

обработки проволочным электродом и согласуется с экспериментальными исследованиями анодных процессов растворения модифицированного слоя. Сравнение экспериментальных и расчетных данных позволяет уточнить численные значения коэффициентов электрохимического растворения поверхностных слоев стали, полученных при различных технологических условиях электроэрозионной обработки. Результаты способствуют расширению внедрения на практике комбинированной технологии последовательного применения электроэрозионной и электрохимической обработок проволочным электродом.

Ключевые слова: электрохимическая размерная обработка, проволочный электрод, электроэрозионная вырезная обработка, коэффициент электрохимического растворения.

V.I. Osipenko, A.P. Plakhotny, A.Yu. Denisenko. **Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode.** The wire electro discharge machining (WEDM) process produces surfaces that require some kind of finishing operation. The precision electrochemical machining is one of techniques used mainly to improve the steels' appearance. It is also desirable to remove the white uppermost recast layer (produced by the WEDM process) so as to improve the surface functional performance. The paper develops a mathematical model for wire electrochemical machining and employs this model in the experimental validation of the modified layer anodic dissolution processes. The effected comparison of experimental and calculated data for the first time allows specifying the numerical values of the electrochemical dissolution rate as to surface layers of steel obtained under different conditions of electrical discharge machining. The results obtained contribute to the extended practical implementation of the combined technologies when wire electro discharge and wire electrochemical machining consecutively applied

Keywords: precision electrochemical machining, wire electrode, wire electrical discharge machining, rate of electrochemical dissolution.

Reviewer Dr. techn. sciences, Prof. of Odesa nat. polytechnic univ. Suryaninov N.G.

Received May 5, 2014

УДК 621.924.06.-229.331

А.В. Усов, д-р техн. наук, проф.,
А.А. Якимов, канд. техн. наук, доц.,
Одес. нац. политехн. ун-т

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ КУСОЧНО-ПОСТОЯННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Введение. Физико-механические свойства поверхностного слоя шлифованных деталей в значительной степени определяют долговечность их работы. Поверхностный слой обрабатываемой детали в процессе шлифования подвергается тепловому воздействию, приводящему к изменению его физико-механического состояния. Для снижения температуры при шлифовании успешно применяются прерывистые круги [1]. Однако прерываемость процесса резания может способствовать развитию значительных колебаний упругой системы станка, приводящих к формированию волнистости обрабатываемой поверхности. Периодичность изменения контакта круга с деталью при прерывистом шлифовании приводит к периодическому изменению жесткости упругой системы станка. В связи с этим возникла необходимость выявить условия, приводящие к параметрической неустойчивости станка при прерывистом шлифовании.

DOI: 10.15276/opu.1.43.2014.11

© А.В. Усов, А.А. Якимов, 2014

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования параметрической устойчивости упругой системы станков приведены во многих работах [2...8]. Однако в современной технической литературе недостаточно изучена динамика шлифования кругами, рабочая поверхность которых состоит из чередующихся выступов и впадин.

Цель работы заключается в исследованиях, направленных на выявление связи параметрической неустойчивости упругой системы станка с геометрическими параметрами макрорельефа рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга.

Изложение основного материала. Шлифование кругами с прерывистой рабочей поверхностью сопровождается чередованием замкнутых и незамкнутых состояний динамической системы. В условиях прерывистого шлифования изменение жесткости осуществляется по периодическому кусочно-постоянному закону.

Жесткость динамической системы на отрезке времени, соответствующем ее замкнутому состоянию, равна

$$C_0 + C_0 \left(\frac{t_n}{t_\phi} - 1 \right) / 2,$$

а при разомкнутом состоянии динамической системы

$$C_0 - C_0 \left(\frac{t_n}{t_\phi} - 1 \right) / 2,$$

где t_n , t_ϕ — глубина резания, установленная по лимбу, и фактическая глубина резания, соответственно;

C_0 — жесткость системы (рис. 1, а).

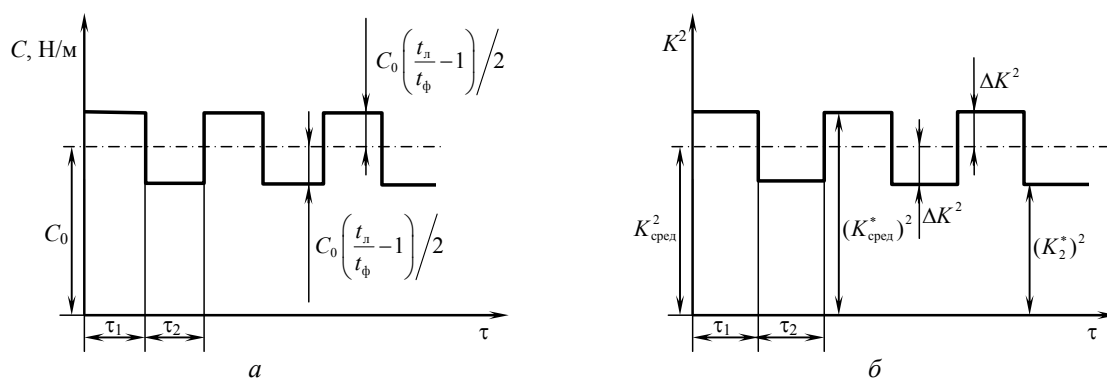


Рис. 1. Изменение параметродинамической системы при прерывистом шлифовании

Движения одномассовой системы по оси Y , направленной перпендикулярно обрабатываемой поверхности, описываются двумя дифференциальными уравнениями:

— в период контакта режущего выступа τ_1 шлифовального круга с обрабатываемой деталью

$$m\ddot{y}_1 + b\dot{y}_1 + C_0 y_1 = -\frac{K_0}{2} y_1; \quad (1)$$

— в период разрыва процесса резания τ_2

$$m\ddot{y}_2 + b\dot{y}_2 + C_0 y_2 = \frac{K_0}{2} y_2, \quad (2)$$

где $K_0 = C_0 \cdot \left(\frac{t_n}{t_\phi} - 1 \right)$ — жесткость резания, $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$;

$b = 2 \cdot h \cdot m$ — приведенный коэффициент сопротивления, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}}$;

m — приведенная масса, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$;

h — величина, характеризующая затухание колебаний во времени, $\frac{1}{\text{с}}$.

Дифференциальные уравнения движения одномассовой системы (1) и (2) можно представить в виде (рис. 1, б)

$$\ddot{y}_1 + b\dot{y}_1 + k_{\text{сред}}^2 y_1 = -\Delta k^2 y_1,$$

$$\ddot{y}_2 + b\dot{y}_2 + k_{\text{сред}}^2 y_2 = \Delta k^2 y_2,$$

где $k_{\text{сред}}^2 = \frac{C_0}{m}$ — квадрат собственной частоты;

$$\Delta k^2 = \frac{K_0}{2} \cdot \frac{1}{m}.$$

Обозначив $\mu = \frac{\Delta k^2}{k_{\text{сред}}^2}$,

$$\ddot{y}_1 + b\dot{y}_1 + k_{\text{сред}}^2 (1 + \mu) y_1 = 0, \quad (3)$$

$$\ddot{y}_2 + b\dot{y}_2 + k_{\text{сред}}^2 (1 - \mu) y_2 = 0. \quad (4)$$

Дифференциальные уравнения (3) и (4) с постоянными коэффициентами имеют решения

$$y_1 = C_1 e^{-h \cdot \tau} \sin k_1 \cdot \tau + D_1 e^{-h \cdot \tau} \cos k_1 \cdot \tau, \quad (5)$$

$$y_2 = C_2 e^{-h \cdot \tau} \sin k_2 \cdot \tau + D_2 e^{-h \cdot \tau} \cos k_2 \cdot \tau,$$

где $k_1^2 = k_{\text{сред}}^2 + \Delta k^2 - h^2$;

$$k_2^2 = k_{\text{сред}}^2 - \Delta k^2 - h^2;$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{C_0}{m} + \frac{C_0 \left(\frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right)}{2} \frac{1}{m} - h^2};$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{C_0}{m} - \frac{C_0 \left(\frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right)}{2} \frac{1}{m} - h^2}.$$

В решениях (5) содержатся четыре постоянные C_1, D_1, C_2, D_2 , для определения которых необходимы четыре условия. Два условия относятся к моменту времени τ_1 , общему как для времени работы режущего выступа, так и для времени разрыва резания.

В указанный момент должно быть

$$\begin{aligned} y_1(\tau_1) &= y_2(\tau_1), \\ \dot{y}_1(\tau_1) &= \dot{y}_2(\tau_1). \end{aligned} \quad (6)$$

Запишем еще два условия для момента времени $(\tau_1 + \tau_2)$

$$\begin{aligned} \lambda y_1(0) &= y_2(\tau_1 + \tau_2), \\ \lambda \dot{y}_1(0) &= \dot{y}_2(\tau_1 + \tau_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Если $|\lambda| > 1$, то колебания в каждом следующем периоде усиливаются, а если $|\lambda| < 1$, то они постепенно затухают.

После подстановки решений (5) в условия (6) и (7) решения системы однородных уравнений относительно постоянных C_1, D_1, C_2, D_2 и разворачивания определителя, составленного из ее коэффициентов, характеристическое уравнение имеет вид

$$\lambda^2 - 2L\lambda + M = 0, \quad (8)$$

где
$$L = \frac{e^{-h(\tau_1 + \tau_2)}}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)} [k_1^2 \sin k_1 \tau_1 \sin k_2 \tau_2 - 2k_1 k_2 \cos k_2 \tau_1 \cos k_1 \tau_1 \cos k_2 (\tau_1 + \tau_2) - k_2^2 \sin k_1 \tau_1 \sin(2k_2 \tau_1 + k_2 \tau_2)];$$

$$M = \frac{k_1 k_2 e^{-2h(\tau_1 + \tau_2)} \cos[2(k_2 (\tau_1 + \tau_2))]}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)};$$

$$\tau_1 = \frac{l_1}{V_{kp}};$$

$$\tau_2 = \frac{l_2}{V_{kp}};$$

$$l_1 = \frac{\pi D_{kp}}{n(1+N)};$$

$$l_2 = \frac{\pi D_{kp}}{n \left(1 + \frac{1}{N}\right)};$$

$$N = \frac{l_2}{l_1};$$

l_1 — длина выступа;

l_2 — ширина впадины;

n — количество режущих выступов на шлифовальном круге;

D_{kp} — диаметр круга;

V_{kp} — скорость круга.

Корни характеристического уравнения (8)

$$\lambda_{1,2} = L \pm \sqrt{L^2 - M}.$$

Условие неустойчивости упругой системы станка

$$|L| > \frac{1+M}{2}. \quad (9)$$

Результаты. С использованием пакета прикладных программ MAPLE-9.5 произведены расчеты на предмет проверки соблюдения условия (9). Результаты расчетов представляют собой графические зависимости левой и правой частей условия неустойчивости (9) от количества прорезей n на шлифовальном круге и от отношения N длин впадин к длинам выступов.

Эти зависимости показаны на рис.2. Они выглядят в виде поверхностей, одна из которых плоская, а другая — волнообразная. Линии взаимного пересечения этих поверхностей являются границами областей параметрической неустойчивости упругой системы шлифовального станка.

Расчеты проводились для данных [8], приведенных в таблице.

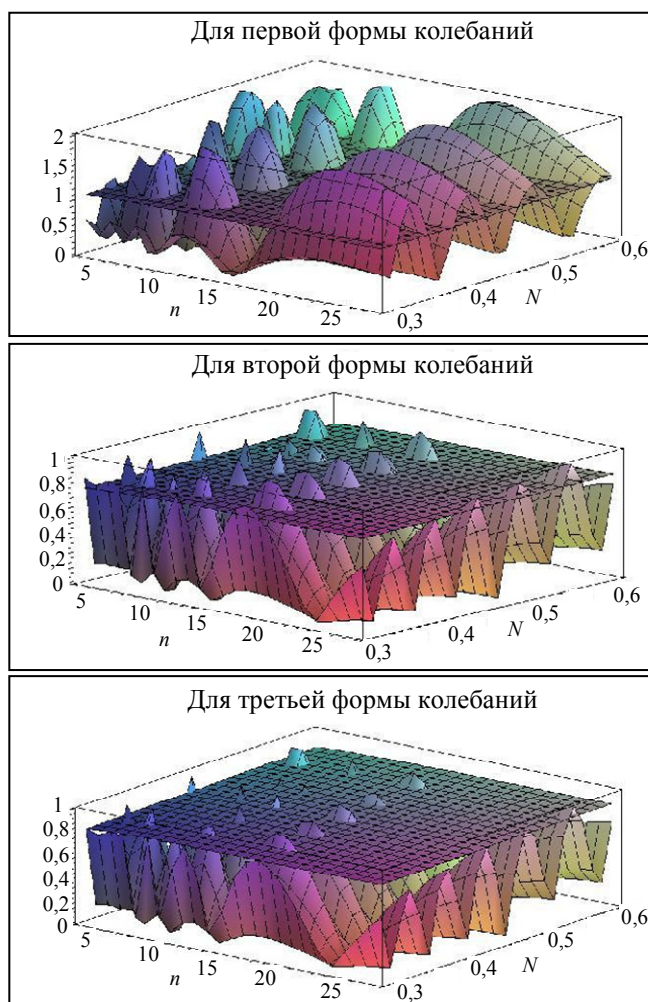


Рис. 2. Области параметрической неустойчивости упругой системы станка, рассчитанные для каждой нормальной формы колебаний

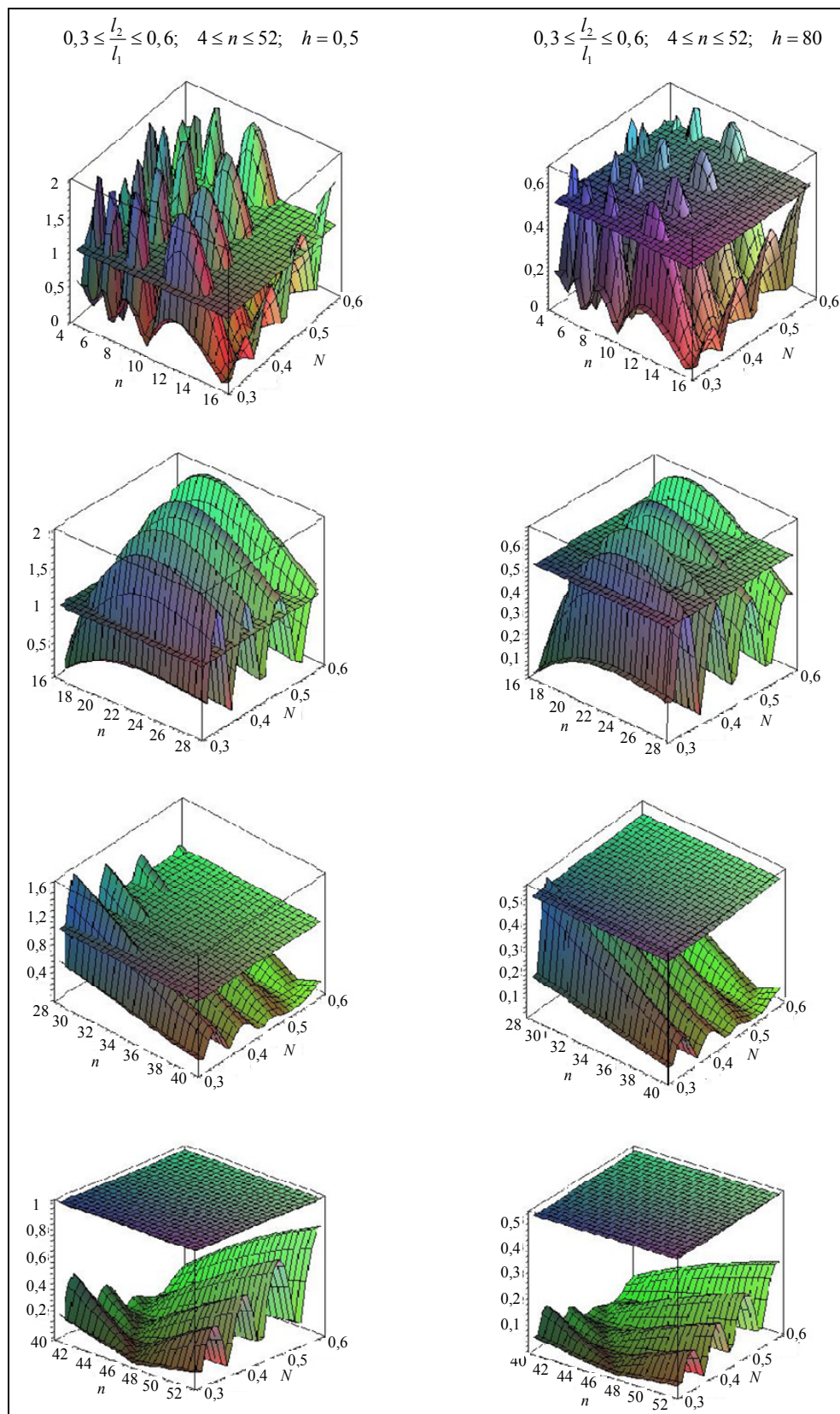


Рис. 3. Влияние демпфирования на параметрическую устойчивость упругой системы станка

*Динамические характеристики трех нормальных форм спектра колебаний
упругой системы плоскошлифовального станка 3Г71М*

Частота собственных колебаний $k_{\text{сред.}}, 1/\text{с}$	Приведенная жесткость системы $C, \text{Н/м}$	Приведенная масса $m, \text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}$	Приведенный коэффициент сопротивления $b, \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}$	Логарифмический декремент колебаний λ	Величина, характеризующая затухание колебаний во времени $h, 1/\text{с}$
165	$5 \cdot 10^5$	18,26	142,50	0,15	3,90
354	$5,4 \cdot 10^5$	4,30	62,23	0,13	7,24
540	$9,7 \cdot 10^5$	3,35	48,74	0,08	7,27

Для выявления влияния демпфирования на параметрическую устойчивость упругой системы плоскошлифовального станка в условиях прерывистого шлифования были произведены соответствующие расчеты (рис. 3).

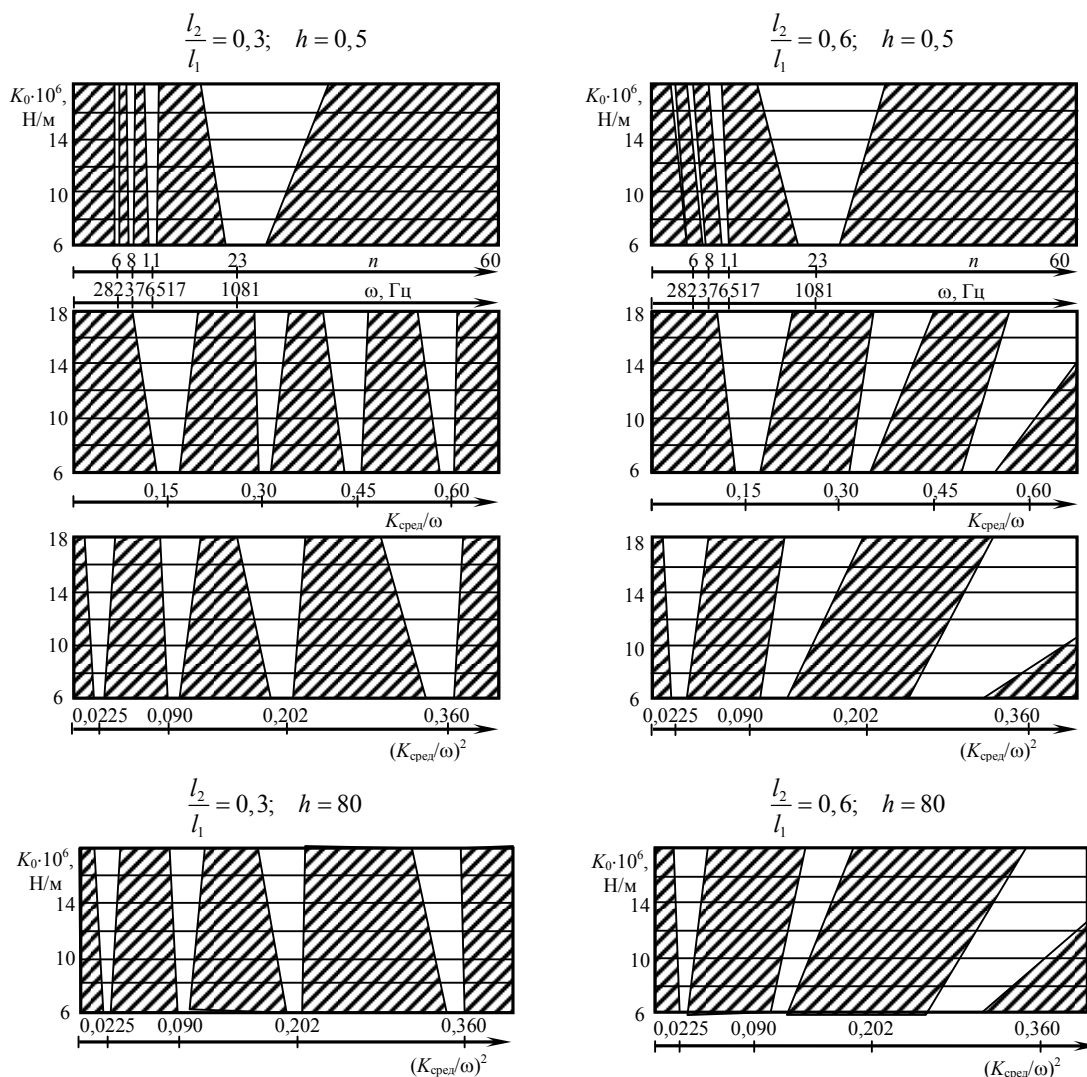


Рис. 4. Области, соответствующие устойчивым состояниям упругой системы станка МААГ (мод.3Г71М)

Из рисунка 3 видно, что увеличение параметра h , характеризующего затухание колебаний во времени, приводит к опусканию плоской поверхности, характеризующей левую часть неравенства (9), и уменьшению высоты волнообразной поверхности, характеризующей правую часть условия неустойчивости (9). Уменьшение высоты волнообразной поверхности происходит более интенсивно по сравнению со снижением уровня плоской поверхности. Это приводит к сужению границ областей неустойчивой работы упругой системы станка.

На рис. 4 приведены графики областей неустойчивости, построенные в плоской системе координат, где за абсциссы приняты число режущих выступов на шлифовальном круге n и отношение частоты собственных колебаний $k_{\text{сред}}$ к частоте параметрического возбуждения ω , а за ординаты — жесткость резания K_0 . Заштрихованы области устойчивости. Графики построены для двух значений коэффициента прерывистости $N = \frac{l_2}{l_1}$ и для двух значений параметра h , характеризующего степень затухания колебаний во времени.

Из рисунка 4 видно, что на положение области устойчивости существенно влияют коэффициент прерывистости $N = \frac{l_2}{l_1}$ и жесткость резания K_0 . С увеличением жесткости резания области неустойчивости расширяются, а увеличение коэффициента прерывистости смещает их вправо — в сторону меньших значений частот возмущения ω . Увеличение параметра h , приводит к сужению областей неустойчивости. Меньше всего рост демпфирования влияет на границы первой области неустойчивости.

Выводы:

- определено условие возникновения параметрического резонанса в упругой системе станка при шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью;
- выявлено влияние геометрических параметров рабочей поверхности прерывистого круга, жесткости резания и демпфирования на устойчивость упругой системы шлифовального станка;
- установлено влияние демпфирования на параметрическую устойчивость упругой системы шлифовального станка;
- определены области параметрической неустойчивости упругой системы станка для каждой нормальной формы колебаний.

Литература

1. Лищенко, Н.В. Определение температуры прерывистого шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.В. Якимов // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2012. — Вип. 2(39). — С. 80 — 85.
2. Оргиян, А.А. Колебания и устойчивость упругих систем обточных, копировальных станков / А.А. Оргиян // Високі технології в машинобудуванні. — 2000. — Вип. 1(3). — С. 184 — 190.
3. Оргиян, А.А. Условие параметрической неустойчивости замкнутой динамической системы расточного станка / А.А. Оргиян // Резание и инструмент в технологических системах. — 2006. — Вип. 70. — С. 362 — 369.
4. Оргіян, О.А. Параметричні коливання при механічній обробці деталей / О.А. Оргіян, О.І. Бажанов, А.М. Бензар // Тр. 15-й Междунар. науч.-техн. конф. "Физические и компьютерные технологии", 2-3 декабря 2009 г. — 2009. — С. 40 — 46.
5. Оргіян, О.А. Обработка перерывчатых поверхностей на расточивальных верстаках / О.А. Оргіян, О.І. Бажанов, А.М. Бензар // Вісн. Харківськ. нац. технічн. ун-у сільського господарства ім. П. Василенка. — 2009. — Вип. 81 — С. 253 — 257.
6. Линчевский, П.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П.А. Линчевский, Т.Г. Джугурян, А.А. Оргиян. — К.: Техника, 2001. — 300 с.
7. Линчевский, П.А. Тонкое растачивание отверстий с прерывистой поверхностью / П.А. Линчевский, А.А. Оргиян, С.М. Онищенко // Тр. 11-й междунар. науч.-техн. конф. "Физические и компьютерные технологии", 2-3 июня 2005 г. — 2005. — С. 48 — 52.

8. Свирщев, В.И. Повышение эффективности процессов шлифования за счет их динамической стабилизации / В.И. Свирщев // Прогрессивные процессы и оборудование механической обработки деталей авиационной техники. — 1984. — С. 26 — 32.

References

1. Lishchenko, N.V. Opredelenie temperatury preryvistogo shlifovaniya [Determining the temperature of intermittent grinding] / N.V. Lishchenko, V.P. Larshyn, A.V. Yakimov // Pr. Odes. Politekhn. un-tu [Proc. Odesa polytech. Univ.] — 2012. — Iss. 2(39). — pp. 80 — 85.
2. Orgiyan, A.A. Kolebaniya i ustoychivost' uprugikh sistem obtochnykh, kopiroval'nykh stankov [Vibrations and stability of elastic systems of turning copying machines] / A.A. Orgiyan // Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni [High Technology in Mechanical Engineering]. — 2000. — Iss. 1(3)/ — pp. 184 — 190.
3. Orgiyan, A.A. Uslovie parametricheskoy neustoychivosti zamknutoy dinamicheskoy sistemy rastochnoy stanka [Parametric instability condition of a of the closed dynamical system of the boring machine] / A.A. Orgiyan // Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. [Cutting and Tools in Technological Systems]. — 2006. — Iss. 70. — pp. 362 — 369.
4. Orhiian, O.A. Parametrychni kolyvannia pry mekhanichnii obrobtsti detalei [Parametric vibrations during machining parts] / O.A. Orhiian, O.I. Bazhanov, A.M. Benzar // Tr. 15-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii", 2–3 dekabrya 2009 g. [Proc. of the 15th Intern. scientific and engineering. conf. "Physical and computer technology", 2–3 December, 2009] — 2009. — pp. 40 — 46.
5. Orhiian, O.A. Obrobka pereryvchastykh poverkhon na roztochuvalnykh verstatakh [Processing of discontinuous surfaces on boring machines] / O.A. Orhiian, O.I. Bazhanov, A.M. Benzar // Visn. Kharkivsk. nats. tekhnichn. un-u silskoho hospodarstva im. P. Vasylenka. [Bull. of Kharkov Nat. Tech. Univ. of Agriculture named after P. Vasylenko] — 2009. — Iss. 81 — pp. 253 — 257.
6. Linchevskiy, P.A. Obrabotka detaley na odelochno-rastochnykh stankakh [Machining parts on finishing and boring machines] / P.A. Linchevskiy, T.G. Dzhuguryan, A.A. Orgiyan. — Kyiv, 2001. — 300 p.
7. Linchevskiy, P.A. Tonkoe rastachivaniye otverstiy s preryvistoy poverkhnost'yu [Fine boring of holes with a discontinuous surface] / P.A. Linchevskiy, A.A. Orgiyan, S.M. Onishchenko // Tr. 15-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii", 2–3 iyunya 2005 g. [Proc. of the 15th Intern. scientific and engineering. conf. "Physical and computer technology", 2–3 June, 2005]. — 2005. — pp. 48 — 52.
8. Svirshchev, V.I. Povyshenie effektivnosti protsessov shlifovaniya za schet ikh dinamicheskoy stabilizatsii [Improving the efficiency of grinding processes due to their dynamic stabilization] / V.I. Svirshchev // Progressivnye protsessy i oborudovanie mekhanicheskoy obrabotki detaley aviatsionnoy tekhniki [Progressive processes and equipment for mechanical machining of parts of aeronautical engineering]. — 1984. — pp. 26 — 32.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

А.В. Усов, О.О. Якимов. Параметричні резонанси, що виникають при кусочно-постійному збудженні пружної системи шліфувального верстата. Метою роботи є виявлення зв'язку параметричної нестійкості пружної системи верстата з геометричними параметрами робочої поверхні переривчастого шліфувального круга, до яких відносяться кількість виступів на абразивному інструменті і коефіцієнт уривчастості, який чисельно дорівнює відношенню ширини западини до довжини ріжучого виступу. Вивчено динаміку шліфування кругами з переривчастими робочими поверхнями і виявлено умови виникнення параметричних резонансів. Встановлено, що при збільшенні жорсткості різання межі областей нестійкості пружної системи верстата розширюються. Це означає, що для виникнення параметричного резонансу при переривчастому шліфуванні необхідна деяка, досить велика, відносна глибина пульсації жорсткості пружної системи.

Ключові слова: переривчасте шліфування, параметричний резонанс, пружна система верстата, умови нестійкості.

А.В. Усов, А.А. Якимов. Параметрические резонансы, возникающие при кусочно-постоянном возбуждении упругой системы шлифовального станка. Целью работы является выявление связи параметрической неустойчивости упругой системы станка с геометрическими параметрами рабочей поверхности прерывистого шлифовального круга, к числу которых относятся количество выступов на абразивном инструменте и коэффициент прерывистости, численно равный отношению ширины впадины к длине режущего выступа. Изучена динамика шлифования кругами с прерывистыми рабочими поверхностями и выявлены условия возникновения параметрических резонансов. Уста-

новлено, что при увеличении жесткости резания границы областей неустойчивости упругой системы станка расширяются. Это означает, что для возникновения параметрического резонанса при прерывистом шлифовании необходима некоторая, достаточно большая, относительная глубина пульсации жесткости упругой системы.

Ключевые слова: прерывистое шлифование, параметрический резонанс, упругая система станка, условие неустойчивости.

A.V. Usov, A.A. Yakimov. Parametric resonances arising from the piecewise constant excitation of elastic system of the grinding machine. The aim of the research is to identify communication parametric stability of elastic system of the machine with the geometrical parameters of the working surface of the grinding wheel intermittent, which include the number of projections on abrasive tool and discontinuity factor numerically equal to the ratio of the width to the length of the depression cutting projection. The dynamics of grinding wheels with intermittent work surfaces and identified conditions of parametric resonance. Found that increasing the rigidity of cutting the boundaries of the elastic instability of the machine are expanding. This means that for the occurrence of parametric resonance with intermittent grinding must be a large enough relative depth ripple elastic stiffness of the system.

Keywords: intermittent grinding, parametric resonance, elastic machine system, the condition of instability.

Рецензент д-р. техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Лебедев В.Г.

Поступила в редакцию 15 апреля 2014 г.

УДК 539.3: 622.245.42

І.П. Шацький, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,
Ів.-Франків. відділ Ін-ту прикл. проблем механіки
і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України,
Я.С. Білецький, канд. техн. наук, доц.,
І.І. Витвицький, магістр,
Ів.-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу

ДВОБІЧНІ ОЦІНКИ ЖОРСТКОСТІ І МІЦНОСТІ ЦЕНТРАТОРА ОБСАДНОЇ КОЛОНИ

Вступ. Незважаючи на широкий спектр інженерних рішень, спрямованих на підвищення надійності кріплення свердловин, проблема центрування обсадної колони на сьогодні залишається актуальною для нафтогазової галузі, особливо у зв'язку із зростаючими обсягами скерованого та горизонтального буріння. Обладнання колони центрувальними пристроями покликане сприяти її рівновіддаленості від стінок свердловини і тим самим підвищувати якість цементування затрубного простору задля покращення герметичності труби та усунення міжпластових перетоків газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш уживаними у практиці буріння вертикальних та похило спрямованих свердловин є типові [1] та новітні [2] конструкції пружних стержневих центраторів "ліхтарного" типу. Виборі конкретних варіантів конструкцій та стратегії розстановки центраторів по довжині колони у свердловині заданого профілю повинен передувати аналіз їхніх жорсткісних та міцнісних характеристик на базі науково обґрунтованої методики розрахунку.

Мета дослідження. У статті розглядаються теоретичні аспекти моделювання взаємодії центрувальних пристроїв обсадної труби зі стінкою свердловини. Метою роботи є розробка ін-

DOI: 10.15276/oru.1.43.2014.12

© І.П. Шацький, Я.С. Білецький, І.І. Витвицький, 2014