

УДК 621.914.1

DOI 10.18698/0536-1044-2017-8-25-31

Влияние параметров измельчения на формирование импульсов вынуждающей силы

Д.М. Козарь, П.Я. Крауиньш

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Томск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 30

The Influence of Milling Parameters on the Formation of Driving Force Impulses

D.M. Kozar, P.Y. Krauinsh

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 30

@ e-mail: kozar@tpu.ru, peterkrau@tpu.ru

i При математическом моделировании динамических процессов в технологическом оборудовании вынуждающую силу, действующую на модель, принято представлять в виде тригонометрической функции. Этот подход прост и эффективен. Впоследствии, при выполнении проектных и конструкторских работ, иногда необходимо достоверно воспроизвести рациональный режим воздействия вынуждающей силы на динамические процессы в оборудовании, найденный при моделировании. У оборудования, предназначенного для измельчения (обработки) материала шарошкой или фрезой, параметры импульсов вынуждающей силы зависят от параметров измельчения. Выполнено исследование влияния параметров измельчения на формирование импульсов вынуждающей силы путем математического моделирования кинематики движения рабочего инструмента с учетом удаления материала. Установлено, что длительность импульсов силы зависит линейно от подачи, квазилинейно от величины заглубления в измельчаемый материал и обратно пропорционально от окружной скорости рабочего инструмента, а амплитуда импульсов силы — нелинейно от подачи и линейно от величины заглубления в материал. Частота импульсов силы прямо пропорциональна окружной скорости рабочего инструмента. Зная характер этих зависимостей, можно подобрать требуемые параметры оборудования.

Ключевые слова: измельчение шарошкой, обработка материала, импульсное воздействие, параметры импульсов, параметры измельчения

i When modeling dynamic processes in technological equipment, the driving force acting on the model is customarily represented as a trigonometric function. This approach is simple and effective. Later, when carrying out design work, it is sometimes necessary to reliably reproduce the rational mode of action of the driving force obtained by simulation. In the case of equipment designed for milling or processing the material with a cutter or a mill, the parameters of driving force impulses depend on the milling parameters. In this paper, the effect of the milling parameters on the formation of driving force impulses is analyzed through mathematical modeling of the kinematics of the tool motion, taking into account the material removal. It is established that the duration of the impulses is in a linear dependence on the feed, quasilinear dependence on the depth, and is inversely proportional to the circumferential speed of the tool. The amplitude of the impulses is nonlinearly dependent on the feed and linearly dependent on the depth. The frequency of the impulses

is directly proportional to the circumferential speed of the tool. Knowing the nature of these relations, it is possible to select the required parameters of the equipment.

Keywords: milling by cutter, machining of material, impulse action, impulse parameters, milling parameters

В задачах, связанных с моделированием динамических процессов в оборудовании, вынуждающую силу (ВС), действующую на его математическую модель, как правило, задают в виде тригонометрической функции [1–3]. При измельчении материала с использованием цилиндрической шарошки или фрезы силу, импульсы которой имеют форму (рис. 1), близкую к гармонической [4–6], можно представить в виде функции

$$F = A \sin \omega \tau, \quad F \geq 0,$$

где F — текущее значение ВС, Н; A — амплитуда колебаний ВС, Н; ω — круговая частота ВС, рад/с; τ — время, с.

Такое упрощенное представление ВС в полной мере дает возможность оценить влияние параметров ее импульсного воздействия на динамические процессы в оборудовании [7–9]. Однако впоследствии (при проектировании) иногда возникает задача практической реализации заданного закона импульсного воздействия ВС в конкретном изделии. Для решения этой задачи необходимо понимание влияния параметров измельчения на формирование импульсов ВС.

Цель работы — исследование зависимости параметров импульсов ВС от режимов измельчения материала.

Методы исследований. Исследование выполнено с использованием математической модели кинематики движения рабочего инструмента (РИ) при измельчении материала [10, 11].

Текущее значение ВС рассчитывается по упрощенной формуле [12]

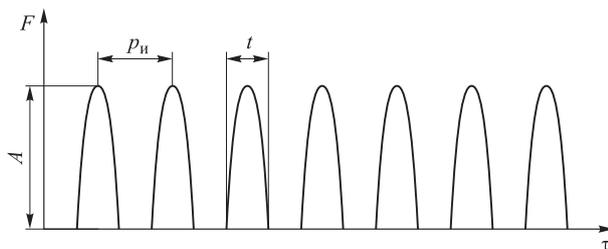


Рис. 1. Формирование импульсов ВС во времени: A и t — амплитуда и длительность импульсов; p_n — шаг между импульсами

$$F = k_s S, \quad (1)$$

где k_s — удельное значение ВС, Н/мм²; S — площадь поперечного сечения стружки, мм².

Применение формулы (1) в модели позволяет изучить, как меняются параметры импульсов ВС — частота γ , амплитуда A и длительность t , в зависимости от текущих параметров измельчения (обработки). Также следует отметить, что математическая модель учитывает удаление материала при измельчении. Материал детали и технологическая система оборудования приняты абсолютно жесткими.

Частота импульсов ВС зависит от шага между импульсами p_n и вычисляется по формуле $\gamma = 1/p_n$.

Результаты и их обсуждение. Зависимость длительности импульсов ВС от подачи на зуб показана на рис. 2, а. Моделирование выполнено при следующих входных параметрах: измельчаемый материал — резина; РИ — цилиндрическая шарошка; окружная скорость зубьев РИ $v = 5$ м/с; окружной шаг между зубьями РИ $p = 88$ мм; величина заглабления РИ в материал $h = 2$ мм; удельное значение вынуждающей силы $F_{уд} = 20$ Н/мм²; диапазон изменения подачи на зуб $s_z = 1 \dots 50$ мм/зуб.

Из рис. 2, а видно, что длительность импульсов ВС, являющаяся по сути временем контакта РИ и измельчаемого материала, растет прямо пропорционально увеличению подачи на зуб.

Поскольку окружная скорость зубьев v (м/с) и окружной шаг между ними p (м) остаются неизменными, частота импульсов ВС будет постоянной, и ее можно вычислить по формуле

$$\gamma = \frac{v}{p}. \quad (2)$$

Используя выражение (2), получим частоту импульсов вынуждающей силы $\gamma = 57$ Гц.

Зависимость амплитуды импульсов ВС от подачи на зуб показана на рис. 2, б. При изменении подачи от 1 до 23 мм/зуб амплитуда импульсов ВС стремительно растет, однако по достижении $s_z = 23$ мм/зуб ее рост прекращается, и дальнейшее увеличение подачи до $s_z = 50$ мм/зуб не оказывает заметного влияния на значение этой

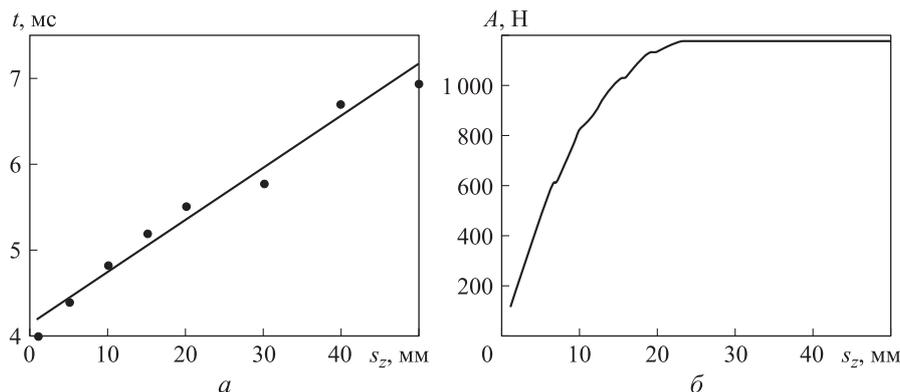


Рис. 2. Зависимости параметров импульсов ВС от подачи на зуб:
a — длительности (• — результаты моделирования; — — аппроксимирующая прямая); *б* — амплитуды

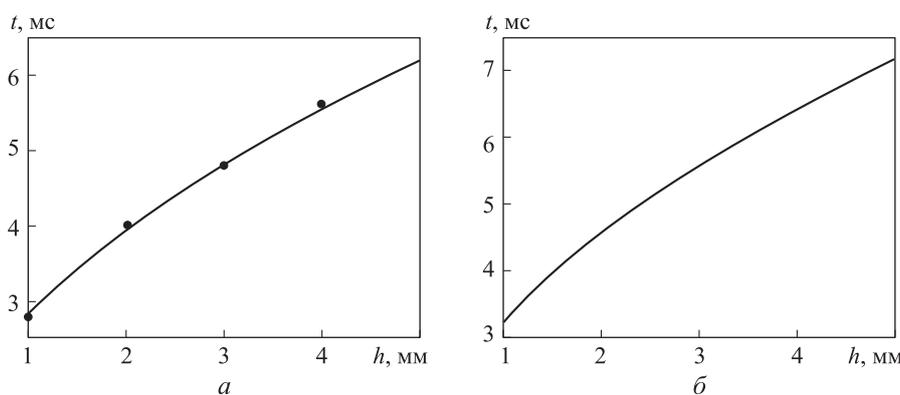


Рис. 3. Зависимости длительности импульсов ВС от величины заглабления РИ в материал, полученные разными способами:
a — моделированием кинематики движения РИ (• — результаты моделирования; — — аппроксимирующая кривая);
б — аналитически

амплитуды. В целом по характеру результат моделирования для малых подач соответствует известным данным [13–15].

Рост амплитуды ВС при увеличении подачи связан с возрастанием площади поперечного сечения S снимаемого слоя материала. При подаче $s_z = 23$ мм/зуб площадь поперечного сечения S достигает максимального значения, характерного для данной величины заглабления РИ в материал, равной 2 мм. При отсутствии изменения площади поперечного сечения снимаемого слоя материала рост амплитуды импульсов ВС прекращается, достигнув максимального значения $A = 1180$ Н.

Как видно из рис. 2, длительность импульсов ВС при возрастании подачи с 1 до 50 мм/зуб увеличилась в 1,7 раза, а амплитуда импульсов ВС — в 10 раз. Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшее влияние изменение подачи оказывает на амплитуду импульсов ВС.

Зависимость длительности импульсов ВС от величины заглабления РИ в материал, полу-

ченная моделированием кинематики движения РИ, показана на рис. 3, *a*.

Моделирование выполнено при следующих входных параметрах: измельчаемый материал — резина; РИ — цилиндрическая шарошка; $v = 5$ м/с; $p = 88$ мм; подача на зуб $s_z = 1$ мм/зуб; $F_{уд} = 20$ Н/мм²; $h = 1 \dots 5$ мм.

Из рис. 3, *a* видно, что с увеличением величины заглабления длительность импульсов ВС квазилинейно возрастает. Незначительное отклонение от линейности связано с тем, что длина пути, который проходит кромка РИ, находясь в контакте с измельчаемым материалом, также нелинейно растет с увеличением величины заглабления РИ.

Длительность импульсов ВС можно определить и аналитически по формуле

$$t = \frac{L}{v}, \tag{3}$$

где L — длина пути, который проходит кромка зуба при измельчении, м.

При обработке плоской поверхности длину пути можно приближенно вычислить по выражению

$$L = \theta R, \quad (4)$$

где θ — угол дуги, вдоль которой проходит кромка зуба при измельчении, рад; R — наружный радиус РИ, мм.

Угол раскрытия дуги имеет вид

$$\theta = \arcsin\left(\frac{|x_1 y_2 - y_1 x_2|}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}}\right), \quad (5)$$

где x_1, y_1 — координаты точки входа зуба РИ в материал относительно его центра РИ, мм; x_2, y_2 — координаты точки выхода зуба РИ из материала относительно центра РИ, мм.

В выражении (5):

$$x_1 = \frac{s_z}{2}; \quad x_2 = R\sqrt{1 - \left(\frac{h-R}{R}\right)^2};$$

$$y_1 = R\sqrt{1 - \left(\frac{s_z}{2R}\right)^2}; \quad y_2 = h - R.$$

Зависимость длительности импульсов ВС от величины заглабления РИ в материал, полученная аналитически с помощью формул (3)–(5), приведена на рис. 3, б. Как видно, графики на рис. 3, а и б оказались достаточно близкими, хотя и имеют незначительное расхождение в пределах 16...17%. График, полученный моделированием кинематики РИ, более точен. В выражениях (4) и (5) было принято допущение, что форма траектории — окружность, в то время как в действительности — трохоида.

Зависимость амплитуды импульсов ВС от величины заглабления РИ в материал показана на рис. 4.

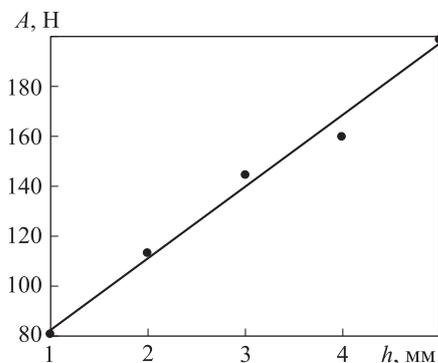


Рис. 4. Зависимость амплитуды импульсов ВС от величины заглабления РИ в материал (• — результаты моделирования; — — аппроксимирующая прямая)

С увеличением величины заглабления амплитуда импульсов ВС линейно повышается, так как с ростом величины заглабления линейно увеличивается площадь поперечного сечения снимаемого слоя материала, от которой и зависит текущее значение ВС. Полученная линейная зависимость также соответствует известным фактам [13–15].

Как видно из рис. 3 и 4, длительность импульсов ВС при возрастании величины заглабления с 1 до 5 мм повысилась в 2,2 раза, а амплитуда ВС — в 2,5 раза. Поэтому можно принять, что с увеличением величины заглабления длительность и амплитуда импульсов ВС растут в равных долях.

Однако этот вывод является верным лишь для указанного материала — резины, поскольку в соответствии с формулой (1) текущее значение ВС зависит от удельного значения ВС и толщины поперечного сечения срезаемого слоя материала. Для другого материала, например, для стали, удельное значение ВС составляет 2...4 кН/мм [12]. Соответственно при обработке стали РИ амплитуда ВС будет расти намного быстрее, чем длительность импульсов ВС при увеличении величины заглабления. Длительность импульсов ВС никак не зависит от свойств материала и будет оставаться неизменной для заданных значений величины заглабления и подачи.

Зависимость длительности импульсов ВС от окружной скорости зубьев РИ показана на рис. 5, а.

График построен при следующих входных параметрах: измельчаемый материал — резина; РИ — цилиндрическая шарошка; $v = 1...10$ м/с; $s_z = 1$ мм/зуб; $p = 88$ мм; $h = 2$ мм; $F_{уд} = 20$ Н/мм².

Увеличение окружной скорости зубьев приводит к уменьшению длительности контакта между РИ и деталью, следовательно, снижается и длительность импульсов ВС, что соответствует графику, приведенному на рис. 1. Длительность импульсов падает обратно пропорционально изменению скорости: $t = 0,284/v$ мс.

Зависимость частоты импульсов ВС от окружной скорости зубьев РИ показана на рис. 5, б. Частота импульсов ВС увеличивается прямо пропорционально росту окружной скорости зубьев, что хорошо согласуется с формулой (2).

Влияние окружной скорости на амплитуду импульсов ВС не исследовалось, так как теку-

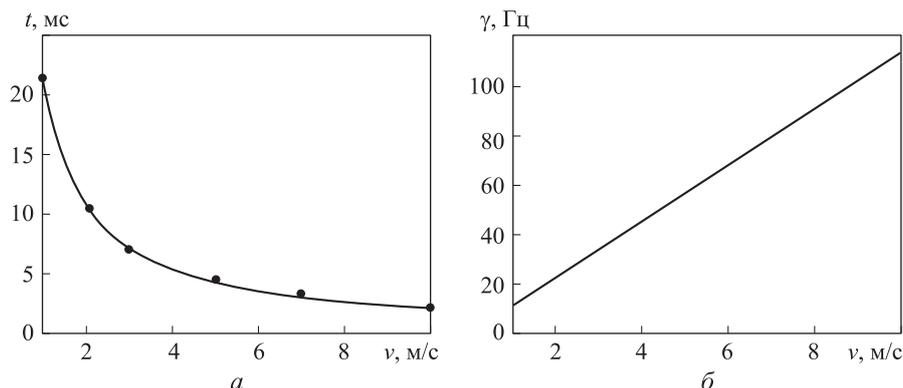


Рис. 5. Зависимости параметров импульсов ВС от окружной скорости зубьев РИ: а — длительности (• — результаты моделирования; — — аппроксимирующая кривая); б — частоты

ший вариант математической модели эту зависимость не учитывает. Также необходимо отметить, что для неодинаковых материалов эта зависимость будет совершенно разной, и выполнять подобное исследование имеет смысл лишь для конкретного материала с учетом его марки и химического состава.

Полученные графики не универсальны и зависят от размеров РИ и числа зубьев, расположенных по дуге окружности РИ. Для всех представленных зависимостей диаметр РИ был принят равным 280 мм, а число зубьев, расположенных по дуге окружности, — 10.

Выводы

1. По результатам исследования с использованием математической модели измельчения материала цилиндрической шарошкой установлено, что подача на зуб оказывает суще-

ственное влияние на амплитуду импульсов ВС и незначительное — на их длительность.

2. Рост величины заглупления РИ при обработке материала приводит к квазилинейному увеличению длительности импульсов ВС. Амплитуда импульсов ВС линейно зависит от величины заглупления, однако при этом на нее оказывает значительное влияние удельное значение ВС, характерное для данного материала. В связи с этим нельзя однозначно определить, на какой из двух параметров величина заглупления оказывает наибольшее влияние.

3. Изменение частоты импульсов ВС прямо пропорционально зависит от окружной скорости зубьев РИ, а длительность этих импульсов — обратно пропорционально.

4. Понимание этих зависимостей позволяет связать конкретные режимы измельчения материала с формируемыми при этом процессе параметрами импульсов ВС.

Литература

- [1] Гаврилин А.Н. Моделирование динамических процессов при механической обработке. *Фундаментальные исследования. Технические науки*, 2015, № 2, с. 4403–4407.
- [2] Василевич Ю.В., Довнар С.С., Трусковский А.С., Шумский И.И. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно-расточного станка с моностойкой. *Наука и техника*, 2015, № 3, с. 9–19.
- [3] Литвичук А.Ю., Филиппов Ю.А. Моделирование динамики работы специализированного фрезерного станка. *Решетневские чтения. Матер. XIV Междунар. науч. конф.*, Красноярск, 10–12 ноября 2010 г., Красноярск, Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, 2010, т. 1, № 14, с. 322–323.
- [4] Балла О.М. Определение составляющих сил резания при фрезеровании методом полунатурного моделирования. *Вестник ИрГТУ*, 2016, т. 20, № 11, с. 10–23.
- [5] Заварзин Д.А., Киселев И.А., Цыганов Д.Л. Моделирование процесса плоского фрезерования с учетом зависимости динамических характеристик станка. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2016, № 4, с. 53–68. URL: <http://maplantsjournal.ru/doc/845919.html> (дата обращения 1 марта 2017).
- [6] Волосова М.А., Гурин В.Д., Селезнев А.Е. Моделирование силовых параметров при торцевом фрезеровании закаленной стали инструментом с керамической режущей частью. *Вестник МГТУ «Станкин»*, 2015, № 4, с. 30–35.

- [7] Елисеев А.В., Сельвинский В.В., Елисеев С.В. *Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неустойчивых связей*. Новосибирск, Наука, 2015. 332 с.
- [8] Орликов М.Л. *Динамика станков*. Киев, Вища школа, 1980. 272 с.
- [9] Утенков В.М., Чернянский П.М., Борисов С.Н., Г.Н. Васильев, Вереина Л.И., Иванов В.С., Иванов Д.В., Москвин В.К., Николаева Н.С., Никулин Ю.В., Скиба В.М., Ягопольский А.Г. *Проектирование автоматизированных станков и комплексов*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2012. 331 с.
- [10] Козарь Д.М., Крауиньш П.Я. Кинематика и динамика формирования сил резания при фрезеровании упругой оболочки. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 4, с. 287–308. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/541767.html> (дата обращения 15 марта 2017).
- [11] Козарь Д.М., Крауиньш П.Я. Математическая модель станка для утилизации автомобильных покрышек фрезерованием. *Проблемы механики современных машин. Матер. V Междунар. конф., Улан-Удэ, 25–30 июня 2012, Улан-Удэ, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления*, 2012, т. 1, с. 213–216.
- [12] Шпур Г., Штеферле Т. *Справочник по технологии резания материалов*. В 2 кн. Москва, Машиностроение, 1985. Кн. 1, 616 с., Кн. 2, 688 с.
- [13] Маношин Д.В., Насад Т.Г. Влияние режима резания на окружную силу P_z при обработке прецизионного сплава 36ННТУУ. *Вестник СГТУ*, 2011, № 3, вып. 2, с. 95–97.
- [14] Трусов В.Н., Законов О.И., Шикин В.В. Повышение эффективности обработки высокопрочной стали 30 ХГСН2ФА на основе минимума энергозатрат. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2012, № 3, с. 162–166.
- [15] Жилиев С.В., Кутультинов Д.С. Экспериментальные исследования силы резания при точении титанового сплава ВТ6. *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашикова*, 2011, № 3, с. 15–17.

References

- [1] Gavrilin A.N. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov pri mekhanicheskoi obrabotke [Simulation of the dynamic processes during mechanical tooling]. *Fundamental'nye issledovaniia* [Fundamental research]. 2015, no. 2, pp. 4403–4407.
- [2] Vasilevich Iu.V., Dovnar S.S., Truskovskii A.S., Shumskii I.I. Modelirovanie i analiz dinamiki nesushchei sistemy frezerno-sverlil'no-rastochnogo stanka s monostoikoi [Modeling and analysis of dynamics in bearing system of drilling, milling and boring machine with monostationary]. *Nauka i tekhnika* [Science and Technique]. 2015, no. 3, pp. 9–19.
- [3] Litvichuk A.Iu., Filippov Iu.A. Modelirovanie dinamiki raboty spetsializirovannogo frezernogo stanka [Modeling the dynamics of a specialised milling machine]. *Reshetnevskie chteniia. Mater. 14 Mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnevskie reading. Proceedings of 14 International scientific conference]. Krasnoyarsk, 10–12 November 2010, Krasnoyarsk, Sibirskii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet im. akad. M.F. Reshetneva publ., 2010, vol. 1, no. 14, pp. 322–323.
- [4] Balla O.M. Opredelenie sostavliaiushchikh sil rezaniia pri frezerovanii metodom polunaturalnogo modelirovaniia [In-line simulation-based determination of cutting force components at milling]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, vol. 20, no.11, pp. 10–23.
- [5] Zavarzin D.A., Kiselev I.A., Tsyganov D.L. Modelirovanie protsessa ploskogo frezerovaniia s uchetom zavisimosti dinamicheskikh kharakteristik stanka [Flat Milling Process Simulation Taking into Consideration a Dependence of Dynamic Characteristics of the Machine]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiia* [Machines and Plants: Design and Exploiting]. 2016, no. 4, pp. 53–68. Available at: <http://maplantsjournal.ru/doc/845919.html> (accessed 1 March 2017).
- [6] Volosova M.A., Gurin V.D., Seleznev A.E. Modelirovanie silovykh parametrov pri tortsevom frezerovanii zakalenoii stali instrumentom s keramicheskoi rezhushchei chast'iu [Force parameters modeling for face milling of hardened steel by tool with ceramic insert]. *Vestnik MGTU «Stankin»* [Vestnik MSTU «Stankin»]. 2015, no. 4, pp. 30–35.

- [7] Eliseev A.V., Sel'vinskii V.V., Eliseev S.V. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeistvii elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom ne-uderzhivaiushchikh svyazi* [The dynamics of a vibratory interaction of elements of technological systems subject to unilateral constraints relations]. Novosibirsk, Nauka publ., 2015. 332 p.
- [8] Orlikov M.L. *Dinamika stankov* [Dynamics of machines]. Kiev, Vishcha shkola publ., 1980. 272 p.
- [9] Utenkov V.M., Chernianskii P.M., Borisov S.N., G.N. Vasil'ev, Vereina L.I., Ivanov V.S., Ivanov D.V., Moskvina V.K., Nikolaeva N.S., Nikulin Iu.V., Skiba V.M., Iagopol'skii A.G. *Proektirovanie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov* [Design of automated machines and complexes]. In 2 vol. Vol. 1. Moscow, Bauman Press, 2012. 331 p.
- [10] Kozar' D.M., Krauin'sh P.Ia. Kinematika i dinamika formirovaniia sil rezaniia pri frezerovanii uprugoi obolochki [Kinematics and dynamics of formation of cutting forces during milling of an elastic shell]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2013, no. 4, pp. 287–308. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/541767.html> (accessed 15 March 2017).
- [11] Kozar' D.M., Krauin'sh P.Ia. Matematicheskaia model' stanka dlia utilizatsii avtomobil'nykh pokryshek frezerovaniem [A mathematical model of a machine for tyre recycling milling]. *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin: materialy 5 Mezhdunarodnoi konferentsii* [Problems of mechanics of modern machines: materials of the 5 International conference]. Ulan-Ude, 25–30 June 2012, Ulan-Ude, Vostochno-Sibirskii gosudarstvennyi universitet tekhnologii i upravleniia publ., 2012, vol. 1, pp. 213–216.
- [12] Shpur G., Shteflerle T. *Spravochnik po tekhnologii rezaniia materialov* [Handbook of technology of cutting of materials]. In 2 vol. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. Vol. 1, 616 p., vol. 2, 688 p.
- [13] Manoshin D.V., Nasad T.G. Vliianie rezhima rezaniia na okruzhnuiu silu P_z pri obrabotke pretsizionnogo splava 36NKhTlu [Influence of the mode of cutting on force P_z at processing of the precision alloy 36NHTYU]. *Vestnik SGTU* [Vestnik Saratov State Technical University]. 2011, no. 3, is. 2, pp. 95–97.
- [14] Trusov V.N., Zakonov O.I., Shikin V.V. Povyshenie effektivnosti obrabotki vysokoprochnoi stali 30 KhGSN2FA na osnove minimuma energozatrat [Increase treatment high strength steels 30HGSN2FA based on a minimum of energy consumption]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara university. Aerospace and mechanical engineering]. 2012, no. 3, pp. 162–166.
- [15] Zhiliaev S.V., Kugul'tinov D.S. Eksperimental'nye issledovaniia sily rezaniia pri tochenii titanovogo splava VT6 [Experimental Research of Cutting Force in a Process of Turning of Titanium Alloys WT6 (Ti-Al-V-6)]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU]. 2011, no. 3, pp. 15–17.

Статья поступила в редакцию 17.04.2017

Информация об авторах

КОЗАРЬ Дмитрий Михайлович (Томск) — ассистент кафедры «Технологии машиностроения и промышленной робототехники». Национальный исследовательский Томский политехнический университет (634050, Томск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 30, e-mail: kozar@tpu.ru).

КРАУИНЬШ Петр Янович (Томск) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии машиностроения и промышленной робототехники». Национальный исследовательский Томский политехнический университет (634050, Томск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 30, e-mail: peterkrau@tpu.ru).

Information about the authors

KOZAR Dmitriy Mikhailovich (Tomsk) — Teaching Assistant, Department of Technologies of Mechanical Engineering and Industrial Robotics. National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 30, e-mail: kozar@tpu.ru).

KRAUINSH Pyotr Yanovich (Tomsk) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Mechanical Engineering and Industrial Robotics. National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 30, e-mail: peterkrau@tpu.ru).