

Моделирование динамики вибрационного сверления с контролем дробления стружки по размаху колебаний

© И.И. Плещеев, С.А. Воронов, И.И. Иванов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Одной из важных задач при обработке глубоких отверстий является дробление образующейся стружки. Его можно обеспечить с помощью вибропатрона — специального приспособления, работающего по автоколебательному принципу. Однако дробление стружки с помощью вибропатронов возможно только при определенных технологических параметрах, что сдерживает их применение. В данной статье предложен алгоритм адаптивного управления динамикой вибрационного сверления по размаху колебаний для поддержания дробления стружки. Приведена математическая модель сверления с вибропатроном, учитывающая нелинейную зависимость силы резания от толщины срезаемого слоя и возможность выхода режущей кромки из материала. Для проверки эффективности предложенного алгоритма адаптации выполнены расчеты в широком диапазоне варьируемых параметров обработки. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность предложенной стратегии для дробления стружки.

Ключевые слова: *вибрационное сверление, дробление стружки, регенеративный эффект, автоколебания, управление вибрациями, обратная связь*

Введение. Удаление стружки из зоны резания — одна из основных проблем, сдерживающих повышение производительности при обработке глубоких отверстий. Особенно важно обеспечить отвод стружки при обработке пластичных, жаропрочных материалов, когда образуется сливная стружка. Для ее удаления требуется большое давление смазочно-охлаждающей жидкости, специальные станки для глубокого сверления. Сливная стружка забивает каналы отвода стружки, что может приводить к повышению температуры в зоне резания, царапанию поверхности отверстия и повреждению инструмента. Эффективным способом решения данной проблемы является вибрационное сверление, которое позволяет надежно дробить стружку и удалять ее из зоны резания.

Для вибрационного сверления применяют вибропатроны. Вибропатрон — устройство, в котором передача осевого усилия резания осуществляется через дополнительный встроенный упругий элемент, позволяющий подвижной части патрона со сверлом совершать осевые колебания. На рис. 1 приведена схема сверления с использованием вибропатрона. Параметры упругого элемента подбирают таким

образом, чтобы возбуждались осевые вибрации в зоне резания, обеспечивающие надежное дробление стружки. Автоколебания при резании поддерживаются за счет механизма регенеративного возбуждения, который подробно описан в книге [1].

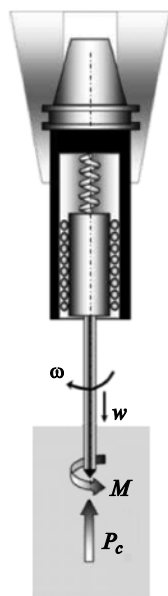


Рис. 1. Схема конструкции вибропатрона и динамическая модель сверления [3]:

M — крутящий момент сил резания; P_c — осевая сила резания; ω — частота вращения сверла; w — подача

Основной недостаток использования вибропатрона связан с тем, что конкретная комбинация параметров его конструкции позволяет надежно дробить стружку только при определенных сочетаниях параметров обработки, свойств обрабатываемого материала и геометрических характеристик режущей кромки. Поэтому автоколебательный механизм самовозбуждения целесообразно дополнять малым внешним возбуждением, задаваемым, например, посредством пьезоактуатора, встроенного в конструкцию вибропатрона [2]. Управляющее воздействие определяется в контуре обратной связи на основе снимаемого в режиме реального времени сигнала сил резания или ускорений подвижной части вибропатрона.

Цель данной работы — предложить модификацию стратегии управления по размаху колебаний, изложенной в работах [3–5], и провести исследование эффективности этой стратегии с помощью численного моделирования.

Обзор литературы. Вопросам вибраций при резании и вибрационному сверлению в частности посвящено много публикаций. В работах [6–8] проведено математическое моделирование осевых колебаний инструмента с учетом режимов обработки (частота вращения, подача) и свойств обрабатываемого материала с целью рационального выбора параметров вибропатрона (жесткость упругого элемента, масса подвижной части). При моделировании особое внимание уделяют моделям сил резания [9–12]. Также при достаточно больших амплитудах вибраций инструмента учитывают взаимодействие по задней поверхности, приводящее к дополнительному износу инструмента [13, 14].

Важной проблемой является моделирование колебаний сверла с учетом его крутильной и изгибной податливостей. Моделирование связанных продольно-крутильных колебаний сверла проведено в статье [15], изгибных, осевых и крутильных — в работе [16]. Подход к построению полной динамической модели шпинделя и инструмента приведен в работе [17]. В последнее время активно используют конечно-элементные методы для моделирования динамики вибрационного сверления [18, 19].

Как было сказано выше, для повышения эффективности использования вибропатрона следует задавать малое внешнее воздействие. В [20, 21] приведены примеры исследования динамического поведения инструмента с учетом малого гармонического возбуждения, но в моделях отсутствует обратная связь. В работе [22] предложена стратегия управления вибрациями сверла с контролем коэффициента непрерывности резания, однако не проведены исследования, подтверждающие эффективность предлагаемого способа управления для широкого диапазона условий резания. Подробное теоретическое и экспериментальное исследование динамики вибрационного сверления с различными вариантами управления выполнено [23]. В данной работе развиты алгоритмы управления, изложенные в [3, 4], представлен алгоритм адаптивного управления по размаху колебаний [5], эффективность которого доказана расчетно и экспериментально. В то же время дробление стружки зависит не только от амплитуды колебаний, но и от фазовых соотношений между колебаниями режущих кромок инструмента во время последовательных проходов по участку обрабатываемой поверхности. Расчетная методика вычисления целевого размаха колебаний, обеспечивающего заданные условия дробления стружки, предложена в [23]. Однако по этой методике необходимо пересчитывать целевое значение размаха колебаний для каждого режима обработки, что представляет некоторое неудобство. В настоящей статье предлагается усовершенствованный алгоритм управления, позволяющий отказаться от указанной методики и назначать цель управления независимо от режима обработки.

Расчетная схема и уравнения динамики системы. На рис. 2 приведена расчетная схема сверления с использованием автоколебательного вибропатрона. Подвижная часть вибропатрона с инструментом может совершать колебания только в осевом направлении. Будем считать сверло абсолютно жестким телом. Тогда для определения положения инструмента достаточно в каждый момент времени задать его координату $x(t)$. Через $s(t)$ обозначим координату поверхности непосредственно перед срезом в момент времени t . Пусть движение подачи a задается детали. На первом проходе режущих кромок зададим координату $s(t)$ как $s(t) = at/T$ при $t \in [0; T]$, где T — период прохождения режущих кромок, который определяется через круговую частоту вращения

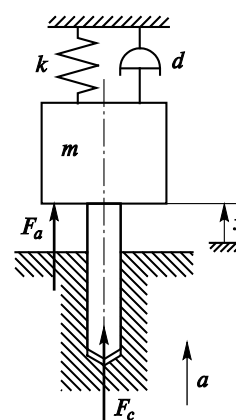


Рис. 2. Расчетная схема модели с вибропатроном в случае силового возбуждения [3]

инструмента ω как $T = 2\pi/(z\omega)$ (z — количество режущих кромок). При этом режущая часть инструмента полностью находится в заготовке.

Запишем дифференциальное уравнение движения:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F_c + F_a,$$

где m — масса инструмента с подвижной частью вибропатрона, кг; d — коэффициент, учитывающий рассеяние энергии, Н·с/м; k — жесткость упругого элемента, Н/м; F_c — осевая составляющая сил резания, Н; F_a — сила управляющего воздействия, Н.

Представим силу резания в виде показательной функции:

$$F_c = K_c h^r,$$

где K_c и r — экспериментальные коэффициенты, зависящие от геометрии режущей части и от обрабатываемого материала; h — толщина сечения срезаемого слоя, которая во всех точках режущей кромки одинакова (рис. 3):

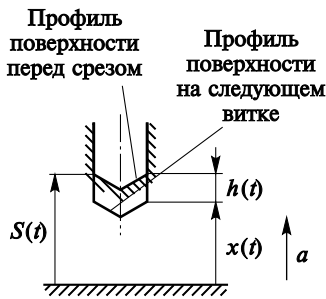


Рис. 3. Зона резания [3]

$$h(t) = (s(t) - x(t))H(s(t) - x(t)).$$

Здесь $H(\dots)$ — функция Хэвисайда.

Уравнение поверхности резания на следующем витке:

$$s(t + T) = s(t) + a - h(t).$$

Запишем систему уравнений:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F_c + F_a; \quad (1)$$

$$F_c = K_c h^r; \quad (2)$$

$$h(t) = (s(t) - x(t))H(s(t) - x(t)); \quad (3)$$

$$s(t + T) = s(t) + a - h(t). \quad (4)$$

Приведем уравнения (1–4) к безразмерному виду. Для этого введем обозначения:

$$t = \frac{\tau}{p}, \quad p = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad u = \frac{x}{a}, \quad \eta = \frac{h}{a}, \quad \Lambda = \frac{s}{a},$$

$$\zeta = \frac{d}{2\sqrt{mk}}, \quad P_c = \frac{F_c}{ka}, \quad P_a = \frac{F_a}{ka}, \quad \tilde{K}_c = \frac{K_c}{ka^{1-r}}, \quad \tilde{p} = \frac{2\pi}{z\omega} p.$$

Тогда уравнения (1)–(4) примут вид:

$$\ddot{u} + 2\zeta\dot{u} + u = P_c + P_a; \quad (5)$$

$$P_c = \tilde{K}_c \eta^r; \quad (6)$$

$$\eta(\tau) = (\Lambda(\tau) - u(\tau)) H(\Lambda(\tau) - u(\tau)); \quad (7)$$

$$\Lambda(\tau + \tilde{p}) = \Lambda(\tau) + 1 - \eta(\tau). \quad (8)$$

Полученная система уравнений — нелинейная с запаздывающим аргументом, входящим в конечные соотношения. Она решается численно на дискретной сетке с постоянным шагом $\Delta\tau$: $\tau_j = j\Delta\tau$, $j = 1, 2, \dots, N$. В настоящей работе для интегрирования системы применен метод трапеций с итеративным уточнением вектора состояния в конце шага. Точность итеративного цикла принята равной $\varepsilon = 0,0001$, время моделирования — $N = 600$.

Система управления. Положим силу возбуждения актуатора P_a пропорциональной скорости движения подвижной части вибропатрона \dot{u} :

$$P_a = b\dot{u},$$

где b — коэффициент обратной связи по скорости.

Коэффициент b является адаптируемой величиной. Положительное значение b соответствует подпитке системы энергией, а отрицательное — диссипации.

Для автоматической настройки параметра b в систему управления вносится контур адаптации, в котором и вычисляется его значение (рис. 4).

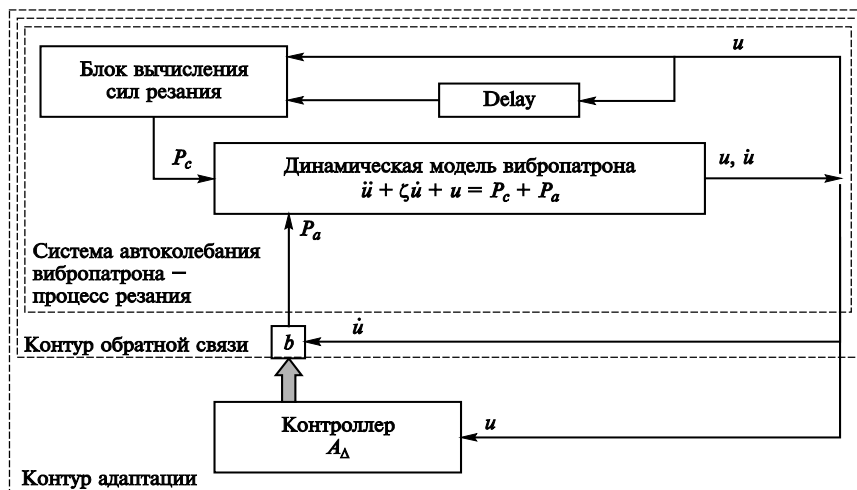


Рис. 4. Общая схема взаимодействия адаптивной системы управления и системы «автоколебания вибропатрона — процесс резания»

Целью управления является обеспечение дробления стружки, которое возможно, если толщина стружки периодически достигает нуля. Согласно уравнению (7), это будет происходить, если: $\Lambda(\tau) - u(\tau) < 0$. Предположив, что на предыдущем проходе режущей кромки толщина $\eta(\tau)$ была ненулевой, то из уравнений (7) и (8) получим:

$$\Lambda(\tau) - u(\tau) = 1 + u(\tau - \tilde{p}) - u(\tau) < 0.$$

Таким образом, для дробления стружки определяющей является величина $u(\tau) - u(\tau - \tilde{p})$, которую обозначим Δ . Тогда цель управления будет в том, чтобы параметр Δ имел размах, превышающий подачу на режущую кромку [1]. Данный подход отличается от стратегии управления в работе [5] тем, что учитывает перемещение режущей кромки на предыдущем витке.

Далее представлен алгоритм адаптации по размаху величины Δ . На стадии нарастания колебаний необходима оценка темпа роста размаха Δ . При автоколебаниях экспоненциально возрастает размах перемещений, а следовательно, и размах Δ . Тогда в качестве меры темпа роста размаха Δ можно ввести характеристику

$$\lambda = \frac{1}{\tau_c} \ln \frac{A_\Delta(\tau)}{A_\Delta(\tau - \tau_c)},$$

где τ_c — время между корректировками; $A_\Delta(t)$ — оценка размаха величины Δ на интервале $[\tau - \tau_c, \tau]$.

Однако темп роста размаха колебаний, вычисленный описанным способом, будет обусловлен подводом (или отводом) энергии не только за счет сил резания и неупругих взаимодействий в вибропатроне, но и за счет управляющего воздействия. Чтобы исключить последнее, выпишем уравнение динамики (5) и положим в нем силу резания равной нулю. Так как полученное уравнение будет линейным, оно справедливо и для величины Δ :

$$\ddot{\Delta} + 2(\zeta - b)\dot{\Delta} + \Delta = 0.$$

Решение этого уравнения $\Delta = A_0 \exp(-n\tau) \cos(\omega\tau + \psi)$, где $n = \zeta - b$, $p = \sqrt{1 - n^2}$, A_0 , ψ — константы, зависящие от начальных условий. Тогда $A_\Delta(\tau) = A_0 \exp(-n\tau)$ и $\lambda = b - \zeta$.

Для оценки темпа роста размаха величины Δ , обусловленной только силами резания и взаимодействиями в вибропатроне, параметр λ определим следующим образом:

$$\lambda = \frac{1}{\tau_c} \ln \frac{A_\Delta(\tau)}{A_\Delta(\tau - \tau_c)} - b. \quad (9)$$

Рассчитав λ , можно найти новое значение коэффициента адаптации

$$b^* = \frac{1}{\tau_{ar}} \ln \frac{A_{\Delta 0}}{A_{\Delta}(\tau)} - \lambda, \quad (10)$$

где τ_{ar} — желаемое время выхода на колебательный режим с заданным размахом Δ ; $A_{\Delta 0}$ — целевое значение размаха Δ .

Когда размах A_{Δ} находится в некоторой окрестности $A_{\Delta 0}$, т. е.

$$A_{\Delta} \in [g_1 A_{\Delta 0}, g_2 A_{\Delta 0}] \quad (11)$$

(здесь g_1, g_2 — коэффициенты, характеризующие близость к желаемому размаху), имеет смысл использовать линейный закон адаптации

$$\dot{b} = c(A_{\Delta 0} - A_{\Delta}) \quad (12)$$

или, в конечно-разностном виде,

$$b_{i+1} = b_i + c(A_{\Delta 0} - A_{\Delta})\tau_c. \quad (13)$$

Полный алгоритм адаптации приведен на рис. 5.

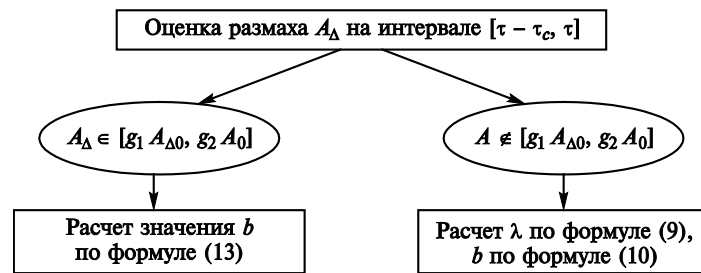


Рис. 5. Алгоритм адаптации параметра b по размаху A_{Δ}

Результаты моделирования. Для численного тестирования работы системы управления вибрационного сверления было проведено моделирование при различных значениях \tilde{K} и \tilde{p} . Для моделирования выбраны следующие параметры: $r = 1,0$; $\xi = 0,1$.

Коэффициенты для управления:

$$\begin{aligned} A_{\Delta 0} &= 1,05a; & g_1 &= 0,8; & \tau_{cor} &= 1,4T, \\ c &= 0,005ak; & g_2 &= 1,2; & \tau_{ar} &= 4\tau_{cor}, \end{aligned}$$

где T — период прохождения режущих кромок.

Основными результатами моделирования динамики инструмента являются зависимости перемещений и сил резания во времени. Однако для исследования влияния параметров обработки на колебания

следует ввести интегральные характеристики колебаний. В качестве таких характеристик были предложены амплитуды установившихся колебаний и коэффициент непрерывности резания ψ :

$$\psi = \frac{1}{\tau_1} \int_{\tau-\tau_1}^{\tau} H(P_c) dt.$$

Для сравнения приведем решение с управлением и без него. Положим параметр $\tilde{K} = 0,2$ и будем варьировать безразмерный параметр \tilde{p} в интервале $[1,0; 3,0]$ с шагом $\Delta\tilde{p} = 0,04$.

Рассмотрим несколько временных реализаций процесса и сравним их с управлением и без него.

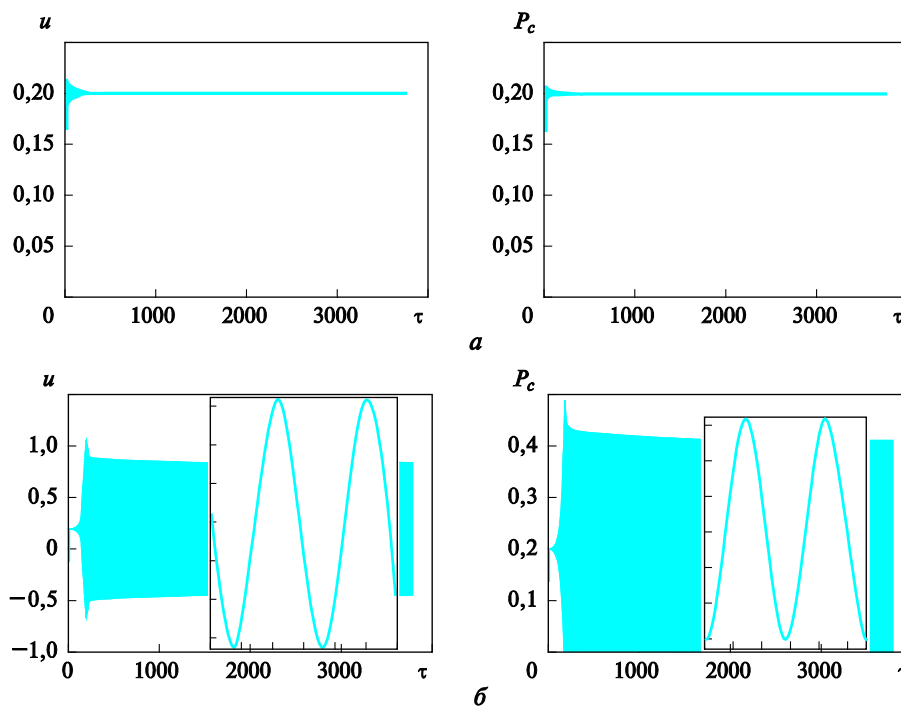


Рис. 6. Временные реализации перемещений u и силы резания P_c для $\tilde{K} = 0,2$ при $\tilde{p} = 1,5$:
 a — без управления; b — с управлением

Согласно рис. 6, при отсутствии управления колебания не возбуждаются и стружка не дробится. Добавление управления позволяет возбудить колебания, достаточные для дробления стружки.

Как видно на рис. 7, при отсутствии управления возбуждаются колебания и стружка дробится. Однако добавление управления поз-

воляет уменьшить колебания инструмента при сохранении дробления стружки, что уменьшает его износ.

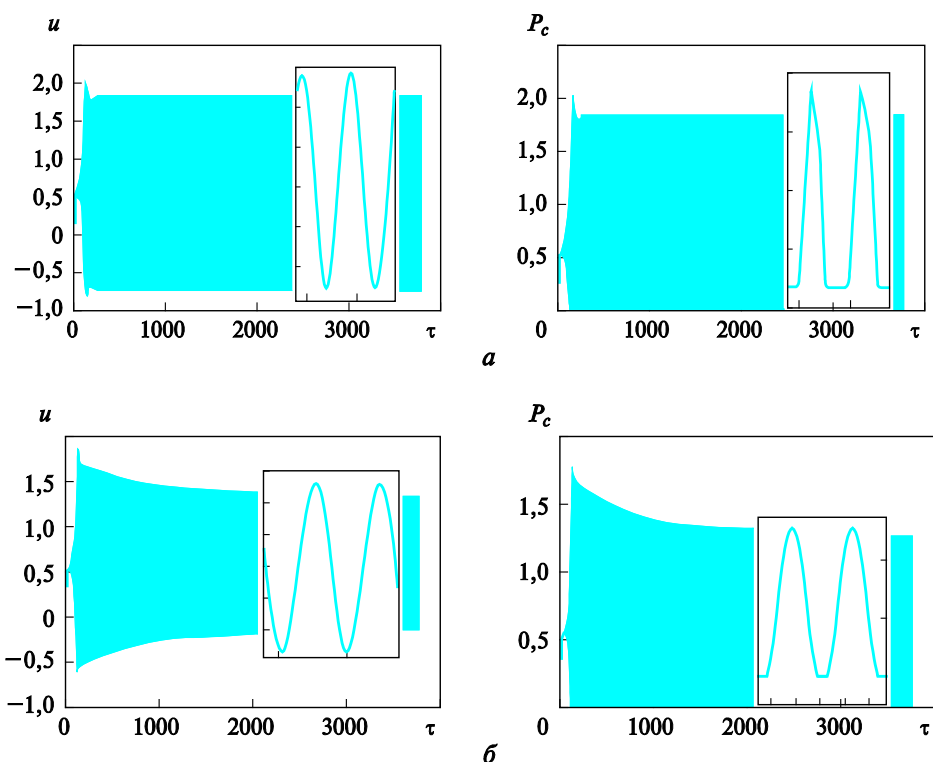


Рис. 7. Временные реализации перемещений u и силы резания P_c

для значений $\tilde{K} = 0,6$ при $\tilde{p} = 2,1$:

a — без управления; b — с управлением

По данным на рис. 8 видно, что без управления на этом диапазоне параметров режимов резания не происходит дробления стружки и колебания не возбуждаются, в то время как с управлением стружка дробится в широком диапазоне значений параметра \tilde{p} .

Теперь положим $\tilde{K} = 0,6$ и будем варьировать параметр \tilde{p} в интервале $[1,0; 3,0]$ с шагом $\Delta\tilde{p} = 0,04$ (рис. 9). При таких параметрах стружка дробится в обоих случаях: с управлением и без управления. В случае с управлением амплитуды колебаний подвижной части вибропатрона ниже, что приводит к меньшему износу инструмента.

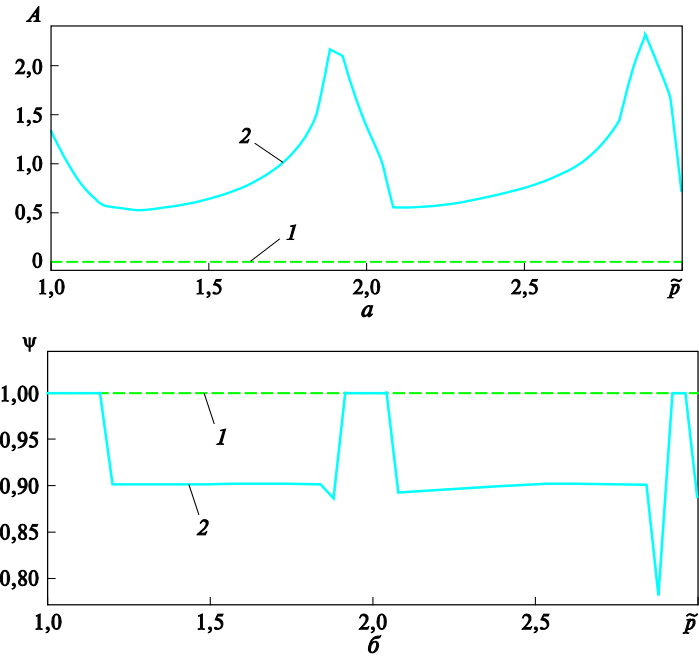


Рис. 8. Зависимость амплитуд колебаний (a) и коэффициента непрерывности резания (b) от параметра \tilde{p} при $\tilde{K} = 0, 2$:
 1 — без управления; 2 — с управлением

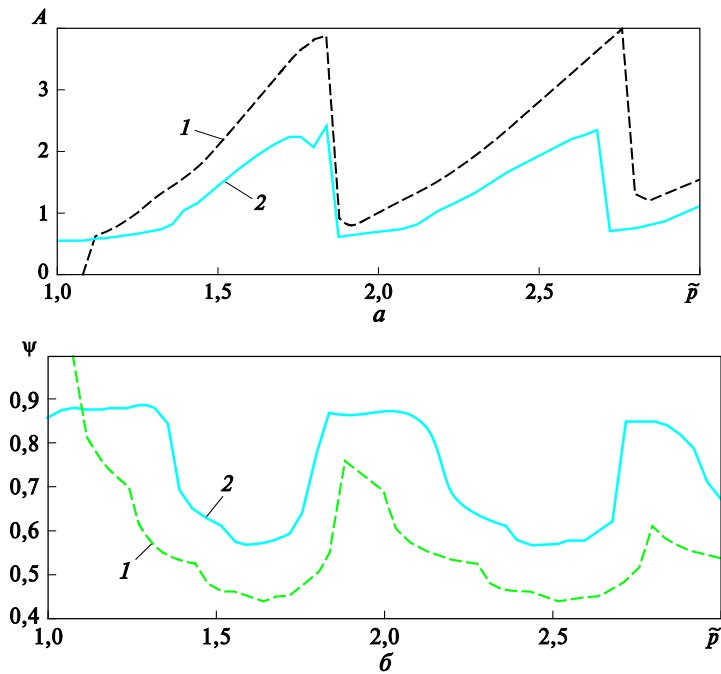


Рис. 9. Зависимость амплитуд колебаний (a) и коэффициента непрерывности резания (b) от параметра \tilde{p} при $\tilde{K} = 0, 6$:
 1 — без управления; 2 — с управлением

Рассмотрим случай, когда применяется параметр \tilde{K} при заданном \tilde{p} . Положим $\tilde{p} = 1,2$ и будем варьировать \tilde{K} в интервале $[0,2; 0,6]$ с шагом $\Delta\tilde{K} = 0,01$ (рис. 10). Дробление стружки наблюдается только в случае $\tilde{K} > 0,44$ без управления. С управлением стружка дробится при всех рассматриваемых значениях \tilde{K} и коэффициент непрерывности резания ψ находится в диапазоне $[0,87; 0,9]$.

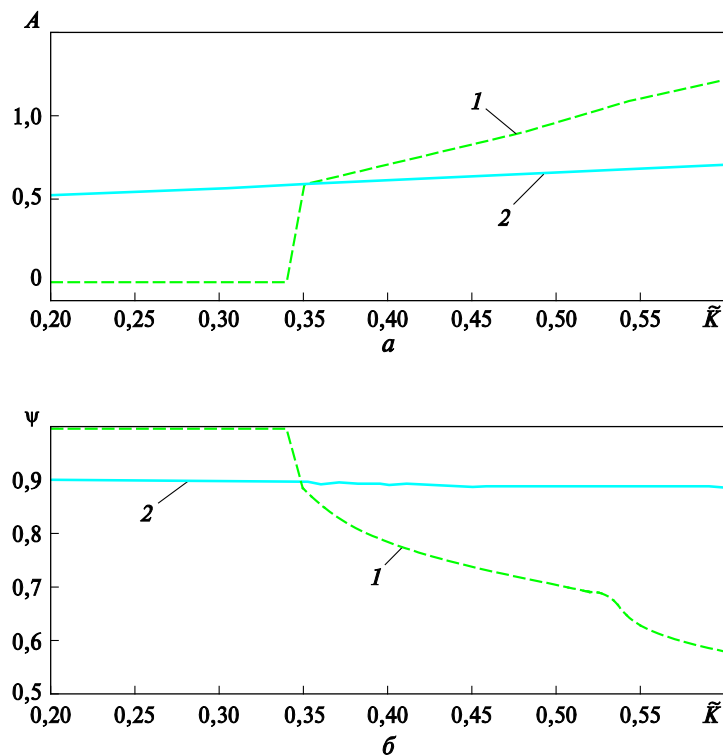


Рис. 10. Зависимость амплитуд колебаний (*a*) и коэффициента непрерывности резания (*б*) от параметра \tilde{K} при $\tilde{p} = 1,2$:

1 — без управления; 2 — с управлением

Теперь положим $\tilde{p} = 2,6$ и будем варьировать параметр \tilde{K} в интервале $[0,2; 0,6]$ с шагом $\Delta\tilde{K} = 0,01$ (рис. 11). Дробление стружки наблюдается только в случае $\tilde{K} > 0,23$ без управления. С управлением можно добиться дробления стружки при всех рассматриваемых значениях \tilde{K} .

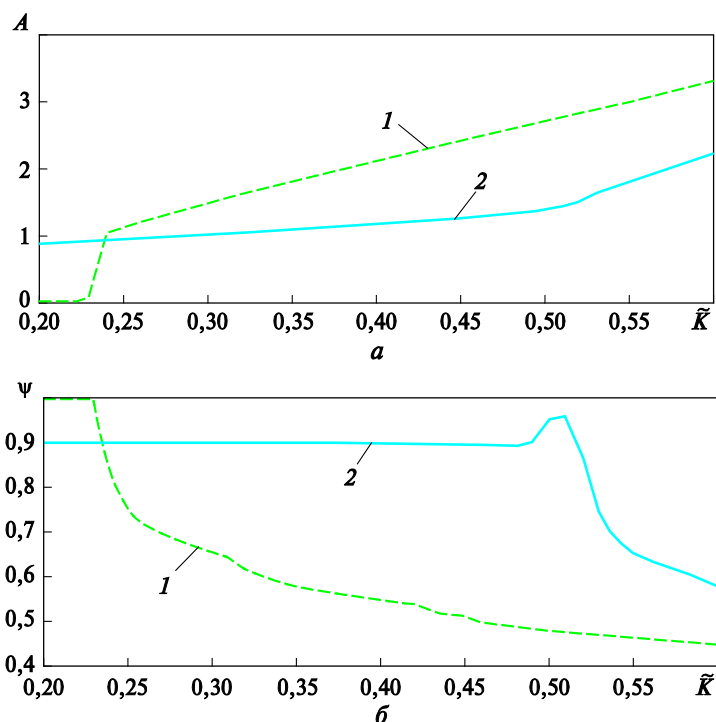


Рис. 11. Зависимость амплитуд колебаний (a) и коэффициента непрерывности резания (ψ) от параметра \tilde{K} при $\tilde{p} = 2, 6$:
1 — без управления; 2 — с управлением

Заключение. Предложена модифицированная стратегия управления вибрациями сверла по размаху колебаний, которая была протестирована на качественно различных сочетаниях безразмерных параметров обработки и свойств материалов (\tilde{K}, \tilde{p}). Показано, что при вибрационном сверлении с управлением дробление стружки возможно в более широком диапазоне параметров, чем без управления. Следует также отметить, что при режимах, на которых возбуждаются колебания без управления, внесение управления сохраняет дробление стружки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00147.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Подураев В.Н. *Обработка резанием с вибрациями*. Москва, Машиностроение, 1970, 350 с.
- [2] Moraru G., Veron P., Rabate P. *Drilling head with axial vibrations*. Pat US 20120107062 A1, 2012.
- [3] Gousskov A.M., Voronov S.A., Ivanov I.I., Nikolaev S.M., Barisheva D.V. *Investigation of Vibratory Drilling Model with Adaptive Control*. P. 1: Control

- of Cutting Continuity Index. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17 (7), pp. 3702–3714.
- [4] Gousskov A.M., Voronov S.A., Ivanov I.I., Kiselev I.A., Novikov V.V. Investigation of Vibratory Drilling Model with Adaptive Control. P. 2: Mixed Control of Peak-to-Peak Vibration Displacement and Cutting Continuity Index. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17 (8), pp. 4301–4312.
- [5] Иванов И.И., Воронов С.А. Исследование динамики процесса вибрационного сверления с управлением по размаху колебаний. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 9, с. 14.
DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1806
- [6] Batzer S.A., Gousskov A.M., Voronov S.A. Modeling Vibratory Drilling Dynamics. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2001, vol. 123, pp. 435–443.
- [7] Tichkiewitch S., Moraru G., Brun-Picard D., Gousskov A.M. Self-Excited Vibration Drilling Models and Experiments. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2002, vol. 51 (1), pp. 311–314.
- [8] Mousavi S., Gagnol V., Ray P. Machining Prediction of Spindle-Self-Vibratory Drilling Head. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, pp. 2119–2125.
- [9] Paris H., Brissaud D., Gousskov A., Guibert N., Rech J. Influence of the Ploughing Effect on the Dynamic Behaviour of the Self-Vibratory Drilling Head. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, pp. 385–388.
- [10] Guibert N., Paris H., Rech J., Claudin C. Identification of Thrust Force Models for Vibratory Drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49, pp. 730–738.
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.007
- [11] Glaa N., Mehdi K., Jaber M.B. Numerical Model for Prediction of Cutting Forces in a Vibratory Drilling Process. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1016, pp. 215–220. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1016.215
- [12] Yang H. et al. Drilling Force Model for Forced Low Frequency Vibration Assisted Drilling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, vol. 146, 103438.
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2019.103438
- [13] Budak E., Tunc L.T. Identification and Modeling of Process Damping in Turning and Milling Using a New Approach. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2010, vol. 59, pp. 403–408.
- [14] Ahmadi K., Ismail F. Experimental Investigation of Process Damping Nonlinearity in Machining Chatter. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50 (11), pp. 1006–1014.
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2010.07.002
- [15] Voronov S.A., Gousskov A.M., Kvashnin A.S., Butcher E.A., Sinha S.C. Influence of Torsional Motion on the Axial Vibrations of a Drilling Tool. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2006, vol. 2 (1), pp. 58–64.
- [16] Ahmadi K., Altintas Y. Stability of Lateral, Torsional and Axial Vibrations in Drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 68, pp. 63–74. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.01.006
- [17] Forestier F., Gagnol V., Ray P., Paris H. Model-Based Cutting Prediction for a Self-Vibratory Drilling Head-Spindle System. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, vol. 52, pp. 59–68.
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.09.001
- [18] Oezkaya E., Mikel S., Biermann D. Experimental Studies and FEM Simulation of Helical-Shaped Deep Hole Twist Drills. *Production Engineering*, 2018, vol. 12 (1), pp. 11–23.

- [19] Kiselev I.A. et al. Three-Dimensional Modeling of Deep Hole Vibratory Drilling Dynamics. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 50–55.
DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.272
- [20] Gousskov A.M., Voronov S.A. Dynamic Models Generalization of Manufacturing Systems with Single-Point Cutting. Considering Equations of New Surface Formation. *Proceedings of the 2nd Workshop Organized by Working Group 2 “Nonlinear Dynamics and Control”*, 2001, pp. 7–17.
- [21] Gousskov A.M., Voronov S.A., Batzer S.A. Chatter Synchronization in Vibratory Drilling. *Proc. of the ASME International Mechanical Engineering Congress “2000 Dynamics, Acoustics and Simulations”*, 2000, vol. 68, pp. 263–270.
- [22] Гуськов А.М. *Разработка методов построения и анализа динамических моделей технологических процессов при механической обработке*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1997, 335 с.
- [23] Иванов И.И. *Исследование динамики процесса вибрационного сверления с управлением*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2018, 195 с.

Статья поступила в редакцию 18.10.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Плещеев И.И., Воронов С.А., Иванов И.И. Моделирование динамики вибрационного сверления с контролем дробления стружки по размаху колебаний. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-11-1931>

Плещеев Иван Иванович — аспирант кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер ЦИАМ им. П.И. Баранова.
e-mail: ivanivanivam@yandex.ru

Воронов Сергей Александрович — д-р техн. наук, нач. отдела РФФИ, профессор кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор НИИ АПП МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области механики деформируемых тел, динамики процессов обработки резанием, моделирования сложных динамических процессов. e-mail: voronovsa@yahoo.com

Иванов Илья Игоревич — канд. техн. наук, ведущий инженер ЦИАМ им. П.И. Баранова, старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — динамика процессов резания, системы автоматического управления, роторная динамика и вопросы механических вибраций турбореактивных двигателей. e-mail: ivanovilig@gmail.com

Simulating the dynamics of vibration drilling featuring chip control driven by peak-to-peak vibration displacement

© I.I. Pleshcheev, S.A. Voronov, I.I. Ivanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Chip control is one of the most important problems in deep hole machining. A special self-vibratory drilling head may be used to implement chip control. However, chip control via a self-vibratory head is only possible for specific manufacturing parameters, which limits the use of this method. This paper presents an algorithm for adaptive control of vibration drilling dynamics intended to facilitate chip control and driven by peak-to-peak vibration displacement. We provide a mathematical model of drilling using a self-vibratory head, taking into account the facts that the cutting force is a non-linear function of the chip thickness and that there is additional non-linearity introduced when the drill is exiting the material. In order to validate the efficiency of the algorithm proposed, we performed numerical simulations for a wide range of variable processing parameters. The simulation results obtained confirm that the strategy proposed is efficient for chip control.

Keywords: vibration drilling, chip control, recuperation effect, self-excited vibrations, vibration control, feedback

REFERENCES

- [1] Poduraev V.N. *Obrabotka rezaniem s vibratsiyami* [Vibration-assisted machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 350 p.
- [2] Moraru G., Veron P., Rabate P. *Drilling head with axial vibrations*. Patent US20120107062 A1, 2012.
- [3] Gousskov A.M., Voronov S.A., Ivanov I.I., Nikolaev S.M., Barisheva D.V. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17(7), pp. 3702–3714.
- [4] Gousskov A.M., Voronov S.A., Ivanov I.I., Kiselev I.A., Novikov V.V. *Journal of Vibroengineering*, 2015, vol. 17 (8), pp. 4301–4312.
- [5] Ivanov I.I., Voronov S.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 9, p. 14. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1806
- [6] Batzer S.A., Gousskov A.M., Voronov S.A. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2001, vol. 123, pp. 435–443.
- [7] Tichkiewitch S., Moraru G., Brun-Picard D., Gousskov A.M. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2002, vol. 51 (1), pp. 311–314.
- [8] Mousavi S., Gagnol V., Ray P. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213, pp. 2119–2125.
- [9] Paris H., Brissaud D., Gousskov A., Guibert N., Rech J. *CIRP Annals — Manufacturing Tecnology*, 2008, vol. 57, pp. 385–388.
- [10] Guibert N., Paris H., Rech J., Claudin C. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, vol. 49, pp. 730–738.
- [11] Glaa N., Mehdi K., Jaber M.B. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1016, pp. 215–220.
- [12] Yang H., et al. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, no. 146, 103438.

- [13] Budak E., Tunc L.T. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 2010, vol. 59, pp. 403–408.
- [14] Ahmadi K., Ismail F. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50 (11), pp. 1006–1014.
- [15] Voronov S.A., Gousskov A.M., Kvashnin A.S., Butcher E.A., Sinha S.C. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2006, vol. 2 (1), pp. 58–64.
- [16] Ahmadi K., Altintas Y. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, vol. 68, pp. 63–74.
- [17] Forestier F., Gagnol V., Ray P., Paris H. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, vol. 52, pp. 59–68.
- [18] Oezkaya E., Mikel S., Biermann D. *Production Engineering*, 2018, vol. 12 (1), pp. 11–23.
- [19] Kiselev I.A., et al. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 50–55.
- [20] Gousskov A.M., Voronov S.A. Dynamic models generalization of manufacturing systems with single-point cutting. Considering equations of new surface formation. *Proc. of the 2nd Workshop Organized by Working Group 2 “Nonlinear Dynamics and Control”*, 2001, pp. 7–17.
- [21] Gousskov A.M., Voronov S.A., Batzer S.A. Chatter synchronization in vibratory drilling. *Dynamics, Acoustics and Simulations. ASME 2000*, 2000, vol. 68, pp. 263–270.
- [22] Gousskov A.M. *Razrabotka metodov postroeniya i analiza dinamicheskikh modeley tekhnologicheskikh protsessov pri mekhanicheskoy obrabotke*. Dis. ... dokt. tekhn. nauk [Developing methods for plotting and analysing dynamic models of manufacturing processes in machining. Dr. eng. sc. diss.]. Moscow, 1997, 335 p.
- [23] Ivanov I.I. *Issledovanie dinamiki protsessa vibratsionnogo sverleniya s upravleniem*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigating process dynamics in controlled vibration drilling. Cand. eng. sc. diss.]. Moscow, 2018, 195 p.

Pleshcheev I.I. (b. 1994) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2018. Post-graduate student, Department of Applied Mechanics; Engineer, P. I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development.
e-mail: ivanivanivam@yandex.ru

Voronov S.A. (b. 1953) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1976. Dr. Sc. (Eng.), Head of Department, Russian Foundation for Basic Research; Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University; Director, Scientific and Research Institute of Manufacturing Process Automation, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 scientific publications in the field of deformable body mechanics, machining process dynamics, complex dynamic process simulation. e-mail: voronovsa@yahoo.com

Ivanov I.I. (b. 1989) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2012, specialising in dynamics and robustness of machines. Cand. Sc. (Eng.), Leading Engineer, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development; Assist. Professor, Bauman Moscow State Technical University. Currently specialises in dynamics of cutting processes, automated control systems, rotor dynamics and issues of mechanical vibrations in gas-turbine engines. e-mail: ivanovilig@gmail.com