

Кобитянский А.Е., Белобородов В.С. Математическая модель динамики процесса вырубki уплотнений из терморасширенного графита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 53–59. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.07

Kobityansky A.E., Beloborodov V.S. Mathematical model of the dynamics of the process of cutting seals from thermally expanded graphite. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 53–59. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.07
УДК 531.32

А.Е. Кобитянский, В.С. Белобородов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ВЫРУБКИ УПЛОТНЕНИЙ
ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА**

Представлены основные этапы получения прокладок уплотнительных из терморасширенного графита. Предложена методика получения математической модели динамики процесса вырубki этих прокладок на прессовом оборудовании.

Процедура получения модели состоит из двух взаимосвязанных этапов. На первом этапе с помощью эксперимента получена зависимость технологической силы процесса вырубki от перемещения рабочего органа, которая имеет ряд особенностей из-за специфических свойств терморасширенного графита. Приведены принципиальная схема эксперимента и его результаты, которые аппроксимировались в виде аналитических зависимостей на основе метода наименьших квадратов.

Разработана расчетная схема динамики процесса вырубki, учитывающая динамическую взаимосвязь между двигателем, исполнительным органом в виде кривошипно-ползунного механизма пресса и обрабатываемым материалом. С учетом принятых допущений построена приведенная к кривошипному валу динамическая модель и рассчитаны основные ее геометрические, массовые, а также силовые параметры. Рассмотрены основные этапы функционирования прессового оборудования в процессе вырубki. Основные параметры сведены в соответствующую таблицу, элементы которой использованы при составлении сформированной математической модели. При этом учтены конструктивно-технологические особенности пресса и выделены этапы его работы (рабочий и холостой ход). Структура системы уравнений движения нелинейная и учитывает характеристику и вид технологической силы вырубki, аналитическое значение которой получено на основе проведенных экспериментов.

Реализация решения этих уравнений осуществляется с помощью программного модуля DYNAM с использованием метода Рунге – Кутты четвертого порядка. Представлен ряд элементов модуля. В качестве примера приведена графическая иллюстрация одного из результатов расчета. По результатам проведенных исследований сделаны выводы.

Ключевые слова: терморасширенный графит, процесс вырубki, прокладки уплотнительные, прессовое оборудование, технологическая сила, кривошипно-ползунный механизм, эксперимент, метод наименьших квадратов, расчетная схема, математическая модель, уравнения движения.

A.E. Kobityansky, V.S. Beloborodov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF THE PROCESS
OF CUTTING SEALS FROM THERMALLY EXPANDED GRAPHITE**

The main stages of obtaining sealing gaskets from thermally expanded graphite are presented. A method for obtaining a mathematical model of the dynamics of the process of cutting these gaskets on press equipment is proposed.

The procedure for obtaining a model consists of two interrelated stages. At the first stage, using the experiment, the dependence of the technological force of the cutting process on the movement of the working body was obtained, which has a number of features due to the specific properties of thermally expanded graphite. A schematic diagram of the experiment and its results are presented, which are approximated in the form of analytical dependencies based on the least squares method.

The calculation scheme of the dynamics of the cutting process is developed, taking into account the dynamic relationship between the engine, the Executive body in the form of a crank-slide mechanism of the press and the processed material. Taking into account the accepted assumptions, a dynamic model reduced to the crank shaft is constructed and its main geometric, mass, and power parameters are calculated. The main stages of operation of press equipment in the cutting process are considered. The main parameters are summarized in the corresponding table, the elements of which are used in compiling the generated mathematical model. At the same time, the design and technological features of the press are taken into account and the stages of its operation (working and idling) are highlighted. The structure of the system of equations of motion is nonlinear and takes into account the characteristic and type of technological cutting force, the analytical value of which is obtained on the basis of experiments.

The solution of these equations is implemented using the DYNAMIC software module using the fourth-order Runge-Kutta method. A number of module elements are presented in the article. As an example, a graphic illustration of one of the calculation results is given. Based on the results of the research, conclusions are made.

Keywords: thermally expanded graphite, cutting process, thermal expansion graphite gaskets, pressing equipment, technological strength, slider crank mechanism, experiment, least square method, design scheme, mathematical model, equations of motion.

Терморасширенный графит – материал с высокой стойкостью к температурным и химическим воздействиям. Обладает гибкостью, податливостью, прочностью, что делает его высокоэффективным набивочным и уплотнительным материалом, широко применяемым в различных областях промышленности [1–4]. В частности, используется для герметизации валов насосов, штоков арматуры, фланцевых соединений и тому подобного в качестве прокладок уплотнительных (ПУТГ).

Схема получения ПУТГ представлена на рис. 1, где конечный продукт получается в процессе вырубка на прессовом оборудовании [5–7].

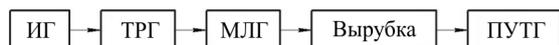


Рис. 1. Последовательность процесса изготовления ПУТГ: ИГ – интеркалированный графит; МЛГ – материал графитовый листовой

Следует учесть, что механические свойства ТРГ, вызванные универсальной природой материала и методами его получения, существенно отличаются от свойств металлов. Вследствие этого технологическая сила \bar{F} процесса вырубка имеет ряд особенностей, основная из которых – нелинейность ее изменения, что существенно влияет на динамические процессы изготовления изделия из ПУТГ [1, 3, 4, 8].

Статья посвящена разработке методики определения динамических параметров и характеристик процесса вырубка ПУТГ на прессовом оборудовании.

Цель исследований – формирование математической модели динамики процесса вырубка уплотнений из терморасширенного графита, на основе которой возможна оценка нагруженности элементов прессового оборудования.

Структура работы заключалась в определении закона изменения технологической силы \bar{F} и изучения с учетом этого динамических явлений, сопровождающих процесс вырубка.

Для определения закономерности изменения технологической силы на первом этапе проведены экспериментальные исследования с помощью испытательного комплекса Instron 3369 [3, 9, 10]. Комплекс имеет структуру, функционирующую по замкнутой системе управления (рис. 2).

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 3.

Управление испытаниями и формирование результатов эксперимента осуществлялись с помощью программного пакета Instron Bluehill 3 [10]. В качестве испытуемого материала выбраны прокладки ПУТГ из листового графитового картона, армированного перфорированной фольгой из нержавеющей стали. Фрагмент результатов одного из испытаний представлен нелинейной диаграммой «нагрузка F (Н) – перемещение X (м) инструмента» (рис. 4).

Для проведения дальнейших исследований эта диаграмма аппроксимировалась аналитическими зависимостями. В основе приближения использовался метод наименьших квадратов по 60 точкам [11–14]. При аппроксимации комбинацией линейных и параболических зависимостей погрешности достигали величин 38 %. Однако для полинома четвертой степени погрешность оказалась значительно меньшей.

В результате расчетов значение силы (Н)

$$F = 90,93X^4 - 4X^3 - 406,8X^2 + 1075,68X, \quad (1)$$

где $X \in [0; 3]$, мм.

Фрагмент экспериментальной и теоретической зависимостей технологической силы F представлен на рис. 5.

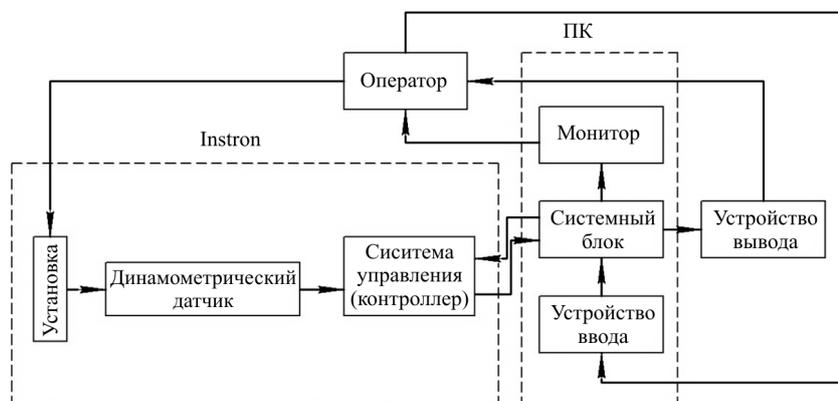


Рис. 2. Структура комплекса Instron

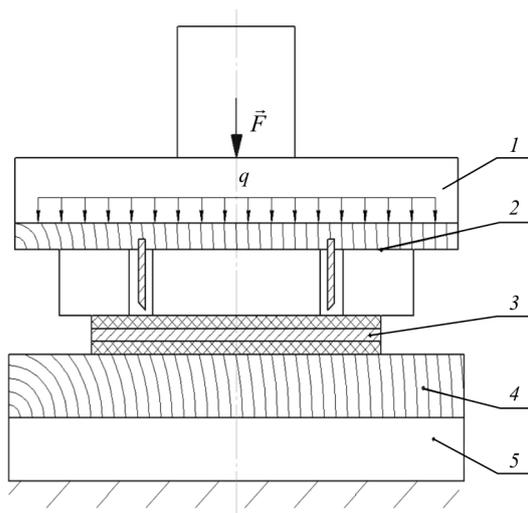


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 – плата; 2 – штанцформа; 3 – образец МГЛ-2-212; 4 – лист фанеры; 5 – плита

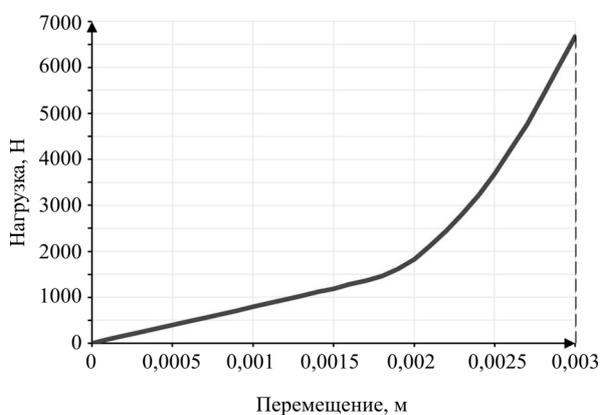


Рис. 4. Диаграмма нагружения листа МГЛ

Следует отметить, что на отдельных участках максимальные погрешности достигали 8,6 % (рис. 6, а) и 4,5 % (рис. 6, б).

Полученные результаты позволили перейти к этапу формирования математической модели динамики процесса вырубki. В качестве объекта

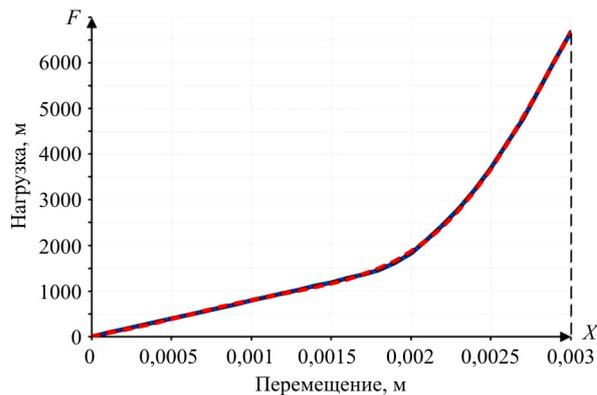
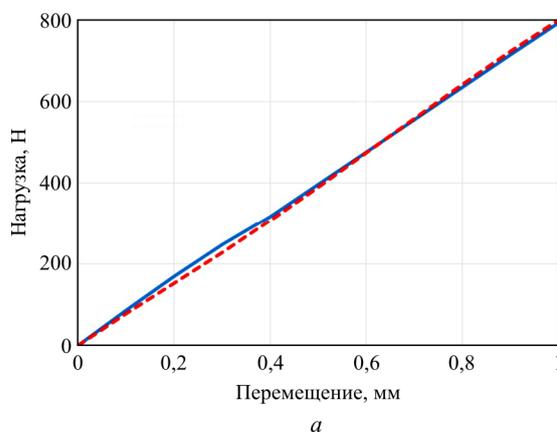


Рис. 5. Экспериментальная и теоретическая диаграммы нагружения: — экспериментальные данные; — теоретические данные

исследования выбран пресс, исполнительным органом которого является центральный кривошипно-ползунный механизм (КПМ). Его ползун, соединенный с пуансоном, непосредственно производит вырубку [5, 6, 7, 15].

До момента контакта инструмента с заготовкой при отсутствии технологической силы \bar{F} – холостой ход. Внедрение инструмента в заготовку до получения уплотнения – рабочий ход (наличие силы \bar{F}). Отвод инструмента и возвращение в первоначальное положение – холостой ход.

Расчетная схема основана на методиках, изложенных в работах [16–20]. В качестве звена приведения выбран кривошипный вал (рис. 7). При этом приняты следующие допущения:

- звенья кривошипно-ползунного механизма абсолютно жесткие;
- стол и станина прессы неподвижны;
- технологическая сила \bar{F} представлена зависимостью (1) и имеет «скачок» по окончании процесса вырубki;

Рис. 6. Сравнение диаграмм нагружения: а – первый участок; б – второй участок; — экспериментальные данные; — теоретические данные

– весь процесс вырубki соответствует установившемуся движению КПМ;

– связь кривошипного вала и шкива на валу ротора двигателя имитируется упругой связью с коэффициентами упругости C_p и сопротивления h_p , характеризующими свойства, например, ременной передачи [16, 20].

Расчетная схема процесса вырубki представлена на рис. 7.

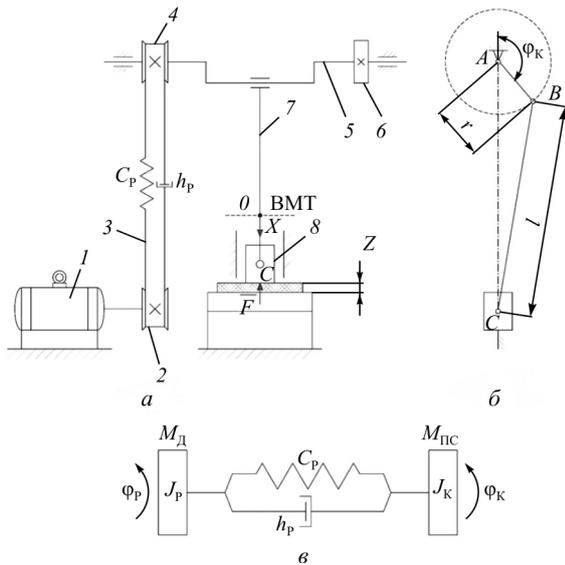


Рис. 7. Расчетная схема динамики процесса вырубki ПУТГ: а – структурная схема пресса; б – кривошипно-ползунный механизм; в – приведенная расчетная схема

Здесь приняты следующие обозначения: 1 – электродвигатель; 2 – шкив ротора двигателя; 3 – упруго-демпферная связь, имитирующая ременную передачу с приведенными коэффициентом жесткости C_p и коэффициентом сопротивления h_p ; 4 – маховик; 5 – кривошипный вал радиусом r ; 6 – противовес; 7 – шатун длиной l ; 8 – инструмент; Z – толщина заготовки, м; X – вертикальное перемещение инструмента, м.

Согласно схеме (см. рис. 7, б и в), J_p и J_k – соответственно приведенные моменты инерции ротора двигателя со шкивом на его валу и инерции кривошипа с маховиком, шатуна и ползуна с инструментом, $кг \cdot м^2$; φ_p и φ_k – соответственно приведенная обобщенная координата ротора двигателя и кривошипного вала, рад; $M_{пс}$ – приведенный момент сил от весов звеньев КПМ, технологической силы \bar{F} и момента сил трения $M_{тр}$, Н·м; M_d – приведенный момент двигателя, Н·м.

Математическая модель для расчетной схемы (см. рис. 7), учитывающая динамическую взаимосвязь между двигателем, передаточным механизмом (ременной передачей) и исполнительным органом, формируется на основе уравнений движения в дифференциальной форме [18, 20, 21]:

$$\begin{cases} J_p \ddot{\varphi}_p + C_p (\varphi_p - \varphi_k) + h_p (\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_k) = M_d; \\ J_k \ddot{\varphi}_k + \frac{1}{2} \frac{dJ_k}{d\varphi_k} \dot{\varphi}_k^2 + C_p (\varphi_k - \varphi_p) + \\ + h_p (\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_p) = M_{пс}. \end{cases} \quad (2)$$

Ряд основных параметров и вспомогательных коэффициентов системы (2) после преобразований в соответствии с расчетной схемой сведен в таблицу.

Значения параметров и вспомогательных коэффициентов

№ п/п	Коэффициент	Значение
1	J_k	$r^2 \left[m_k + m_{и} b^2 + m_{ш\text{АТ}} \left(d^2 + \frac{\cos^2 \varphi_k}{4} \right) \right] + J_k$
2	$M_{пс}$	$r(G_{и} b - G_{ш\text{АТ}} d - F b U) - M_{тр} \text{sign}(\dot{\varphi}_k)$
3	M_d	$M_{и-к}$
4	J_p	$(J_0 + J_{шк}) i_{д-к}^2$
5	b	$(1 + \lambda \cos \varphi_k) \sin \varphi_k$
6	d	$\sin \varphi_k + \frac{\lambda}{2} \cos \varphi_k$
7	k	$\lambda^2 \cos^2 \varphi_k$

В таблице J_0 и $J_{шк}$ – соответственно моменты инерции ротора двигателя и шкива на его валу, $кг \cdot м^2$; J – момент инерции маховика и противовеса, $кг \cdot м^2$; m_k , $m_{и}$ и $m_{ш\text{АТ}}$ – соответственно массы кривошипа, инструмента и шатуна, кг; M – момент двигателя, Н·м; $i_{д-к}$ – величина передаточного отношения от двигателя на кривошипный вал; $G_{и}$ и $G_{ш\text{АТ}}$ – вес инструмента и шатуна, Н; b , d , k – вспомогательные коэффициенты для проведения расчетов.

Все преобразования выполнены с учетом $\lambda = \frac{r}{l} \ll 1$ [6, 16–19].

Особенность математической модели (2) заключена в ее нелинейности и «кусочном» представлении силы F вида (1). Характер ее воздействия описывается функцией переключения:

$$U = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq X < (H - Z - \delta) \text{ и } \dot{X} > 0; \\ 1, & \text{если } (H - Z - \delta) \leq X \leq (H - \delta) \text{ и } \dot{X} > 0; \\ 0, & \text{если } (H - \delta) < X \leq H \text{ или } \dot{X} < 0. \end{cases}$$

При этом учитывался характерный для прессового оборудования недоход δ инструмента из-за конструктивных особенностей пресс-формы [5]. Здесь H – ход инструмента, $H = 2r$; X – перемещение инструмента в соответствии с выбранным

направлением, $X = r \left[1 - \cos \varphi_k + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi_k) \right]$

(см. рис. 7, а).

Для реализации дальнейших исследований динамики процесса вырубki разработан программный пакет DYNAM в системе MatLab [22, 23].

Основные этапы расчетов:

– формирование исходных данных на основе конструктивно-технологических свойств процесса с возможностью их корректировки;

– задание начальных условий;

– решение задач кинематики;

– метод Рунге – Кутты четвертого порядка [24–26];

– уточнение шага интегрирования;

– возможность вывода результатов в виде диаграмм и таблиц.

В качестве примера на рис. 8–10 приведены результаты одного из вариантов расчета вырубki на прессе КД2322 [15]. При этом толщина заготовки $Z = 3$ мм, недоход инструмента $\delta = 1$ мм, $\lambda = 0,071$, $\omega = 25$ рад/с, $H = 50$ мм.

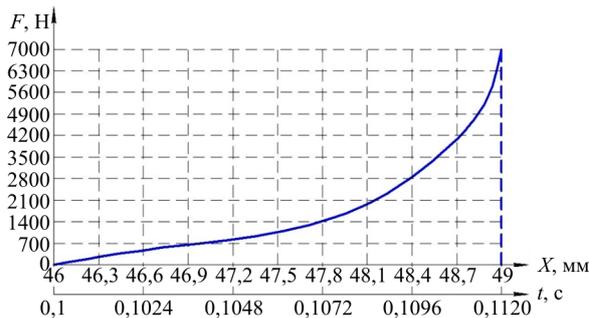


Рис. 8. Изменение технологической силы вырубki

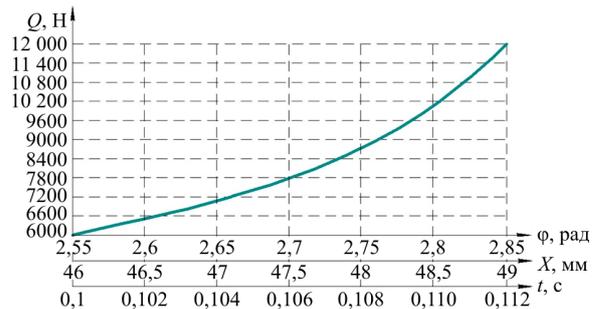


Рис. 9. Результирующие усилия вырубki

Приведенные диаграммы (см. рис. 9, 10) представляют собой зависимость нагружения Q (Н) от перемещения инструмента и угла поворота кривошипного вала при непосредственном процессе вырубki.

Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы:

– получена зависимость технологической силы \bar{F} процесса вырубki от перемещения рабочего органа, учитывающая особенности материала из ТРГ;

– предложенная математическая модель позволяет учесть взаимосвязь между особенностями обрабатываемого материала, конструктивно-технологическими и силовыми параметрами оборудования в процессе вырубki;

– математическое моделирование на основе полученных результатов позволит в дальнейшем осуществить выбор эксплуатационных параметров оборудования, обеспечивающих эффективность процесса вырубki ПУТГ.

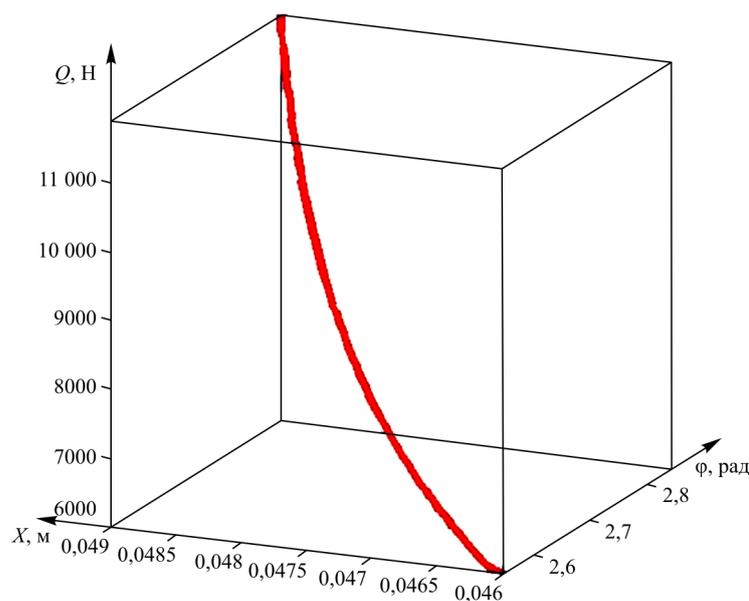


Рис. 10. Зависимость усилия вырубki от перемещения инструмента и угла поворота кривошипа

Список литературы

1. Материалы графитовые листовые (МГЛ) и прокладки из терморасширенного графита (ТРГ) [Электронный ресурс]. – URL: http://yrel77.ru/?page_id=426 (дата обращения: 02.05.2020).
2. Белова М.Ю., Исаев О.Ю., Смирнов Д.В. Разработка первого межгосударственного стандарта на материалы из терморасширенного графита // Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 85-летию со дня рождения академика В.Н. Анциферова, г. Пермь, 26–28 ноября 2018 г. – Пермь, 2018. – С. 391–394.
3. Кобитянский А.Е., Плюснина М.А. Определение ударной нагрузки при моделировании динамики процесса вырубki уплотнения из терморасширенного графита // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Пермь, 18–20 декабря 2018 г. – Пермь, 2019. – С. 250–253.
4. Караваев Д.М. Композиционные материалы на основе терморасширенного графита для эксплуатации при температурах до 500 °С: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политех. ун-та, 2016. – 16 с.
5. Бурдуковский В.Г., Инатович Ю.В. Оборудование кузнечно-штамповочных цехов. Кривошипные машины: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 168 с.
6. Кузнечно-штамповочное оборудование: учеб. для вузов / под ред. Л.И. Живова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 560 с.
7. Иванов Ю.В. Научное обоснование и реализация технических решений для улучшения виброакустических характеристик кузнечно-прессовых машин и агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.09 / ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – Ижевск, 2017. – 329 с.
8. Механические свойства композиционного материала на основе терморасширенного графита / Д.М. Караваев, А.М. Ханов, А.И. Дегтярев, Л.Е. Макарова, Д.В. Смирнов, О.Ю. Исаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1 (2). – С. 562–564.
9. Универсальная электромеханическая испытательная машина instron 3369 [Электронный ресурс]. – URL: <http://ckp.tsu.ru/about/equipment/7/21/> (дата обращения: 03.05.2020).
10. Instron introduces the newest version of bluehill software. – URL: <https://www.instron.ru/-/media/literature-library/press-releases/2010/05/bh3-press-release.pdf> (accessed 03 May 2020).
11. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 349 с.
12. Губанов В.С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. – СПб.: Наука, 1997. – 318 с.
13. Мусатов М.В., Львов А.А. Анализ моделей метода наименьших квадратов и методов получения оценок //

Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 4, № 2 (43). – С. 137–140.

14. Пономарев И.В., Славский В.В. О геометрической интерпретации метода наименьших квадратов // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – № 1-1 (73). – С. 119–121.
15. КД2322. Пресс однокривошипный простого действия открытый наклоняемый [Электронный ресурс]. – URL: http://stanki-katalog.ru/sprav_kd2322.htm (дата обращения: 24.09.2020).
16. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов / К.В. Фролов [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 2002. – 496 с.
17. Механика машин: учеб. пособие для вузов / под ред. проф. Г.А. Смирнова. – М.: Высшая школа, 1996. – 511 с.
18. Теория механизмов и машин: учеб. пособие / М.З. Коловский, А.Н. Евграфов, Ю.А. Семенов, А.В. Слоущ. – М.: Академия, 2006. – 560 с.
19. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. – М., 1979. – 576 с.
20. Зубов В.А., Лисицын В.Д. Динамика механизмов с упругими звеньями. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1971. – 168 с.
21. Коловский М.З. Динамика машин. – Л.: Машиностроение, 1989. – 262 с.
22. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
23. Ревинская О.Г. Основы программирования в MatLab: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 208 с.
24. Демченко В.В. Метод Рунге – Кутты решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка: учеб.-метод. пособие по курсу «Вычислительная математика» / МФТИ. – М., 2004. – 20 с.
25. Мышенков В.И., Мышенков Е.В. Численные методы. Ч. 2. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений: учеб. пособие для студ. спец. 073000 / МГУЛ. – М., 2005. – 109 с.
26. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения: учеб. пособие. – 5-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 400 с.

References

1. Materialy grafitovye listovye (MGL) i prokladki iz termorasshirennogo grafita (TRG) [Graphite sheet materials (MGL) and expanded graphite gaskets (RTG)]. URL: http://yrel77.ru/?page_id=426 (data available 02 May 2020).
2. Belova M.Iu., Isaev O.Iu., Smirnov D.V. Razrabotka pervogo mezhgosudarstvennogo standart na materialy iz termorasshirennogo grafita [Development of the First Interstate Standard for Thermally Expanded Graphite Materials]. *Aktual'nye problemy poroshkovogo materialovedeniia*. Perm', 2018, pp. 391–394.
3. Kobitianskii A.E., Plusnina M.A. Opredelenie udarnoi nagruzki pri modelirovanii dinamiki protsessa vyrubki uplotneniia iz termorasshirennogo grafita [Determination of the impact load when simulating the dynamics of

the thermally expanded graphite seal punching process]. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoi promyshlennosti*, 2018. Perm', 2019, pp. 250–253.

4. Karavaev D.M. Kompozitsionnye materialy na osnove termorasshirennoogo grafita dlia ekspluatatsii pri temperaturakh do 500 °S [Composite materials based on expanded graphite for operation at temperatures up to 500 °C]. PhD thesis. Perm, 2016, 16 p.

5. Burdukovskii V.G., Inatovich Iu.V. Oborudovanie kuznechno-shtampovochnykh tsekhov. Krivoshipnye mashiny [Forging and stamping shop equipment. Crank machines]. Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2018, 168 p.

6. Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie: ucheb. dlia vuzov [Forging and stamping equipment]. Ed. L.I. Zhivova. Moscow: Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006, 560 p.

7. Ivanov Iu.V. Nauchnoe obosnovanie i realizatsiia tekhnicheskikh reshenii dlia uluchsheniia vibroakusticheskikh kharakteristik kuznechno-pessovykh mashin i agregatov [Scientific rationale and implementation of technical solutions to improve the vibroacoustic characteristics of forging and pressing machines and units]. PhD theses. Izhevsk, 2017, 329 p.

8. Karavaev D.M., Khanov A.M., Degtiarev A.I., Makarova L.E., Smirnov, Isaev O.Iu. Mekhanicheskie svoistva kompozitsionnogo ma-teriala na osnove termorasshirennoogo grafita [Mechanical properties of composite material based on expanded graphite]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 1 (2), pp. 562–564.

9. Universal'naia elektromekhanicheskaia ispytatel'naia mashina instron 3369 [Universal electromechanical testing machine instron 3369]. URL: <http://ckp.tsu.ru/about/equipment/7/21/> (data available 03 May 2020).

10. Instron introduces the newest version of bluehill software. URL: <https://www.instron.ru/-/media/literature-library/press-releases/2010/05/bh3-press-release.pdf> (accessed 03 May 2020).

11. Linnik Iu.V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nabliudeni. 2nd ed. Moscow, 1962, 349 p.

12. Gubanov B.C. Obobshchennyi metod naimen'shikh kvadratov. Teoriia i primenenie v astrometrii [Generalized least squares method. Theory and application in astrometry]. Saint-Petersburg: Nauka, 1997, 318 p.

13. Musatov M.V., L'vov A.A. Analiz modelei metoda naimen'shikh kvadratov i metodov polucheniia otsenok [Analysis of Least Squares Method Models and Methods of Obtaining Estimates]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 4, no. 2 (43), pp. 137–140.

14. Ponomarev I.V., Slavskii V.V. O geometricheskoi interpretatsii metoda naimen'shikh kvadratov [On the Geometric Interpretation of the Least Squares Method]. *Izvestiia Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1-1 (73), pp. 119–121.

15. KD2322. Press odnokrivoshipnyi prostogo deistviia otkrytyi nakloniaemyi [Simple-acting single crank open tilt press]. URL: http://stanki-katalog.ru/sprav_kd2322.htm (data available 24 September 2020).

16. Frolov K.V. Teoriia mekhanizmov i mashin: ucheb. dlia vuzov [Theory of Mechanisms and Machines]. Ed. K.V. Frolova. Moscow: Vysshiaia shkola, 2002, 496 p.

17. Mekhanika mashin [Mechanics of machines]. Ed. G.A. Smirnova. Moscow: Vysshiaia shkola, 1996, 511 p.

18. Kolovskii M.Z., Evgrafov, Semenov Iu.A., Sloushch A.V. Teoriia mekhanizmov i mashin [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow: Akademiia, 2006, 560 p.

19. Levitskii N.I. Teoriia mekhanizmov i mashin [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, 1979, 576 p.

20. Zubov V.A., Lisitsyn V.D. Dinamika mekhanizmov s uprugimi zven'iami [Dynamics of mechanisms with elastic links]. Leningrad: Izdatelstvo LPI, 1971, 168 p.

21. Kolovskii M.Z. Dinamika mashin [Machine dynamics]. Leningrad: Mashinostroenie, 1989, 262 p.

22. D'iaikonov V.P. MATLAB. Polnyi samouchitel' [Complete Tutorial]. Moscow: DMK Press, 2012, 768 p.

23. Revinskaia O.G. Osnovy programmirovaniia v MatLab [Programming basics In MatLab]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2016, 208 p.

24. Demchenko V.V. Metod Runge – Kutty resheniia zadachi Koshi dlia obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii pervogo poriadka [Runge-Kutta method for solving the Cauchy problem for first-order ordinary differential equations] «Vychislitel'naia matematika». MFTI. Moscow, 2004, 20 p.

25. Myshenkov V.I., Myshenkov E.V. Chislennye metody. Ch. 2. Chislennoe reshenie obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii [Numerical Methods. Part 2: Numerical solution of ordinary differential equations]. 073000. MGUL. Moscow, 2005, 109 p.

26. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. Chislennye metody analiza. Priblizhenie funktsii, differentsial'nye i integral'nye uravneniia [Numerical methods of analysis. Approximation of functions, differential and integral equations]. Saint-Petersburg: Lan', 2010, 400 p.

Получено 29.12.2020

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Кобитянский Алексей Ефимович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: teoprakt20@mail.ru.

Белобородов Владимир Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: beloborodovvova@mail.ru.

About the authors

Aleksey E. Kobityansky (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: teoprakt20@mail.ru.

Vladimir S. Beloborodov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: beloborodovvova@mail.ru.