

УДК: 331.45
OECD: 02.03

Вывод зависимостей скоростей колебаний стержневых систем при упрочнении сварных швов для снижения уровней шума на рабочем месте оператора

Чукарин А.Н.¹, Исаев А.Г.^{2*}, Аббакумов К.Е.³, Лубянченко А.А.⁴

¹ Д.т.н, профессор, заведующий кафедрой «Основы проектирования машин», Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, РФ

² К.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, РФ

³ Д.т.н, профессор, заведующий кафедрой «Электроакустика и ультразвуковая техника», Санкт-Петербургский Электротехнический университет (ЛЭТИ), г. Санкт-Петербург, РФ

⁴ К.т.н, старший преподаватель кафедры «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Обработка шарико-стержневым упрочнителем может использоваться для упрочнения как плоских, так и лекальных поверхностей, создания сжимающих остаточных напряжений, сглаживания каверн, нанесения регулярного микрорельефа на пары трения, а также для обработки сварных швов. Как известно сварной шов является одним из серьезных концентраторов напряжения на поверхностном слое изделия, поскольку для него характерна неоднородность материала шва, его свойств, наличие дефектов и напряжений, обусловленных температурными деформациями. В зоне термического воздействия имеется зона пониженной прочности, которая должна быть усилена в процессе изготовления. Однако процесс обработки сопровождается сильным шумом, который в основном превышает нормативные значения в рабочей зоне оператора. Как известно обеспечение акустической безопасности при ударных процессах обработки имеет довольно важное значение. В данной статье представлены теоретические исследования процессов возбуждения вибраций и шумообразования при упрочнении сварных швов рамных конструкций. Показана актуальность тематики проведенных исследований. Полученные данные позволят сделать выводы о закономерностях формирования спектров шума и вкладе источников шума в звуковое поле на рабочем месте оператора.

Ключевые слова: шарико-стержневой упрочнитель, уровни звукового давления, спектры шума, спектры вибрации, акустическая система, стержневые конструкции.

Derivation of the dependences of the vibration rates of rod systems when strengthening welds to reduce noise levels at the operator's workplace

Chukarin A.N.¹, Isaev A.G.^{2*}, Abbakumov K.E.³, Lubianchenko A.A.⁴

¹ DSc, professor, head of the department of Fundamentals of Machine Design, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

² PhD, senior lecturer of the department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

³ DSc, professor, head of the department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, St. Petersburg, Russia

⁴ PhD, senior lecturer of the department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinova, St. Petersburg, Russia

Abstract

Ball-and-rod hardening can be used for strengthening both flat and horizontal surfaces, creating compressive residual stresses, smoothing cavities, applying regular microrelief to friction pairs, as well as for processing welds. As is known, the weld is one of the major stress concentrators on the surface layer of the product, since it is characterized by heterogeneity of the seam material, its properties, the presence of defects and stresses caused by temperature deformations. In the zone of thermal impact, there is a zone of reduced strength, which must be strengthened during the manufacturing process. However, the processing process is accompanied by strong noise, which generally exceeds the standard values in the operator's work area. As you know, ensuring acoustic safety during shock processing processes is quite important. This article presents theoretical studies of the processes of vibration excitation and.

Keywords: *ball-and-rod hardener, sound pressure levels, noise spectra, vibration spectra, acoustic system, rod structures.*

Введение

Шарико-стержневой упрочнитель (ШСУ) является новым и универсальным устройством, предназначенным для обработки не только плоских поверхностей, но и поверхностей лекальной формы, обладающих небольшими перепадами высот. Устройство состоит из упаковки инденторов выполненных в виде стальных стержней и имеющих на одном из торцов сферическую заточку 2. Упаковка стальных стержней зафиксированы в корпусе упрочнителя 3 с использованием цангового зажима, между бойком 1 и инденторами находятся несколько слоев стальных шариков 4 (рис. 1)[1,2,3].

Приводимый в движение по средствам пневмомолотка боек, передает ударные импульсы торцу стержней-инденторов через несколько слоев шариков. Инденторы в свою очередь оказывают ударное воздействие на поверхность обрабатываемой детали сферически заточенными наконечниками.

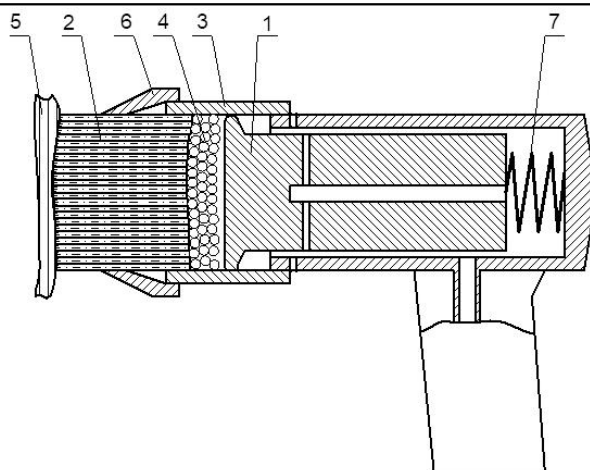


Рис. 1. Схема устройства для шарико-стержневого упрочнения:

1 – ударник пневмомолотка, 2 - упаковка стержней-инденторов со сферической заточкой,
3 – корпус упрочнителя, 4 - стальные шары, 5 - обрабатываемая деталь,
6 - цанговый зажим, 7 – упругий элемент

Благодаря слоям закаленных шариков осуществляется гибкость обработки с возможностью огибания фасонных поверхностей детали. Поэтому упрочнитель возможно использовать при упрочнении как плоских, так и лекальных поверхностей с небольшим перепадом высот. Возможность создания благоприятной картины остаточных напряжений в поверхностном слое, может использоваться для устранения небольших дефектов типа каверн, а также для создания регулярного и частично-регулярного микрорельефа.

Однако следует отметить, что в современном производстве важное значение имеет обеспечение акустической безопасности при ударных процессах обработки деталей машин. Защита работников от воздействия опасных и вредных производственных факторов является актуальной. С каждым годом постоянно ужесточаются санитарные нормы, ограничивающие интенсивность шума и вибраций. Это связано прежде всего с тем, что шум - это постоянно действующий фактор обладающий высокой интенсивностью и оказывающим влияние на снижение производительности труда, а в следствии и на качество обрабатываемых деталей и на ухудшение здоровья работников. Поэтому одной из важных задач при создании оборудования и проектировании технологических процессов является снижения шума и вибраций до санитарных норм [3,4,5].

В результате проведенных многочисленных исследований установлено, что при упрочнении поверхностей деталей методом ШСУ шум значительно превышает нормативные значения. Можно отметить, что при данной обработке единственным параметром не удовлетворяющим санитарные нормы является шум. Это приводит к необходимости проведения всесторонних исследований процесса формирования шума и вибраций при шарико-стержневом упрочнении, целью которых является разработка технологических процессов и устройств, исключающих вредное воздействие на организм работающих.

Акустическая система оборудования ШСУ объектов исследования включает следующие источники шума:

- упрочнитель;
- изделия, на которых производится упрочнение сварных швов;
- несущая система самого оборудования.

Учитывая особенности силового воздействия при ШСУ можно предположить,

что доминирующими источниками шума, создающими превышения над предельными спектрами, являются упрочнитель и, в особенности, изделие с упрочняемыми сварными швами. Это допущение подтверждается существующими исследованиями виброакустических характеристик при ШСУ круглых заготовок[2].

Элементы рамных конструкций, такие как уголки, швеллера, двутавровый профиль имеют постоянное значение площади поперечного сечения по длине и могут рассматриваться как стержневые системы, имеющие различные значения моментов в направлении осей координат OX и OY (рис. 2).

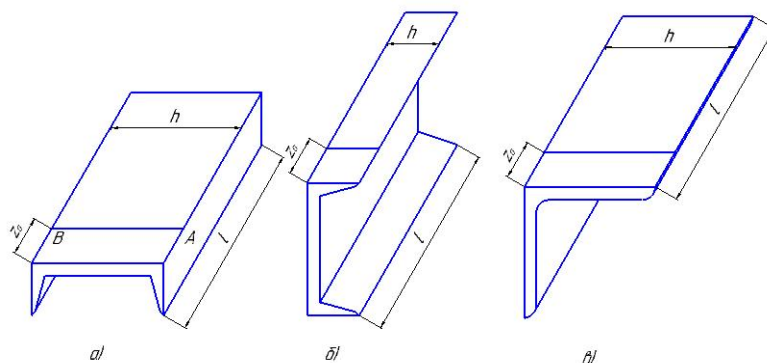


Рис. 2. Варианты установки элементов рам при Шсу сварных швов:
а) и б) – швеллер, в) – уголков

1. Вывод зависимостей

Конструктивные особенности упрочнителей позволяют представить воздействие в виде последовательности ударных возмущений на сварной шов (рис.3)

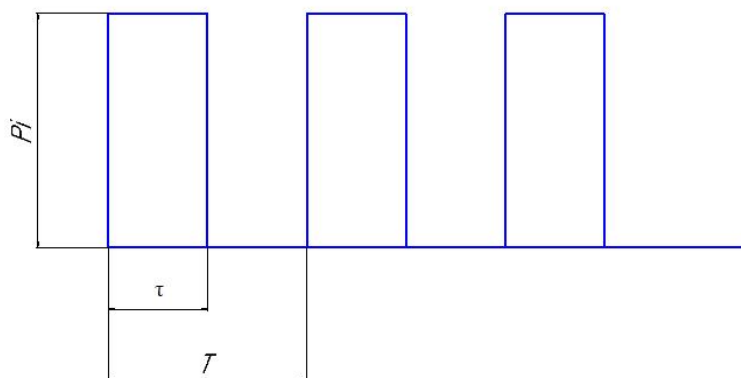


Рис. 3. Расчетная схема силового воздействия

При выводе зависимости силового воздействия сделано допущение, что силовые воздействия на каждом стержне равны между собой. Согласно данной расчетной схемы силового воздействия получено следующие выражение

$$P(t) = P_i K_c \sum_{i=1}^i \left[f\tau + \frac{2}{\pi i} \sin f\tau i \cos(k_i f_i f t - k_i i f \tau) \right], \quad (1)$$

где K_c – количество стержней, шт.; P_i – амплитуда силового воздействия одного стержня, Н; f – частота воздействия стержня на сварной шов, Гц; τ – время силового воздействия, с; f_i – собственные частоты колебаний, s^{-1} .

Амплитуда силового воздействия P_i определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_i &= \frac{1,14v_0^2}{k_1 a_m} \sin \frac{1,068v_0 t}{a_m}; \\
 a_m &= \left(\frac{5v_0^2}{4k_1 k_2} \right)^{215}; \\
 k_1 &= \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}; \\
 k_2 &= \frac{4}{3} \frac{q_k}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1 \pi} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2 \pi} \right) \sqrt{A + B}}; \\
 \tau &= \frac{2,94}{v_0^{0,2}} \left(\frac{5}{4k_1 k_2} \right)^{0,4},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где m_1 и m_2 – масса стержня и упрочняемого изделия (соответственно), кг; v_0 – скорость в момент контакта стержня с изделием, м/с с учетом того, что m_1 и m_2 , μ_i – коэффициент Пуансона; E_i – модуль упругости, Па; $\sqrt{A + B}$ – амплитуда колебания; k_1 и k_2 – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний стержня и упрочняемого изделия.

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{1}{m_1} = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{R_1^2 l_c}; \\
 k_2 &= \frac{4}{3} \frac{1}{Q_1 + Q_2} \sqrt{R_1}; \\
 \tau &= 4,53 \left(\frac{(Q_1 + Q_2)m_1}{\sqrt{R_1} v_0} \right)^{0,4}; \\
 a_m &= \left(\frac{15\pi v_0^2 (Q_1 + Q_2)m_1}{16\sqrt{R_1}} \right)^{0,4},
 \end{aligned}$$

где R_1 и l_c – радиус и длина стержня, м; v_0 , m_1 – то же, что и в формуле (2); Q_1 и Q_2 – коэффициенты, определяемые как:

$$Q_i = \frac{1 - \mu_i^2}{\pi E_i},$$

где μ_i , E_i – то же, что и в формуле (2).

Выбор технологических режимов упрочнения основан на энергии взаимодействия упрочнителя с изделием. Поэтому для скорости в момент контакта и напряжения в зоне взаимодействия получены следующие зависимости

$$v_0 = \sqrt{\frac{2Ph}{m_1}} \text{ и } \tau_{max} = 0,25 \left[\frac{v_0^2}{(Q_1 + Q_2)^4} \cdot \frac{m_1}{R_1^3} \right]^{0,2}, \tag{3}$$

где P – сила, Н; h – ход стержня, м; m_1 , R_1 , Q_1 и Q_2 – то же, что и в формуле (2).

Для условий упрочнения сварных швов стальных изделий приведенные выше зависимости примут вид:

$$k_1 = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{R_1^2 l_c}; \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
k_2 &= 2,7 \cdot 10^{11} \sqrt{R_1}; \\
\tau &= 4,9 \cdot 10^{-10} R_1^{0,6} l_c^{0,4} v_0^{-0,2}; \\
a_m &= 9 \cdot 10^6 R_1^{0,6} l_c^{0,4} v_0^{0,8}.
\end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned}
P_{imax} &= 3 \cdot 10^{-4} R_1^{1,4} l_c^{0,6} v_0^{1,2}; \\
\tau_{imax} &= 2,3 \cdot 10^{10} R_1 l_c^{0,2} v_0^{0,4},
\end{aligned}$$

где P_{imax} – максимальная амплитуда силового воздействия одного стержня, Н; τ_{imax} – максимальное напряжения в зоне взаимодействия; τ – то же, что и в формуле (1); v_0, τ, k_2, l_c, R_1 – то же, что и в формуле (2).

Применительно к процессу упрочнения уравнения колебаний примет вид:

$$\begin{aligned}
E J_x(z) \frac{\partial^4 \eta}{\partial t^4} + \rho F \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} &= P_i K_c \sum \sum \left[2\pi f \tau - \frac{2}{\pi i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\
&\left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \sin^3 \frac{\pi k z}{l} \sin^3 \frac{\pi k z_0}{l} \right], \quad (5)
\end{aligned}$$

где K_c – количество стержней в зоне взаимодействия со сварным швом; f, τ, k – то же, что и в формуле (1).

Выполняя аналогичные преобразования, получим систему уравнений.

Вариант а:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \eta_1}{\partial t^2} + 2,6 \cdot 10^9 \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 \eta_1 &= \frac{6,3 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[\pi f \tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\
&\left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \sin^3 \frac{\pi k z_0}{l} \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \eta_2}{\partial t^2} + 2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 \eta_2 &= \frac{1,9 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[\pi f \tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\
&\left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \sin^3 \frac{\pi k z_0}{l} \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \varepsilon_1}{\partial t^2} + 2,6 \cdot 10^9 \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 \varepsilon_1 &= \frac{6,3 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[\pi f \tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\
&\left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \sin^3 \frac{\pi k z_0}{l} \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \varepsilon_2}{\partial t^2} + 2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 \varepsilon_2 &= \frac{1,9 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[\pi f \tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\
&\left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \sin^3 \frac{\pi k z_0}{l} \right].
\end{aligned}$$

Варианты б и в:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \eta_1}{\partial t^2} + 1,6 \cdot 10^8 \frac{J_x}{F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 \eta_1 &= \frac{6,3 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[f \tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\
&\left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \cos^3 \frac{2k-1}{2l} \pi z_0 \right];
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \eta_2}{\partial t^2} + 1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_x}{F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 \eta_2 = -\frac{1,9 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[f\tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \cos^3 \frac{2k-1}{2l} \pi z_0 \right];$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_1}{\partial t^2} + 1,6 \cdot 10^8 \frac{J_y}{F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 \varepsilon_1 = \frac{6,3 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[f\tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \cos^3 \frac{2k-1}{2l} \pi z_0 \right];$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_2}{\partial t^2} + 1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_y}{F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 \varepsilon_2 = -\frac{1,9 \cdot 10^{-4}}{Fl} P_i K_c \sum \sum \left[f\tau - \frac{0,1}{i} \sin 2\pi f i \tau \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos[2\pi f i t - 2\pi f i \tau] \cos^3 \frac{2k-1}{2l} \pi z_0 \right].$$

Решения уравнений получены в следующем виде.

Вариант а:

$$\eta_1 = P_i K_c \sum \frac{2,4 \cdot 10^{-13} \pi f \tau l^3}{J_x k^4} - \frac{6,3 \cdot 10^{-5}}{Fl} \sum_{k=1}^{k^x} \sum_{i=1}^i \frac{\sin 2\pi f i \tau}{i} \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \cdot \\ \cdot \left\{ \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 6,25 \cdot 10^{18} \left(\frac{J_x}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \cos(2\pi f i t - 2\pi f i \tau);$$

$$\eta_2 = -P_i K_c \sum \frac{9 \cdot 10^{-14} \pi f \tau l^3}{J_x k^4} - \frac{1,9 \cdot 10^{-5}}{Fl} \sum_{k=1}^{k^x} \sum_{i=1}^i \frac{\sin 2\pi f i \tau}{i} \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \cdot \\ \cdot \left\{ \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 4,4 \cdot 10^{22} \left(\frac{J_x}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \cos(2\pi f i t - 2\pi f i \tau);$$

$$\varepsilon_1 = P_i K_c \sum \frac{2,4 \cdot 10^{-13} \pi f \tau l^3}{J_y k^4} - \frac{6,3 \cdot 10^{-5}}{Fl} \sum_{k=1}^{k^y} \sum_{i=1}^i \frac{\sin 2\pi f i \tau}{i} \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \cdot \\ \cdot \left\{ \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 6,25 \cdot 10^{18} \left(\frac{J_y}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \sin^3 \frac{\pi k z_0}{l};$$

$$\varepsilon_2 = -P_i K_c \sum \frac{9 \cdot 10^{-14} \pi f \tau l^3}{J_y k^4} - \frac{1,9 \cdot 10^{-5}}{Fl} \sum_{k=1}^{k^y} \sum_{i=1}^i \frac{\sin 2\pi f i \tau}{i} \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \cdot \\ \cdot \left\{ \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 4,4 \cdot 10^{22} \left(\frac{J_y}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \sin^3 \frac{\pi k z_0}{l}.$$

Скорость колебаний определяют как:

$$v_{\eta_1} = \left| \frac{\partial \eta_1}{\partial t} \right| = \frac{4 \cdot 10^{-4} P_i K_c f}{Fl} \sum \sum \sin 2\pi f i \tau \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \cdot \\ \cdot \left\{ \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 6,25 \cdot 10^{18} \left(\frac{J_x}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi f i t - 2\pi f i \tau);$$

$$v_{\eta_2} = \left| \frac{\partial \eta_2}{\partial t} \right| = \frac{1,2 \cdot 10^{-4} P_i K_c f}{Fl} \sum \sum \sin 2\pi fi\tau \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right] \cdot \left\{ \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_x}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right]^2 + 4,4 \cdot 10^{22} \left(\frac{J_x}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi fit - 2\pi fi\tau);$$

$$v_{\varepsilon_1} = \left| \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} \right| = \frac{4 \cdot 10^{-4} P_i K_c f}{Fl} \sum \sum \sin 2\pi fi\tau \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right] \cdot \left\{ \left[2,6 \cdot 10^9 \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right]^2 + 6,25 \cdot 10^{18} \left(\frac{J_y}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi fit - 2\pi fi\tau);$$

$$v_{\varepsilon_2} = \left| \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial t} \right| = \frac{1,2 \cdot 10^{-4} P_i K_c f}{Fl} \sum \sum \sin 2\pi fi\tau \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right] \cdot \left\{ \left[2,1 \cdot 10^{11} \frac{J_y}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right]^2 + 4,4 \cdot 10^{22} \left(\frac{J_y}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi fit - 2\pi fi\tau).$$

Для вариантов б и в:

$$\eta_1 = P_i K_c \sum \frac{h^3 1,6 \cdot 10^{-12}}{J_x} \cos 1,3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{J_x}{F}} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^2 t + \frac{4 \cdot 10^{-12} \pi f \tau l^3}{J_x (2k-1)^4} - \sum \sum \frac{6,3 \cdot 10^{-5} \sin 2\pi fi\tau}{i} \left[1,6 \cdot 10^8 \frac{J_x}{F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right] \left\{ \left[1,8 \cdot 10^8 \frac{J_x}{F} \cdot \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right]^2 + 2,56 \cdot 10^{16} \left(\frac{J_x}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{2k-1}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \cos(2\pi fit - 2\pi fi\tau);$$

$$\eta_2 = P_i K_c \sum \frac{h^3 1,6 \cdot 10^{-12}}{J_x} \cos 10^{-5} \sqrt{\frac{J_x}{F}} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^2 t + \frac{1,9 \cdot 10^{-4} \pi f \tau l^3}{J_x (2k-1)^4} + \sum \sum \frac{1,9 \cdot 10^{-5} \sin 2\pi fi\tau}{i} \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_x}{F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right] \left\{ \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_x}{F} \cdot \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right]^2 + 1,7 \cdot 10^{10} \left(\frac{J_x}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{2k-1}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \cos(2\pi fit - 2\pi fi\tau);$$

$$\varepsilon_1 = P_i K_c \sum \frac{h^3 1,6 \cdot 10^{-12}}{J_y} \cos 1,3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{J_y}{F}} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^2 t + \frac{4 \cdot 10^{-12} \pi f \tau l^3}{J_y (2k-1)^4} - \sum \sum \frac{6,3 \cdot 10^{-5} \sin 2\pi fi\tau}{i} \left[1,6 \cdot 10^8 \frac{J_y}{F} \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right] \left\{ \left[1,8 \cdot 10^8 \frac{J_y}{F} \cdot \left(\frac{2k-1}{l} \right)^4 - (2\pi fi)^2 \right]^2 + 2,56 \cdot 10^{16} \left(\frac{J_y}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{2k-1}{l} \right)^8 \right\}^{-1} \cos(2\pi fit - 2\pi fi\tau);$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= P_i K_c \sum \frac{h^3 1,6 \cdot 10^{-12}}{J_y} \cos 10^{-5} \sqrt{\frac{J_y}{F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 t + \frac{1,9 \cdot 10^{-4} \pi f \tau l^3}{J_y (2k-1)^4} + \\ &+ \sum \sum \frac{1,9 \cdot 10^{-5} \sin 2\pi f i \tau}{i} \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_y}{F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \left\{ \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_y}{F} \cdot \right. \right. \\ &\cdot \left. \left. \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 1,7 \cdot 10^{10} \left(\frac{J_y}{F} \eta\right)^2 \left(\frac{2k-1}{l}\right)^8 \right\}^{-1} \cos(2\pi f i t - 2\pi f i \tau); \\ v_{k_{x_1}} &= \left| \frac{\partial \eta_1}{\partial t} \right| = P_i K_c + \sum \frac{2 \cdot 10^8}{\sqrt{J_x F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 \sin 1,3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{J_x}{F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 t + \\ &+ \sum \sum 4 \cdot 10^{-4} \sin 2\pi f i \tau \left[1,6 \cdot 10^8 \frac{J_x}{F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \left\{ \left[1,8 \cdot 10^8 \frac{J_x}{F} \cdot \right. \right. \\ &\cdot \left. \left. \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 2,56 \cdot 10^{16} \left(\frac{J_x}{F} \eta\right)^2 \left(\frac{2k-1}{l}\right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi f i t - 2\pi f i \tau); \\ v_{k_{x_2}} &= \left| \frac{\partial \eta_2}{\partial t} \right| = P_i K_c + \sum \frac{1,6 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{J_x F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 \sin 10^{-5} \sqrt{\frac{J_x}{F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 t + \\ &+ \sum \sum 10^{-4} \sin 2\pi f i \tau \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_x}{F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \left\{ \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_x}{F} \cdot \right. \right. \\ &\cdot \left. \left. \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 1,7 \cdot 10^{20} \left(\frac{J_x}{F} \eta\right)^2 \left(\frac{2k-1}{l}\right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi f i t - 2\pi f i \tau); \\ v_{k_{\varepsilon_1}} &= \left| \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} \right| = P_i K_c + \sum \frac{2 \cdot 10^8}{\sqrt{J_y F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 \sin 1,3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{J_y}{F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 t + \\ &+ \sum \sum 4 \cdot 10^{-4} \sin 2\pi f i \tau \left[1,6 \cdot 10^8 \frac{J_y}{F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \left\{ \left[1,8 \cdot 10^8 \frac{J_y}{F} \cdot \right. \right. \\ &\cdot \left. \left. \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 2,56 \cdot 10^{16} \left(\frac{J_y}{F} \eta\right)^2 \left(\frac{2k-1}{l}\right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi f i t - 2\pi f i \tau); \\ v_{k_{\varepsilon_2}} &= \left| \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial t} \right| = P_i K_c + \sum \frac{1,6 \cdot 10^{-7}}{\sqrt{J_y F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 \sin 10^{-5} \sqrt{\frac{J_y}{F}} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^2 t + \\ &+ \sum \sum 10^{-4} \sin 2\pi f i \tau \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_y}{F} \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right] \left\{ \left[1,3 \cdot 10^{10} \frac{J_y}{F} \cdot \right. \right. \\ &\cdot \left. \left. \left(\frac{2k-1}{l}\right)^4 - (2\pi f i)^2 \right]^2 + 1,7 \cdot 10^{20} \left(\frac{J_y}{F} \eta\right)^2 \left(\frac{2k-1}{l}\right)^8 \right\}^{-1} \sin(2\pi f i t - 2\pi f i \tau), \end{aligned}$$

где $J_{x,y}$ – моменты инерции в направлении осей координат ОХ и ОУ, м⁴; F – площадь поперечного сечения, м²; η и ε – деформации изгиба изделия в направлении осей ОХ и ОУ; K_c, P_i, f, τ – то же, что и в формуле (1); l – то же, что и в формуле (2); h – то же, что и в формуле (3).

Заключение

Полученные зависимости позволяют определить октавные уровни звукового давления при шарико-стержневом упрочнении и учитывают геометрические размеры изделия и параметры технологического процесса. Данные подтверждают теоретические выводы о закономерностях формирования спектров шума и вкладе источников шума в звуковое поле на рабочем месте оператора. Доминирующими источниками шума, которые и создают превышение уровней звукового давления в рабочей зоне оператора над предельно-допустимыми значениями, являются заготовка и упрочнитель. Таим образом, полученные результаты экспериментальных исследований по данным работ [1,2] подтверждают правомерность теоретического подхода к описанию закономерностей процесса шумообразования. Сравнение расчетных уровней шума с санитарными нормами позволяет на этапе проектирования определить превышение над предельно-допустимыми значениями и выбрать рациональные способы снижения уровней звукового давления до санитарных норм.

Список литературы

1. Beskopylnyi A., Chukarin A., Isaev A. NOISE SPECTRA OF BALL-ROD HARDENING OF WELDS OF ROD STRUCTURES // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Т. 983. С. 489-495;
2. Beskopylny A., Meskhi B., Chukarin A., Isaev A. Spectral characteristics of noise during hardening of welds of rod structures // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Collection of materials of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019). Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISIS», Polzunov Altai State Technical University, Crimean Federal University, Inlink Ltd. and International Union of Machine Builders. 2020. С. 044087;
3. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Исаев А.Г. Обеспечение акустической безопасности при обработке плоских деталей шарико-стержневым упрочнителем / *Вестник* . 2018. № 2 (63). С. 12-19;
4. Иванов Н. И. Основы виброакустики / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров. — Санкт-Петербург. - Политехника, 2000. — 482 с.;
5. Чукарин, А. Н. Обеспечение комфортных условий труда при виброударной отделочной обработке фасонных деталей за счет снижения вибраций и шума / А. Н. Чукарин, Л. М. Щерба // *Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении* : сб. ст. по мат-лам Всерос. науч.-техн. конф. — Нижний Новгород; Арзамас, 2002. — С. 352–355.

References

1. Beskopylnyi A., Chukarin A., Isaev A. Noise spectra of ball-rod hardening of welds of rod structures // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Т. 983. С. 489-495.
2. Beskopylny A., Meskhi B., Chukarin A., Isaev A. Spectral characteristics of noise during hardening of welds of rod structures // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Collection of materials of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials

Science (ICMTMTE 2019). Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISIS», Polzunov Altai State Technical University, Crimean Federal University, Inlink Ltd. and International Union of Machine Builders. 2020. С. 044087;

3. Tamarkin M. A., Tishchenko E. E., Isaev A. G. Ensuring acoustic safety when processing flat parts with a ball-rod hardener / Bulletin of the Bryansk state technical University . 2018. No. 2 (63). pp. 12-19. / Вестник . 2018. № 2 (63). С. 12-19;

4. Ivanov N.I. Basics of vibroacoustics / Ivanov N.I., Nikiforov A.S. — Saint Petersburg. - Polytechnic, 2000. — 482 p.;

5. Chukarin, A. N. ensuring comfortable working conditions during vibration-shock finishing of shaped parts by reducing vibrations and noise / A. N. Chukarin, L. M. Shcherba // Progressive technologies in machine and instrument engineering : collection of articles on Mat-Lam vseros. scientific-technical Conf. — Nizhny Novgorod; Arzamas, 2002. — p.p. 352-355.