

УДК 621.9.06:629.735.45

Моделирование виброакустической динамики при центробежной обработке труб лонжеронов вертолётов¹**Ю. А. Проскорякова, П. Д. Мотренко**

(Донской государственный технический университет),

С. А. Шамшура

(Ростовский государственный университет путей сообщения)

Приведены результаты теоретических исследований уровней шума при упрочнении поверхностных слоёв труб лонжеронов вертолётов методом центробежной обработки. Лонжерон рассматривается как изделие на двух опорах, подверженное импульсному силовому воздействию периодического характера. Получены расчётные зависимости для определения уровней звукового давления на собственных частотах колебаний. Приведённые формулы учитывают геометрические, механические параметры и технологические режимы упрочнения, которые задаются амплитудой, длительностью и периодичностью воздействия ударных импульсов, позволяют определить уровни шума при центробежной обработке с учётом конструктивных параметров заготовок и технологических режимов обработки. На этой основе расчётным путём определяются величины превышения уровней шума по сравнению с предельно-допустимыми значениями в соответствующих частотных диапазонах. Эти данные являются основополагающими для выбора и акустического расчёта средств шумозащиты на стадии проектирования оборудования для центробежной обработки.

Ключевые слова: уровни шума, центробежная обработка, лонжероны.

Введение. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) — распространённый и эффективный способ повышения таких эксплуатационных характеристик, как износостойкость, усталостная прочность, контактная усталость, коррозионная стойкость. ППД эффективно влияет на повышение долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред, и имеющих концентраторы напряжений, места посадок с гарантированным натягом.

Методы обработки ППД по характеру прилагаемой нагрузки (энергии) подразделяются на квазистатические и динамические. Центробежная обработка (ЦО) является одним из упрочняющих динамических методов обработки поверхностным пластическим деформированием. В результате центробежного упрочнения снижаются высотные параметры шероховатости, возрастает радиус вершин и впадин микронеровностей, увеличивается относительная опорная длина профиля на начальных участках, создаётся ненаправленная структура микронеровностей, создаются сжимающие остаточные напряжения и наклёп поверхностного слоя. Формирование таких параметров поверхностного слоя обеспечивает повышение эксплуатационных свойств деталей — усталостной долговечности, прочности, износостойкости и контактной жёсткости.

По сравнению с другими динамическими методами обработки ППД, центробежная обработка имеет ряд преимуществ: высокую интенсивность обработки, простое по конструкции оборудование, возможность обработки длинномерных малогабаритных изделий сложной формы, большую энергию воздействия на поверхность детали. Всё это позволяет получать высокую степень упрочнения стальных деталей. Данный метод основан на принципе динамического удара шариков об обрабатываемую поверхность. Здесь используется центробежная сила стальных шариков диаметром 7–20 мм, свободно сидящих в радиальных отверстиях быстро вращающегося диска.

¹ Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

Теоретические исследования. Рабочие элементы под действием центробежных сил занимают крайнее положение в радиальных отверстиях, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой. Микрорельеф поверхности образуется путём наложения и пересечения единичных следов (лунок). Схема центробежного наклёпа показана на рисунке 1.

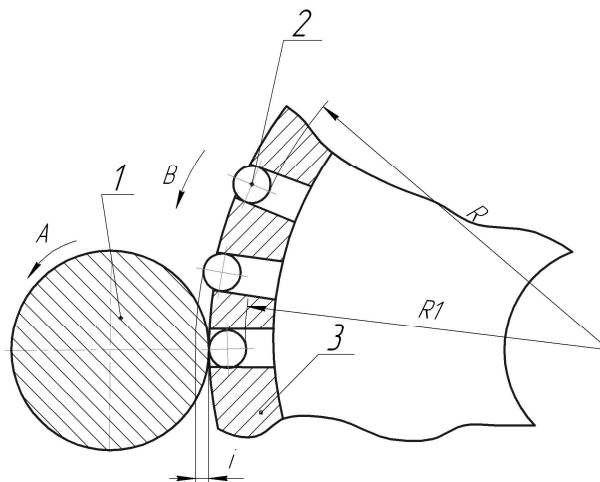


Рис. 1. Схема центробежной обработки

Приспособление для упрочнения заготовки 1 включает сепаратор 3 с рядом конических отверстий по периферии, в которых находятся шарики 2. При быстром вращении центробежная сила стремится выбросить шарики из сепаратора, но они могут выдвигаться из своих гнёзд лишь на определённую величину R и производить наклёп поверхности. После удара об обрабатываемую поверхность шарик отскакивает на величину R_1 . Заготовка вращается по стрелке A со скоростью 30–90 м/мин, а упорочитель — по стрелке B со скоростью 20–40 м/с. Такое направление вращения заготовки и упорочителя увеличивает силу удара шариков и повышает эффект упрочнения. Необходимый натяг i обеспечивается вследствие установки упорочителя на определённом расстоянии от заготовки при помощи поперечного винта суппорта или стола станка [1].

Параметры центробежной обработки следующие: v — окружная скорость упорочителя, м/с; i — натяг; z — число шариков в сепараторе; $d_{ш}$ — диаметр шариков, мм; v_d — окружная скорость обрабатываемой детали, м/с; S_o — продольная подача, мм/об; k — число рабочих ходов; m_3 — масса рабочего элемента (шарика), кг; D — наружный диаметр упорочителя, мм; d — диаметр обрабатываемой поверхности детали, мм. Достижимая глубина наклёпа от 0,4 до 1,5 мм, шероховатость может достигать 0,16 мкм [2].

При всех достоинствах этого способа с точки зрения обеспечения качества изделия, он имеет серьёзный недостаток — высокую акустическую активность при крайне неблагоприятном спектре шума, в котором наиболее интенсивные составляющие расположены в высокочастотной части спектра 1–8 кГц. Отрицательное воздействие шумов повышенного уровня на здоровье человека известно — частичная и полная потеря слуха, значительные функциональные изменения в состоянии организма. Кроме этого повышенный шум является причиной экономических потерь из-за снижения производительности труда, ухудшения качества продукции и увеличения числа несчастных случаев.

В связи с этим, проблема снижения виброакустических характеристик оборудования и доведения их в рабочих зонах операторов до нормативных значений является чрезвычайно актуальной для машиностроения и имеет научно-техническое и социально-экономическое значение.

Решение этой задачи позволит не только улучшить условия труда работающих, но и повысить качество функционирования и конкурентоспособности оборудования. Между тем, в литературе недостаточно сведений по изучению процессов шумообразования при вибрационной обработке и практически полностью отсутствуют данные для ЦО.

Схема обработки стальной трубы лонжерона с помощью ЦО напоминает схему токарной обработки, где вместо резца используется инструмент для центробежной обработки: заготовка вращается в центрах вокруг своей оси, инструмент — ротор со скоростью подачи движется вдоль оси заготовки. Станок модели 163 положен в основу установки центробежной обработки, с некоторыми изменениями, отвечающими требованиям технологического процесса [3].

Особенности компоновок оборудования и условий обработки деталей (в частности, очень низкие частоты вращения заготовок) существенно ограничивают круг задач теоретического исследования процесса шумообразования и сводит их к моделированию виброакустической системы заготовка — упрочняющий инструмент. В качестве акустической модели заготовок как шарнирно-опёртых балок принят линейный источник, а для инструмента — точечный.

Для таких источников зависимости звуковой мощности были получены на основе работ [3] и определяются следующими выражениями:

Для заготовки

$$W_{ист} = 1,02 \cdot \frac{v^2 \cdot S \cdot a \cdot k^2}{l}. \quad (1)$$

Для упрочнителя

$$W_{ист} = 0,06 \cdot \left(\frac{k^2 \cdot a \cdot S \cdot v}{l^2} \right)^2, \quad (2)$$

где v — виброскорость источника, м/с; l — длина заготовки или оправки, м; S — площадь поверхности источника, м²; $a = \sqrt{\frac{EI}{m_0}}$; E — модуль упругости заготовки, Па; I — момент инерции, м⁴; m_0 — распределённая масса, кг/м; k — коэффициент, характеризующий соответствующую собственную частоту колебаний.

Скорости колебаний заготовок на собственных модах находятся из дифференциальных уравнений поперечных колебаний. Правая часть этих уравнений представляет собой разложение в ряд Фурье технологической нагрузки, которая в данном случае имеет практически периодический характер. Кроме этого можно предположить, что при очень малых продольных скоростях упрочняющего инструмента технологическую нагрузку целесообразно представить как сосредоточенную в координате z_0 . Для таких условий авторами получено дифференциальное уравнение поперечных колебаний изделия в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{2}{M} \sum_{k=1}^{\infty} A \sin \frac{\pi k z_0}{l} + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} A_1 \sin \left(\frac{2\pi i}{T} t + \varphi \right) \cdot \sin \frac{\pi k z_0}{l}, \quad (3)$$

$$a^2 = \frac{EI}{m_0}; \quad A = \frac{P t_1}{T}; \quad A_1 = \frac{P \sin \frac{\pi i t_1}{T}}{\pi i}; \quad \varphi = \arctg \left(\operatorname{ctg} \frac{\pi i t_1}{T} \right) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi i t_1}{T},$$

где P — амплитуда силы, Н; T — период чередования ударных возмущений; t_1 — время взаимодействия инструмента и заготовки, с; z_0 — координата приложения нагрузки; i — коэффициент разложения в ряд Фурье технологической нагрузки, имеющей периодический характер.

Частное решение этого уравнения относительно скоростей колебаний заготовки (согласно краевым условиям закрепления шарнирно-опёртой заготовки) определяется следующей зависимостью:

$$v_k = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4\pi i \cdot A_1}{T \cdot M} \sin \frac{\pi k z_0}{l} \frac{\cos \left(\frac{2\pi i}{T} t + \varphi \right)}{a^2 \left(\frac{\pi k}{l} \right)^4 - \left(\frac{2\pi i}{T} \right)^2} \cdot \sin \frac{\pi k z}{l}, \quad (4)$$

где M — полная масса, кг; z — текущая координата, φ — фактор направленности источника.

Для расчёта звуковой мощности заготовки определяем максимальное значение скорости колебаний $v_{k \max}$ из всех рассчитанных.

Особенности технологического процесса ЦО не позволяют добиться снижения шума в самом источнике его возникновения. В этом случае наиболее простым и эффективным способом обеспечения в рабочей зоне операторов санитарных норм шума является проектирование звукозащитной конструкции с требуемой величиной звукоизоляции. Кроме этого, вследствие повышенной шумоопасности подобного оборудования его обычно размещают в отдельном производственном помещении. С использованием результатов научной школы д. т. н., проф. Н. И. Иванова [4] нами получены выражения (4) и (5) для определения уровней шума, создаваемых оборудованием ЦО в производственном помещении.

Малая масса упрочняющего инструмента в сравнении с упрочняющей заготовкой позволяет рассмотреть инструмент как конечномерную модель. В этом случае для виброскорости упрочняющего инструмента получено следующее выражение:

$$v_u = \frac{dy(t)}{dt} = \frac{A \sin p_0 \frac{t_1}{2}}{m p_0} \left[2 \cos p_0 \left(t - \frac{t_1}{2} \right) - \frac{\sin p_0 \left(t + \frac{T - t_1}{2} \right)}{\sin p_0 \frac{T}{2}} \right], \quad (5)$$

где $p_0^2 = \frac{3EI_x}{l_c^3 m}$ — круговая собственная частота колебаний упрочнителя, рад/с; l_c — вылет упроч-

нителя, м; m — масса упрочнителя, кг; t_1 — время взаимодействия инструмента и заготовки, с.

Для расчёта звуковой мощности упрочнителя определяется максимальное значение скорости колебаний $v_{u \max}$. На основе этих зависимостей определяются уровни шума, создаваемые акустической подсистемой заготовка-инструмент.

$$L_w = 10 \lg (10^{0.1L_1} + 10^{0.1L_2}), \quad (6)$$

где L_1 — уровни звуковой мощности излучаемой заготовкой, L_2 — уровни звуковой мощности, излучаемой инструментом, Вт/мм².

$$L_1 = W_{ист} = 0,65 V^2 l f_k S; \quad L_2 = W_{ист} = 0,024 \left(\frac{\pi k^2}{2 l^2} \cdot a \cdot S \cdot v \right)^2 = 0,06 \cdot \left(\frac{k^2 \cdot a \cdot S \cdot v}{l^2} \right)^2.$$

Выводы. Полученные зависимости позволяют определить уровни шума при ЦО с учётом конструктивных параметров заготовок и технологических режимов обработки. На этой основе расчётным путём определяются величины превышения уровней шума по сравнению с предельно-допустимыми значениями в соответствующих частотных диапазонах. Эти данные являются основополагающими для выбора и акустического расчёта средств шумозащиты на стадии проектирования данного типа оборудования.

Библиографический список

1. Проскуряков, Ю. Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. / Ю. Г. Проскуряков. — Москва : Машиностроение, 2002. — 206 с.

2. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. — Москва : Машиностроение, 1987. — 328 с.
3. Стрельченко, С. Г. Виброакустические расчёты и проектирование систем шумозащиты при центробежно-ротационном наклёпе / С. Г. Стрельченко, А. Н. Чукарин, С. А. Шамшура. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2005. — 164 с.
4. Иванов, Н. И. Основы виброакустики / Н. И. Иванов, А. С. Никифоров. — Санкт-Петербург : Политехника, 2000. — 482 с.

Материал поступил в редакцию 03.12.12.

References

1. Proskuryakov, Y. G. *Texnologiya uprochnyayushhe-kalibruyushhej i formoobrazuyushhej obrabotki metallov.* [Hardening-gauging and forming metal working technique.] Moscow : Mashinostroenie, 2002, 206 p. (in Russian).
2. Odintsov, L. G. *Uprochnenie i otdelka detalej poverxnostny`m plasticheskim deformirovaniem : spravochnik.* [Hardening and part finishing through surface plastic deformation : reference book.] 1987, 328 p. (in Russian).
3. Strelchenko, S. G., Chukarin, A. N., Shamshura, S. A. *Vibroakusticheskie raschety` i proektirovanie sistem shumozashchity` pri centrobezhno-rotacionnom naklepe.* [Vibroacoustic analysis and design of noise protection systems under centrifugal rotary peening.] Rostov-on-Don : DSTU Publ. Centre, 2005, 164 p. (in Russian).
4. Ivanov, N. I., Nikiforov, A. S. *Osnovy` vibroakustiki.* [Basics of Vibroacoustics.] St. Petersburg : Politehnika, 2000, 482 p. (in Russian).

VIBROACOUSTIC DYNAMICS SIMULATION UNDER CENTRIFUGAL TREATMENT OF HELICOPTER SPAR PIPES¹

Y. A. Proskoryakova, P. D. Motrenko

(Don State Technical University),

S. A. Shamshura

(Rostov State University of Railway Transport)

The theoretical studies on noise levels under hardening the surface layers of the helicopter spar pipes through the centrifugal processing are resulted. Spar is considered as a two-point article subjected to the periodic impulse force impact. The calculated relation is obtained for detecting the sound pressure levels at the natural frequencies. The reduced formulas include the geometric, mechanical characteristics, and the hardening processing methods which are set by the amplitude, duration, and impact momentum frequency. It allows determining the noise levels under the centrifugal processing including the design parameters of pieces and the processing conditions. On this basis, the noise level increase values as compared to the admissible limit values in the respective frequency ranges are calculated. This data is essential for the selection and acoustic design of the noise protection at the design stage of the centrifugal processing equipment.

Keywords: noise levels, centrifugal processing, spars.

¹ The research is done within the frame of the independent R&D.