezhtuchoykh elastichnykh sred. Leningrad: Izd-vo LDNTP, 1982. 35 s. (rus.)

2. **Bogoiavlenskiy K.N., Gindin V.B., Mamutov V.S., Oreshenkov A.I., Perezhogin A.N.** Magnitno-elastoimpul'snaya vyrubka-probivka tonkolistovykh materialov. *KShP.* 1984. № 7. S. 12–14. (rus.)

3. **Mamutov V.S.** Vyrubka-probivka osobo tonkolistovykh metallov na magnitno-impul'snoi ustanovke. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konferentsii.* St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. S. 867–874. (rus.)

4. **Zdor G.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S., Smotrakov D.V.** Razrabotka effektivnykh tekhnologicheskikh ustroystv dlya magnitno-elastoimpul'snoy vyrubki-probivki tonkolistovykh materialov. *Metalloobrabotka.* 2001. № 2. S. 28–32. (rus.)

5. **Zdor G.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Preobra-

zovanie impul'snogo davleniia mekhanicheskim kontsen-tratorom s uchetom volnovykh protsessov. *Doklady natsional'noi akademii nauk Belarusi. Tekhnicheskie nauki.* 2002. Vol. 46, № 3. S. 115–119. (rus.)

6. **L'Eplattenier P., Cook G., Ascraft C., Burger M., Imbert J. Worswick M.** Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations. *Steel Research Int.* 2009. Vol 80. No. 5. P. 351–358.

7. **Knopfel' G.** Sverkhstil'nye impul'snye magnitnye polya. Moscow: Mir, 1972. 392 s. (rus.)

8. **Winkler K.** Hochgeschwindigkeitsbearbeitung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1973. 456 s.

9. **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniya vysokoskorostnogo deformirovaniya metallov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 207 s. (rus.)

10. **Bron O.B.** Elektromagnitnoe davlenie. *Mezhvuzovskiy sb.: Mekhanicheskie vzaimodeistviya v sil'nykh magnitnykh polyakh,* Leningrad: Izd-vo SZPI, 1974. S. 7–13. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович — доктор технических наук профессор кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vmamutov@mail.ru

ШАПОШНИКОВ Игорь Аркадьевич — кандидат технических наук доцент кафедры математики и естественных дисциплин института международных образовательных программ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: shap.igor@mail.ru

AUTHORS

MAMUTOV Vyacheslav S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vmamutov@mail.ru

SHAPOSHNIKOV Igor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: shap.igor@mail.ru