

С. Н. ИСАКОВ, С. И. МАРУСЕНКО

## ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НЕОДНОРОДНЫХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Виконано доопрацювання методу побудови амплітудно-частотної характеристики ультразвукового інструменту з використанням апроксимації нелінійної динамічної характеристики в зоні контакту при обробці неоднорідних матеріалів та біоматеріалів в режимі UAD. Проведено оцінку впливу основних параметрів технологічного процесу (зусилля подачі, робоча частота коливань, швидкість обертання і ін.) на стійкість та ефективність робочих режимів. Наведено графіки та діаграми робочих процесів у режимі UAD.

**Ключові слова:** нелінійна динамічна характеристика, амплітудно-частотна характеристика, неоднорідні матеріали, біоматеріали.

Выполнена доработка метода построения амплитудно-частотной характеристики ультразвукового инструмента с использованием аппроксимации нелинейной динамической характеристики в зоне контакта при обработке неоднородных материалов и биоматериалов в режиме UAD. Проведена оценка влияния основных параметров технологического процесса (усилие подачи, рабочая частота колебаний, скорость вращения и пр.) на устойчивость и эффективность рабочих режимов. Приведены графики и диаграммы рабочих процессов в режиме UAD.

**Ключевые слова:** нелинейная динамическая характеристика, амплитудно-частотная характеристика, неоднородные материалы, биоматериалы.

The method for constructing of the amplitude-frequency characteristic of the ultrasound instrument is improved by using an approximation of the nonlinear dynamic characteristic in the contact zone when processing inhomogeneous materials and biomaterials in the ultrasonically- assisted drilling mode. The influence of the main parameters of the technological process (feed force, operating frequency of oscillations, rotation speed, etc.) on the stability and efficiency of operating conditions was estimated. Graphs and diagrams of workflows in the ultrasonically- assisted drilling mode, when the feed force and the speed of the main rotation of the working tool were changing, are given. These will allow us to estimate the stability and efficiency of the selected operating modes even at the design stage.

**Keywords:** nonlinear dynamic characteristic, amplitude-frequency characteristic, inhomogeneous materials, biomaterials.

**Введение.** Появление новых технологических материалов, обладающих объемной неоднородностью, а также использование новых методов при обработке биоматериалов и костных структур обуславливают необходимость постоянного усовершенствования технологических инструментов, систем управления рабочими процессами и постоянного контроля состояния обрабатываемого материала.

Основными проблемами при обработке неоднородных и биоматериалов является существенное влияние механического и термического воздействия на конструкционные параметры самого материала, а для биоматериалов вообще на их жизнеспособность. Одним из способов снижения такого негативного влияния является наложение ультразвуковых колебаний на технологический инструмент в процессе выполнения технологических и хирургических операций, что отражается в самих названиях таких методов – ultrasonically – assisted cutting (UAC) и ultrasonically - assisted drilling (UAD).

В этой связи учет соответствующих факторов, влияющих на эффективное поведение инструмента в процессе операции, в динамически нелинейных математических моделях на стадии проектирования и разработки позволит создать новые технологические системы, отвечающие жестким требованиям по эффективности и безопасности их применения.

**Основная цель** настоящей работы – исследование влияния основных параметров (усилие подачи,

рабочая частота колебаний, скорость вращения и пр.) технологического процесса обработки неоднородных материалов и биоматериалов в режиме UAD на базе анализа нелинейной динамической характеристики в зоне контакта с учетом энергетических потерь.

**Подходы и методы.** В [1-2] были описаны подходы и методы, позволившие с учетом соответствующего представления нелинейной динамической характеристики в зоне контакта рабочего инструмента с обрабатываемым материалом получить уравнение резонансной кривой ассистирующего ультразвукового инструмента в виде:

$$a = \frac{P^*}{\sqrt{\left[ (c - m\omega^2) + k(v, a\omega) \right]^2 + \left[ \frac{\Delta W(a)}{\pi a^2} + \omega b(v, a\omega) \right]^2}}, \quad (1)$$

где

$$\vec{v}(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^N \vec{y}_i(\vec{x}) \eta_i(t); \quad (2)$$

$\vec{y}_i(\vec{x})$  – собственные формы колебаний;

$$P^* = \int_V (\vec{f}, \vec{y}) dV; \quad (3)$$

$$c = \int_V (C\vec{y}, \vec{y}) dV; \quad m = \int_V (M\vec{y}, \vec{y}) dV; \quad \omega_0^2 = \frac{c}{m}; \quad (4)$$

$\Delta W = \int_V \Psi \sigma_i^2 dV$  – энергия, рассеиваемая в системе за

цикл колебаний в соответствии с представлением Давиденкова; где  $\Psi$  - коэффициент, определяемый экспериментально;  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений.

При обработке большинства неоднородных материалов [3] и биоматериалов [4-5] наиболее приемлемым является силовая подача технологического инструмента, когда на него воздействует постоянная сила  $P$ , а эффективность процесса зависит от параметров колебаний и нелинейных динамических характеристик [1].

Функции  $k(v,a)$  и  $b(v,a)$ , характеризующие эквивалентные упругую и диссипативную составляющие нелинейной нагрузки, в случае силовой подачи для большинства практических случаев могут быть преобразованы с использованием зависимости скорости резания в виде:

$$\frac{v}{\omega a} = d_1 \frac{P}{D} + d_2 \left(\frac{P}{D}\right)^2, \quad (5)$$

где коэффициенты  $d_1$  и  $d_2$  определяются исходя из свойств обрабатываемого материала на базе эмпирических данных, а  $D$  - сила резания в отсутствие вибрации.

Тогда, учитывая зависимости:

$$\begin{aligned} m &= a^2 \bar{m}; \\ c &= a^2 \bar{c}; \\ \Delta W &= a^2 \Delta \bar{W}; \\ P^* &= a^2 \bar{P}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\bar{m}$ ,  $\bar{c}$ ,  $\Delta \bar{W}$  и  $\bar{P}$  - значения, рассчитанные при  $a = 1$ , уравнение резонансной кривой (1) для случая силовой подачи может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} a &= \frac{a^2 \bar{P}}{\sqrt{[a^2 \bar{m}(\omega_0^2 - \omega^2) + G_k]^2 + \left[\frac{\Delta \bar{W}}{\pi} + G_b\right]^2}}; \\ G_k &= \frac{D}{a\pi \left(d_1 \frac{P}{D} + d_2 \left(\frac{P}{D}\right)^2\right)} \sum_{i=1}^M k_i \left(d_1 \frac{P}{D} + d_2 \left(\frac{P}{D}\right)^2\right)^i; \quad (7) \\ G_b &= \frac{D}{a\pi \left(d_1 \frac{P}{D} + d_2 \left(\frac{P}{D}\right)^2\right)} \sum_{i=1}^M b_i \left(d_1 \frac{P}{D} + d_2 \left(\frac{P}{D}\right)^2\right)^i. \end{aligned}$$

При обработке неоднородных материалов и, особенно, биоматериалов в режиме UAD необходимо учитывать потери энергии в зоне контакта, вызванные вращением режущей кромки инструмента, которые могут оказывать существенное влияние на изменение температуры обрабатываемого материала. Эти потери могут быть представлены с учетом идей и подходов, изложенных в [6], в виде:

$$\gamma = n \omega a \frac{P}{D} \gamma_1, \quad (8)$$

где  $n$  - скорость вращения инструмента, а коэффициент  $\gamma_1$  зависит от степени деформации срезаемого материала, физико-технологических свойств инструментального материала, сечения и формы режущей кром-

ки рабочего наконечника инструмента.

Уравнения (7) с учетом дополнительных потерь энергии в зоне контакта (8) позволят построить амплитудно-частотные характеристики режима UAD для случая силовой подачи и оценить влияние всех технологических параметров на эффективность процесса обработки.

**Исследование режимов UAD.** Рабочая частота ультразвукового инструмента аналогичного исследованному в [1] - 20 кГц, пассивная часть инструмента изготовлена из титанового сплава, а активная - из пьезокерамических элементов. При этом режущая кромка рабочего наконечника имеет алмазное напыление.

При отсутствии нагрузки амплитудно-частотная характеристика (7) представлена на рис. 1.

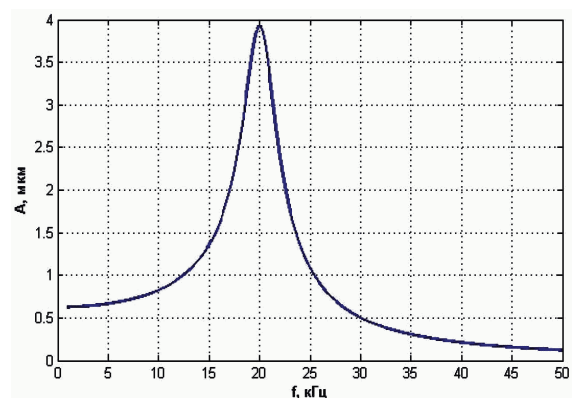


Рисунок 1 – АЧХ без нагрузки

Изменение АЧХ в зависимости от величины отношения  $P/D$  представлено на рис. 2.

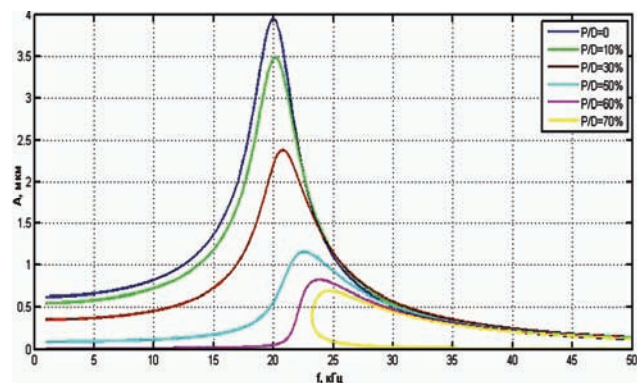


Рисунок 2 – Изменение АЧХ в зависимости от величины отношения  $P/D$

Увеличение усилия подачи до критического значения  $P_{кр}$  приводит к смещению резонансной кривой в сторону больших частот и снижению амплитуды колебаний рабочего наконечника, а при превышении критического значения  $P_{кр}$  может привести к «срыву» на неустойчивую ветку, когда поддержание резонансного режима всей системы оказывается невозможным, а для его восстановления необходимо проводить «разгрузку» системы, что сказывается на показателях эффективности самой операции. Для медицинского применения ультразвуковых инструментов необходимо

обратить особое внимание на величину критического усилия, которое может оказать травматическое влияние на биологические ткани или кости.

Влияние скорости вращения инструмента в режиме « $P/D \rightarrow 0$ » на поведение АЧХ при обработке большой берцовой кости продемонстрировано на рис. 3.

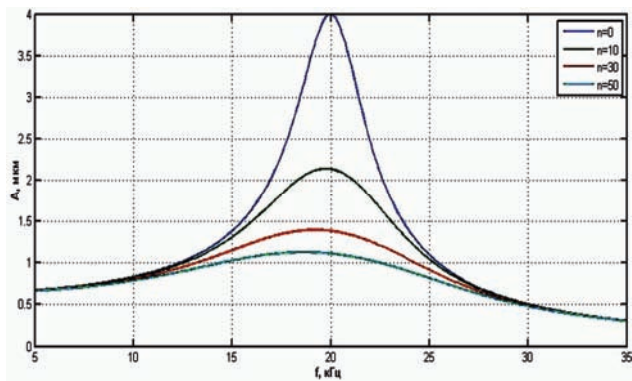


Рисунок 3 – Изменение АЧХ в зависимости от скорости вращения  $n$

Здесь важно отметить, что даже при незначительных скоростях вращения режущей кромки рабочего инструмента, возникают существенные потери энергии в зоне контакта, приводящие к падению амплитуды ультразвуковых колебаний, а термические воздействия на ткани в этой зоне могут привести к их отмиранию.

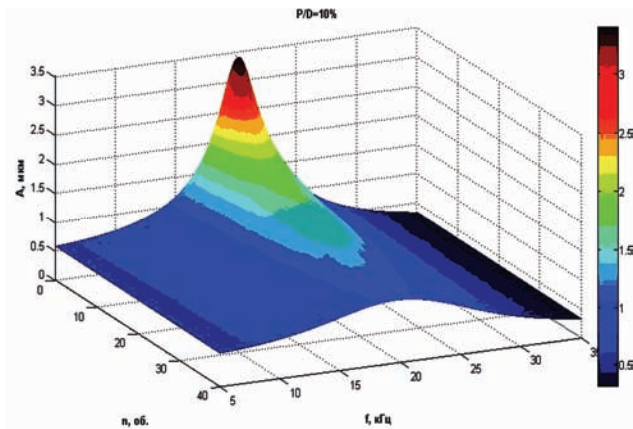


Рисунок 4 – АЧХ для  $P/D = 10\%$

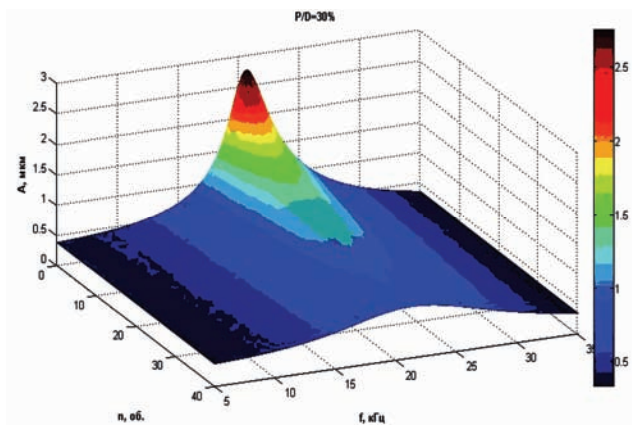


Рисунок 5 – АЧХ для  $P/D = 30\%$

Комплексное воздействие всех технологических параметров в режиме UAD на поведение АЧХ можно проанализировать, исследуя диаграммы рис. 4-6, построенные для нескольких значений соотношения  $P/D$ .

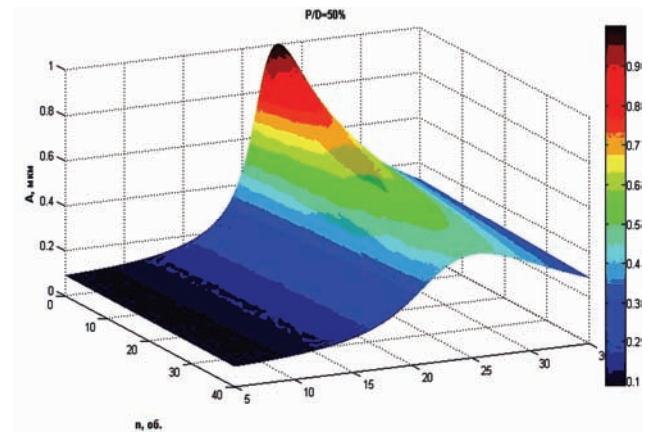


Рисунок 6 – АЧХ для  $P/D = 50\%$

**Выводы.** В ходе настоящего исследования была разработана математическая модель технологического процесса обработки неоднородных материалов и биоматериалов в режиме UAD.

Анализ амплитудно-частотной характеристики позволяет оценить влияние основных параметров технологического процесса (усилие подачи, рабочая частота колебаний, скорость вращения и пр.) на устойчивость и эффективность рабочих режимов и выбрать оптимальные параметры процесса в каждом конкретном случае обработки.

Используя разработанные математические модели, методы расчетов и алгоритмы еще на стадии проектирования возможно оценить устойчивость и надежность выбранных рабочих режимов ультразвукового инструмента для обеспечения эффективного проведения технологических операций и предотвратить травматическое воздействие на живые ткани при медицинском вмешательстве. При этом могут быть выработаны оптимальные требования к разработке системы управления режимами UAD.

#### Список литературы:

1. Исаков С. Н. Исследование динамических нелинейных процессов УЗ технологических инструментов / С. Н. Исаков // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Динаміка та міцність машин». – 2012. – № 55. – С. 73-80.
2. Асташев В. К. О нелинейной динамике ультразвуковых технологических процессов и систем / В. К. Асташев // Научно-технический журнал «ВНТР», Национальная Технологическая Группа. – М.: 2007. – № 2. – С. 123-127.
3. Ярославцев В. М. Механика процесса резания пластически деформированных металлов с неоднородными свойствами по толщине срезаемого слоя / В. М. Ярославцев // Вестник МГТУ. Сер. «Машиностроение». – 1993. – № 4. – С. 93-103.
4. Alam K. Measurements of surface roughness in conventional and ultrasonically-assisted bone drilling / K. Alam, A. V. Mitrofanov, M. Bäker, V. V. Silberschmid // American Journal of Biomedical Sciences. – 2009. – № 1 (4). – PP. 312-320.

5. Alam K. Finite element analysis of forces of plane cutting of cortical bone / K. Alam, A. V. Mitrofanov, M. Bäker, V. V. Silberschmid // Journal of Computational Materials Science. – 2009. – № 46 (3). – PP. 38–743.

6. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ // – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

#### References (transliterated):

1. Isakov S. N. Issledovanie dinamicheskikh nelinejnykh processov UZ tehnologicheskikh instrumentov. Visnik NTU «KhPI»: Serija «Dinamika ta micnist' mashin». 2012. No 55. PP. 73-80.

2. Astashev V. K. O nelinejnoj dinamike ul'trazvukovykh tehnologicheskikh processov i sistem. Nauchno-tehnicheskij zhurnal «VNTR», Nacional'naja Tehnologicheskaja Gruppy. Moscow: 2007. No 2. PP 123-127.

3. Jaroslavcev V. M. Mehanika processa rezanija plasticheski deformirovannykh metallov s neodnorodnymi svojstvami po tolshhine srezaemogo sloja. Vestnik MGTU. Ser. "Mashinostroenie". 1993. No 4. PP. 93-103.

4. Alam K., Mitrofanov A.V., Bäker M., Silberschmid V. V. Measurements of surface roughness in conventional and ultrasonically-assisted bone drilling. American Journal of Biomedical Sciences. 2009. No 1 (4). PP. 312–320.

5. Alam K., Mitrofanov A.V., Bäker M., Silberschmid V. V. Finite element analysis of forces of plane cutting of cortical bone. Journal of Computational Materials Science. 2009. No 46 (3). PP. 738–743.

6. Kumabje D. Vibracionnoe rezanie. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 424 p.

Поступила (received) 02.10.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Динамічна нелінійність ультразвукової обробки неоднорідних і біологічних матеріалів / С. М. Ісаков, С. І. Марусенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 19-22. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.

Динамическая нелинейность ультразвуковой обработки неоднородных и биологических материалов / С.М. Исаков, С. И. Марусенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 19-22. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.

Dynamic nonlinearity of ultrasonic treatment of inhomogeneous and biological materials / S. M. Isakov, S. I. Marusenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 39 (1261). – С. 19-22. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9130.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ісаков Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: smisakov959@gmail.com.

Ісаков Сергей Николаевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, НТУ «ХПИ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: smisakov959@gmail.com.

Isakov Sergiy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Junior researcher, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: smisakov959@gmail.com.

Марусенко Світлана Іванівна – науковий співробітник, НТУ «ХПІ», тел.: (057)-70-761-78.

Марусенко Светлана Ивановна – научный сотрудник, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78.

Marusenko Svitlana – Researcher, NTU "KhPI", tel.: (057)-70-761-78.