

УДК 621.693

В.К. ШЕЛЕГ, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.заведующий кафедрой «Технология машиностроения»¹

E-mail: sheleh_v@tut.by

Л.Е. ЦЫГАНКОВдиректор²

E-mail: plant@mzal.by

М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, канд. техн. наук, доц.ведущий научный сотрудник лаборатории приводных систем и технологического оборудования³

E-mail: levancev@mail.ru

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, доц.заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин³

E-mail: mbelotser@gmail.com

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь²ОАО «Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова», г. Минск, Республика Беларусь³Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь*Поступила в редакцию 04.10.2018.*

СНИЖЕНИЕ ШУМА ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

Приведены результаты экспериментальных исследований демпфирующей способности металлических и полимерных покрытий, сформированных методами газопламенного напыления, деформационного плакирования гибким инструментом и гальванического осаждения. В качестве критерия оценки демпфирующей способности выбран логарифмический декремент затухания колебаний. Установлено, что полимерные покрытия на основе полиэтилентерефталата марки ПЭТФ (ТУ 6-06-С199-86), сформированные газопламенным напылением, и металлические покрытия на основе никеля, полученные гальваническим осаждением, способствуют повышению демпфирующей способности на 35...45%. Тонкие покрытия на основе меди и баббита, с толщиной слоя 4 мкм, сформированные деформационным плакированием гибким инструментом, хотя и незначительно снижают демпфирующую способность, однако при нанесении на рабочий профиль зубьев зубчатых колес встроенного привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32 способствуют снижению его шума на 1...5 децибел.

Ключевые слова: газопламенное напыление, гальваническое осаждение, деформационное плакирование, гибкий инструмент, вращающаяся металлическая щетка, покрытие, шум, вибрации

Введение. Снижение шума и вибраций металлорежущих станков является одной из важнейших задач современного станкостроения. Ее актуальность объясняется тем, что у большинства металлорежущих станков нормированные уровни звукового давления находятся в пределах от 84 до 100 дБ и выше [1]. Однако, хотя эти уровни во многих случаях и обеспечиваются при изготовлении станков, тем не менее, они превышают предельно допустимые санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [2]. Наиболее высокие уровни шума зарегистрированы у крупногабаритных токарных, револьверных, фрезерных и шлифовальных станков [3].

Как известно, в металлорежущих станках источники возбуждения шума и вибраций условно разделяют на две группы: источники, у которых

шум и вибрации обусловлены работой механизмов станка (например, работой приводов, электродвигателей, пневматических или гидравлических систем и др.); источники, генерирующие шум непосредственно в процессе обработки изделий, т. е. при выполнении технологических операций [3, 4], например, при обработке с некорректно выбранными режимами резания, затупленным резцом или резцом, заточка которого не соответствует обрабатываемому материалу заготовки, виду и размерам снимаемой стружки, и др. [3]. При резании, вследствие увеличения нагрузки на приводы и взаимодействия резца с поверхностью обрабатываемой детали, шум станка может увеличиваться, соответственно, на 3...5 и 5...10 дБ [5]. Однако, несмотря на наличие большого количества источников шума и вибраций, большинством

исследователей установлено, что главным из них в металлорежущих станках являются зубчатые приводы механизмов подач и шпиндельного узла, содержащие зубчатые колеса, работа которых, вследствие погрешностей зацепления, определяемых точностью изготовления и сборки колес в узле, сопровождается ударом. При этом, как следует из данных обобщенных спектрограмм, полученных в [6], спектр уровней шума, например, горизонтально-фрезерного станка мод. 6М82, может находиться в достаточно широком диапазоне частот от 125 до 8000 Гц.

Снижение уровня шума и вибраций в металлорежущих станках может быть достигнуто применением звукоизолирующих кожухов, одеваемых на коробки скоростей шпинделей, различного рода демпфирующих прокладок, монтируемых на стыках соединений, подбором наилучшего, с точки зрения демпфирования колебаний, материала деталей, и др. [7, 8]. Также использованием в процессе изготовления высокоточных зубчатых колес различных видов отделочно-упрочняющей обработки, таких как зубошвингования, зубохонингования, зубошлифования, зубопритирки, обкатки и др., предусматривающих в ряде случаев снятие тонкой стружки. При обработке закаленных зубчатых колес это способствует снижению уровня шума зубчатых передач на 3...5 дБ, однако существенно повышает трудоемкость и стоимость колес [9].

Эффективным способом снижения шума может быть также и нанесение на поверхность деталей демпфирующих вибропоглощающих покрытий [10]. Например, по данным работы [11], сравнительно тонкая медная пленка, толщиной до 2 мкм, сформированная на рабочем профиле зубьев зубчатых колес, может обеспечить снижение шума эвольвентных зубчатых передач на 15%. Однако к настоящему времени имеется сравнительно немного данных об эффективности использования подобных покрытий в применении к металлорежущим станкам и непосредственно к их шпиндельным узлам, что, по-видимому, связано с недостаточной изученностью демпфирующих способностей подобных покрытий и поэтому обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

Цель исследований заключалась в оценке демпфирующей способности металлических и полимерных покрытий, сформированных на поверхности экспериментальных образцов деталей с использованием технологий газопламенного напыления, гальванического осаждения и деформационного плакирования гибким инструментом, а также в изучении влияния покрытий на зубьях колес на уровень шума встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32, выпускаемого Оршанским станкостроительным заводом «Красный борец».

Методика исследований. Демпфирующую способность покрытий определяли по значениям логарифмического декремента затухания колебаний δ , определяемого по виброграмме колебаний, полученной с помощью устройства, принцип работы которого описан в работе [12]. Устройство предназначено для измерения интенсивности затухания свободных затухающих изгибных колебаний в интервале амплитуд от $\pm 0,5$ до ± 250 мкм.

Запись и обработка полученных виброграмм свободных затухающих колебаний выполнялась в соответствии с методикой, приведенной в [13], по разработанной программе. В качестве характеристики демпфирования использовался логарифмический декремент затухания колебаний, определяемый по формуле:

$$\delta_t = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{A_0}{A_n} = \frac{1}{n} \cdot \ln t,$$

где δ_t — логарифмический декремент затухания колебаний; n — число циклов колебаний; A_0 — начальная амплитуда колебаний; A_n — амплитуда колебаний через n циклов.

Отношение $t = \frac{A_0}{A_n}$, обычно принимаемое в диапазоне от 1,1 до 4 [13], в наших исследованиях составляло 1,25.

Для проведения испытаний в качестве экспериментальных образцов использовали прямоугольные пластинки из сталей 08кп, 20, 65Г и серого чугуна СЧ20, на одну из поверхностей которых наносились металлические и полимерные покрытия. При этом на поверхность пластинок из стали 20 (состояние поставки) и литого серого чугуна СЧ20, размером $2 \times 20 \times 80$ мм, наносилось полимерное покрытие из порошка полиэтилентерефталата марки ПЭТФ (ТУ 6-06-С199-86), с размером частиц до 200 мкм, полученного криогенным помолом. Формирование покрытий, с толщиной слоя 1,35...1,4 мм, на предварительно подвергнутых струйно-абразивной обработке поверхностях, осуществлялось с помощью установки газопламенного напыления типа «ТЕРКО-П», разработанной в ОИМ НАН Беларуси [14]. При напылении давление и расход пропан-бутана составляли 0,2 МПа и 1 м³/ч, воздуха — 0,5 МПа и 22 м³/ч соответственно.

На образцах пластин из стали 65Г (HV450), размером $1 \times 20 \times 75$ мм, методом гальванического осаждения в среде сернокислого электролита при плотности тока 1,2 А/дм² и температуре 30 °С формировались никелевые покрытия с толщиной слоя от 10 до 50 мкм.

На аналогичных образцах пластин из стали 65Г, а также стали 08кп (HV 90), методом деформационного плакирования гибким инструментом [15] формировались однослойные покрытия на основе меди М1 и баббита Б83, а также двухслойные

покрытия из меди М1 с последующим нанесением слоя баббита Б83. При нанесении покрытий использовалась цилиндрическая проволочная щетка диаметром 180 мм, шириной 20 мм, с вылетом и диаметром ворса 35 и 0,2 мм соответственно. Линейная скорость ее вращения составляла 35 м/с, число проходов по поверхности образца — 6, значение величины натяга щетки — 1,2 мм. Толщина сформированных слоев однослойных и двухслойных покрытий не превышала 4...5 мкм.

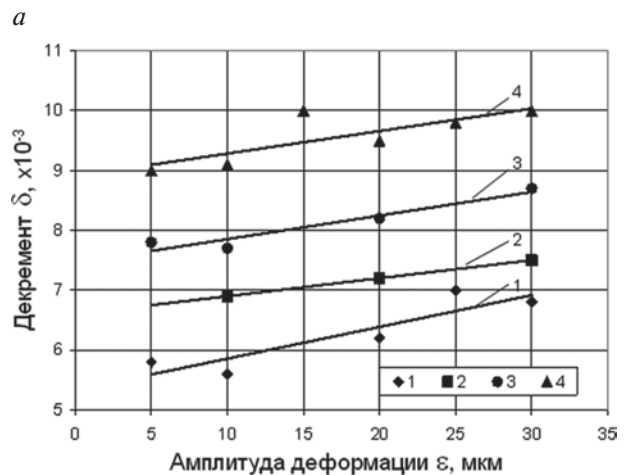
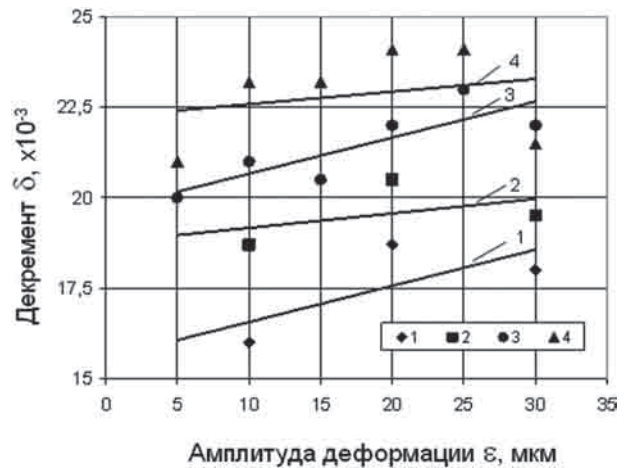
Нанесение покрытий на рабочий профиль зубьев зубчатых колес встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32 осуществляли с помощью аналогичной щетки. Толщина покрытий на зубьях зубчатых колес привода шпиндельного узла не превышала 4...6 мкм. В качестве материала для нанесения покрытий использовали бронзографит.

Уровень шума шпиндельного узла со встроенным зубчатым приводом оценивали непосредственно на станке ОШ Ф-32 с помощью виброакустического измерителя ВШВ 003, при холостом вращении шпинделя на разных частотах, по существующей на предприятии методике. Первоначально замеры уровня шума проводили до нанесения покрытия, затем — после демонтажа зубчатых колес, нанесения на них покрытия и последующей сборки зубчатого привода.

Результаты исследований. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что полимерные покрытия из полиэтилентерефталата марки ПЭТФ, сформированные газопламенным напылением, при увеличении амплитуды деформации образца способствуют повышению значения величины декремента δ для обоих материалов образцов (рисунок 1). При этом для образцов из серого чугуна СЧ20 рост декремента δ составляет от 4,4 до 13,8% (см. рисунок 1 *a*), а для образцов из стали 20 — от 11,1 до 19,3% (см. рисунок 1 *b*).

С увеличением толщины слоя покрытия значение величины декремента δ также возрастает как для напыленных полимерных, так и металлических покрытий на основе никеля, полученных гальваническим осаждением (рисунок 2). При этом полимерные покрытия с толщиной слоя от 0,45 до 1,35 мм, по сравнению с образцом без покрытия, на 35...38% повышают демпфирующую способность образцов из серого чугуна СЧ20 и на 42...45% — образцов из стали 20 (см. рисунок 2 *a*).

Для гальванически осажденных металлических никелевых покрытий влияние толщины слоя покрытия на декремент затухания неоднозначно. Как видно из представленной на рисунке 2 *b* диаграммы, при толщине слоя до 10 мкм и свыше 50 мкм демпфирующая способность покрытий снижается на 27 и 5% соответственно. Максимальную демпфирующую способность обеспечивает слой покрытия толщиной от 25 до 35 мкм. По сравнению с образцом без покрытия он способ-



b

Рисунок 1 — Зависимости логарифмического декремента затухания колебаний δ от амплитуды деформации ϵ образцов из серого чугуна СЧ20 (*a*) и стали 20 (*b*) с полимерным покрытием различной толщины: 1 — без покрытия; 2 — с покрытием толщиной 0,45 мм; 3 — с покрытием толщиной 0,90 мм; 4 — с покрытием толщиной 1,35 мм

Figure 1 — Dependences of logarithmic damping decrement of oscillations δ on deformation amplitude ϵ of samples from SCh20 gray cast iron (*a*) and 20 steel (*b*) with polymer coating of various thicknesses: 1 — without coating; 2 — with coating thickness of 0.45 mm; 3 — with coating thickness of 0.90 mm; 4 — with coating thickness of 1.35 mm

ствует увеличению логарифмического декремента затухания колебаний в среднем на 40%.

Однослойные покрытия из меди М1, баббита Б83, а также двухслойные покрытия из меди и баббита с толщиной слоя 4...5 мкм, сформированные методом деформационного плакирования гибким инструментом на поверхности образцов из стали 65Г и 08кп, не способствуют улучшению демпфирования колебаний. Как видно из представленных на рисунке 3 диаграмм, подобные покрытия, по сравнению с образцом без покрытия, снижают декремент затухания колебаний на 12...22% для образцов из стали 65Г (см. рисунок 3 *a*) и на 3...11% — для образцов из стали 08кп (см. рисунок 3 *b*).

В обоих случаях снижение логарифмического декремента затухания колебаний, по-видимому,

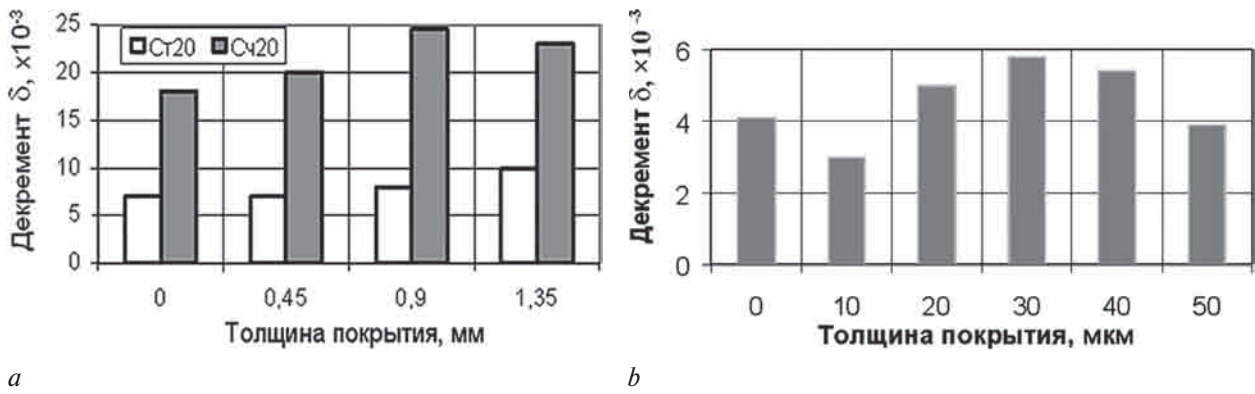


Рисунок 2 — Зависимости логарифмического декремента затухания колебаний δ от толщины полимерных покрытий (a) и металлических покрытий на основе никеля (b)

Figure 2 — Dependences of logarithmic decrement of damping of oscillations δ on thickness of polymer coatings (a) and nickel-based metal coatings (b)

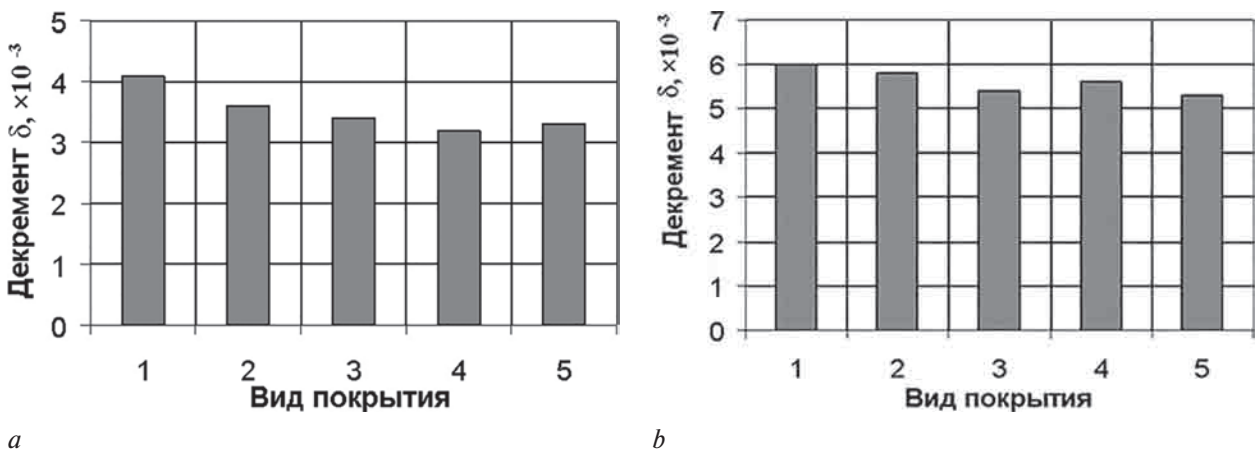


Рисунок 3 — Зависимости логарифмического декремента затухания колебаний δ от вида материала покрытий, сформированных на поверхности образцов из стали 65Г (a) и 08кп (b): 1 — без покрытия; 2 — поверхность обработана щеткой без нанесения покрытия; 3 — покрытие из меди М1; 4 — покрытие из баббита В83; 5 — двухслойное покрытие медь—баббит

Figure 3 — Dependences of logarithmic decrement of damping of oscillations δ on the type of coatings material formed on the surface of samples from 65G (a) and 08KP steel (b): 1 — without coating; 2 — surface is treated with brush without applied coating; 3 — M1 copper coating; 4 — B83 babbitt coating; 5 — double-layer copper-babbitt coating

связано с механическим воздействием инструмента — вращающейся металлической щетки — на поверхностный слой образцов. Кончики ворсинок щетки, вследствие микросоударений с поверхностью образца, деформируют последнюю и осуществляют, таким образом, поверхностное упрочнение — наклеп. В результате сформированный биметаллический поверхностный слой характеризуется повышенной твердостью с полным или частичным отсутствием запаса пластичности, что отрицательно влияет на его демпфирующую способность. Однако, несмотря на это, данные по оценке влияния покрытий на рабочем профиле зубьев зубчатых колес встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32 на уровень шума показывают, что сформированный слой покрытия способствует снижению уровня шума на большинстве частот вращения шпинделя (рисунок 4). На второй ступени встроенного привода (см. рисунок 4 a), в диапазоне частот вращения шпинделя от 270 до 400 min^{-1} , снижение уровня шума составило

1...2 децибела. На первой ступени (см. рисунок 4 b) максимальное снижение уровня шума (до 5 децибел) наблюдалось на частоте вращения шпинделя 1750 min^{-1} . На остальных частотах существенного снижения уровня шума не наблюдалось.

Снижение уровня шума встроенного зубчатого привода станка на большинстве частот вращения шпинделя после нанесения покрытий на рабочий профиль зубьев колес, по-видимому, больше всего связано не с демпфирующей способностью тонкого покрытия из бронзографита, а с улучшением условий контактного взаимодействия соударящихся зубьев, произошедшим благодаря, в том числе, и покрытию. Подобное улучшение связано с тем, что в процессе формирования покрытия ворсом вращающейся щетки сглаживаются микронеровности на рабочей поверхности зубьев, удаляются риски, царапины и др. дефекты, оставшиеся после шлифования и прикатки спаренных колес на обкатных станках, во многих случаях, с добавлением абразивного порошка для достижения требуемого размера пятна контакта [9]. При

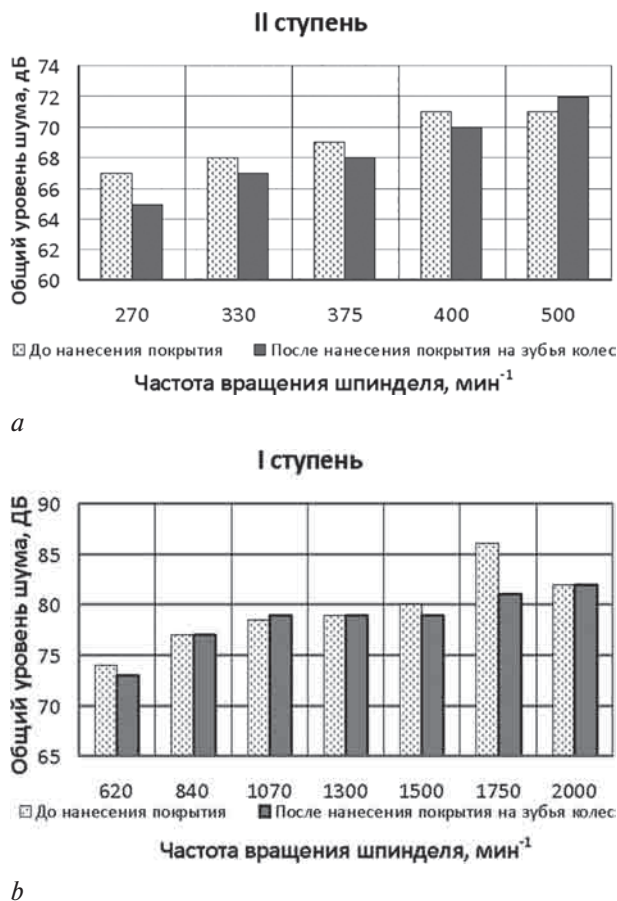


Рисунок 4 — Виброграмма уровня шума II-й (а) и I-й (б) ступени встроенного зубчатого привода шпиндельного узла консольно-фрезерного станка ОШ Ф32 при различных частотах вращения шпинделя

Figure 4 — Vibration record of noise of II (a) I (b) stage of built-in gear drive of spindle unit of knee milling machine OSh F32 at various frequencies of spindle rotation

этом нанесенный на поверхность зуба слой покрытия из мягкого металла, в силу пластического течения под воздействием контактных нагрузок в зацеплении, способствует увеличению пятна контакта и снижению трения скольжения, что в совокупности обеспечивает снижение шума привода.

Заключение. Результаты выполненных исследований по оценке демпфирующей способности металлических и полимерных покрытий показывают, что подобные покрытия могут быть успешно использованы для снижения шума и вибраций различных механических систем, в том числе металлорежущих станков. Установлено, что полимерные покрытия на основе полиэтилентерефталата марки ПЭТФ, с толщиной слоя от 0,45 до 1,35 мм, сформированные газопламенным напылением, на 35...38% повышают демпфирующую способность образцов из серого чугуна СЧ20 и на 42...45% — образцов из стали 20.

Металлические покрытия на основе никеля, с толщиной слоя от 25 до 35 мкм, сформированные гальваническим осаждением, увеличивают логарифмический декремент затухания колебаний в среднем на 40%.

Тонкие металлические однослойные покрытия из меди М1 и баббита Б83, а также двухслойные покрытия медь—баббит, с толщиной слоя 4 мкм, сформированные деформационным плакированием гибким инструментом, не обеспечивают улучшения демпфирующей способности. Декремент затухания колебаний снижается на 12...22% для образцов из стали 65Г и на 3...11% — для образцов из стали 08кп. Однако при нанесении на рабочий профиль зубьев зубчатых колес встроенного привода шпинделя консольно-фрезерного станка ОШ Ф-32 данные покрытия способствуют снижению уровня шума шпиндельного узла на 1...5 децибел, что, по-видимому, связано со спецификой процесса формирования покрытия. Благодаря механическому воздействию ворса вращающейся щетки на поверхность зуба сглаживаются микронеровности на его рабочей поверхности, удаляются риски, царапины и другие дефекты, оставшиеся после шлифования и прикатки спаренных колес на обкатных станках, во многих случаях, с добавлением абразивного порошка. Последующее формирование слоя покрытия из мягкого металла в силу пластического течения под воздействием контактных нагрузок в зацеплении способствует увеличению пятна контакта и снижению трения скольжения, что, в совокупности, обеспечивает снижение шума шпиндельного узла.

Таким образом, данные экспериментальных исследований позволяют заключить, что для снижения шума и вибраций металлорежущих станков целесообразно применение металлических и полимерных покрытий. При этом полимерные покрытия, формируемые газопламенным напылением и отличающиеся возможностью формирования слоев повышенной толщины, предпочтительно наносить на корпусные детали станков (станины, шпиндельные узлы, стойки и др.). Металлические покрытия, с толщиной слоя 4...40 мкм, формируемые гальваническим осаждением и деформационным плакированием гибким инструментом, целесообразно наносить на элементы подвижных кинематических цепей, например, такие, как зубчатые колеса приводных механизмов, поверхности пар трения скольжения и др.

Список литературы

1. Шум. Станки металлорежущие. Допустимые шумовые характеристики: ГОСТ 12.2.107-85. — Введ. 30.06.86 (издание 01.04.2008). — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2008. — 16 с.
2. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки: санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96. — М.: Минздрав России, 1996.
3. Алексеев, С.П. Борьба с вибрациями и шумами в промышленности / С.П. Алексеев. — М., 1969.
4. Месхи, Б.Ч. Улучшение условий труда операторов металлорежущих станков за счет снижения шума в рабочей зоне (теория и практика) / Б.Ч. Месхи. — Ростов-на-Дону: Издат. центр ДГТУ, 2003. — 131 с.

5. Иванов, Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н.И. Иванов. — М.: Логос, 2008. — 423 с.
6. Медведев, А.М. Проектирование акустически оптимальной архитектуры редукторных систем станков / А.М. Медведев, Г.В. Литовко // Ученые записки. — 2013. — № II-1 (14). — С. 64–75.
7. Козочкин, М.П. Методы снижения шума металлорежущих станков и их узлов: Методические рекомендации / М.П. Козочкин. — М.: Машиностроение, 1986. — 68 с.
8. Kensaku, Yanagimoto Sound Radiation from Ventilation Aperture with Circular Thin Air Layer Setting Up Machinery Wall: Attenuation of DFN Radiated from Axial Flow Fan / Yanagimoto Kensaku, Ito Takahiro, Icimiya Ryoichi // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. — 2000. Vol. 66, No. 646. — С. 2075–2081.
9. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. — Т. 1 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 656 с.
10. Чернышев, В.М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов / В.М. Чернышев. — М.: Наука, 2004. — 288 с.
11. Демпфирующие свойства тонких покрытий / М.А. Леванцевич [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. — Донецк: ДонГТУ, 2003. — Вып. 28. — С. 94–98.
12. Берсудский, А.Л. Повышение работоспособности эвольвентных поверхностей зубчатых колес / А.Л. Берсудский // Вестн. машиностроения. — 2005. — № 1. — С. 10–13.
13. Писаренко, Г.С. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем / Г.С. Писаренко, В.В. Матвеев, А.П. Яковлев. — Киев: Наук. думка, 1976. — 86 с.
14. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. — Минск: Технопринт, 2004. — 200 с.
15. Леванцевич, М.А. Улучшение плавности хода подвижных узлов станков формированием антифрикционных покрытий на направляющих скольжения / М.А. Леванцевич // Перспективные технологии / под. ред. В.В. Клубовича. — Витебск: ВГТУ. — 2011. — С. 542–566.

SHELEH Valeriy K., Corresponding Member of NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.
Head of the Department “Mechanical Engineering Technology”¹
E-mail: sheleh_v@tut.by

TSYGANKOV Leonid E.
Director²
E-mail: plant@mzal.by

LEVANTSEVICH Mikhail A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
Leading Researcher of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment³
E-mail: levancev@mail.ru

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.
Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening³
E-mail: mbelotser@gmail.com

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²JSC “Minsk Automatic Lines Plant named after P.M. Masharov”, Minsk, Republic of Belarus

³Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 04 October 2018.

REDUCTION OF NOISE OF SPINDLE UNITS OF METAL CUTTING MACHINES BY COATING APPLICATION ON THE SURFACE BEARING STRUCTURES AND KINEMATIC LINKS

The results of experimental studies of the damping capacity of metal and polymer coatings are presented formed by methods of gas-flame spraying, deformation cladding with a flexible tool and galvanic deposition. The logarithmic damping decrement was chosen as a criterion for evaluating the damping capacity. It is established that polymer coatings based on PET-grade polyethylene terephthalate (TS 6-06-S199-86), formed by gas-flame spraying, and nickel-based metal coatings, obtained by galvanic deposition, contribute to an increase of damping capacity in 35...45%. Thin coatings based on copper and babbitt, with a layer thickness of 4 μm, formed by deformation cladding with a flexible tool, slightly reduce the damping capacity, however, when applied to the working tooth profile of gears, an integrated spindle node of the console milling machine OSh F-32 helps reducing its noise by 1...5 decibels.

Keywords: gas-flame spraying, galvanic deposition, deformation cladding, flexible tool, rotating metal brush, coating, noise, vibration

References

1. State Standard 12.2.107-85. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Shum. Stanki metallorezhushchie. Dopustimye shumovye kharakteristiki* [Occupational safety standards system. Noise. Metal-cutting machines. Permissible noise performance]. Minsk, Mezhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2008. 16 p.
2. Sanitary Norms SN 2.2.4/2.1.8.562-96. *Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloy zastroyki* [Noise at workplaces, in residential, public buildings and in residential areas]. Moscow, Minzdrav Publ., 1996. 9 p.
3. Alekseev S.P. *Borba s vibratsiyami i shumami v promyshlennosti* [Vibrations and noise control in industry]. Moscow, Ekonomika Publ., 1969. 56 p.
4. Meskhi B.Ch. *Uluchshenie usloviy truda operatorov metallo-rezhushchikh stankov za schet snizheniya shuma v rabochey zone (teoriya i praktika)* [Improving the working conditions of cutting machines operators by reducing noise in the work area (theory and practice)]. Rostov-on-Don, Izdatelskiy tsentr DGTU Publ., 2003. 131 p.
5. Ivanov N.I. *Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borby s shumom* [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]. Moscow, Logos Publ., 2008. 423 p.
6. Medvedev A.M., Litovko G.V. *Proektirovanie akusticheskoi optimalnoy arkhitektury reduktornykh sistem stankov* [Designing the acoustically optimal architecture of the gearbox systems of machine tools]. *Uchenye zapiski* [Scientific notes], 2013, no. 2–1(14), pp. 64–75.
7. Kozochkin M.P. *Metody snizheniya shuma metallorezhushchikh stankov i ikh uzlov: Metodicheskie rekomendatsii* [Methods to reduce the noise of cutting machine tools and their components: Methodical recommendations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 68 p.
8. Yanagimoto Kensaku, Ito Takahiro, Icimiya Ryoichi. Sound Radiation from Ventilation Aperture with Circular Thin Air Layer Setting Up Machinery Wall: Attenuation of DFN Radiated from Axial Flow Fan. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, 2000, vol. 66, no. 646, pp. 2075–2081.
9. Borisov V.B., Borisov E.I., Vasilev V.N., et. al. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroytelya. Tom 1* [Reference book of technologist and mechanical engineer. Vol. 1]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 656 p.
10. Chernyshev V.M. *Dempfirovaniye kolebaniy mekhanicheskikh sistem pokrytiyami iz polimernykh materialov* [Damping of oscillations of mechanical systems with coatings from polymeric materials]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 288 p.
11. Levantsevich M.A., Lukashik A.A., Ishin N.N., Bodrykh T.I., Stepanova L.I. *Dempfiruyushchie svoystva tonkikh pokrytiy* [Damping properties of thin coatings]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya* [Advanced technologies and systems of mechanical engineering]. Donetsk, DonGTU Publ., 2003, issue 28, pp. 94–98.
12. Bersudskiy A.L. *Povyshenie rabotosposobnosti evolventnykh poverkhnostey zubchatykh koles* [Improving the performance of involute surfaces of gears]. *Vestnik mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], 2005, no. 1, pp. 10–13.
13. Pisarenko G.S., Matveev V.V., Yakovlev A.P. *Metody opredeleniya kharakteristik dempfirovaniya kolebaniy uprugikh sistem* [Methods for determining the characteristics of the damping of vibrations of elastic systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976. 86 p.
14. Belotserkovskiy M.A. *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplammennogo napyleniya antifriktsionnykh pokrytiy* [Technologies of activated gas-flame spraying of antifriction coatings]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 200 p.
15. Levantsevich M.A. *Uluchshenie plavnosti khoda podvizhnykh uzlov stankov formirovaniem antifriktsionnykh pokrytiy na napravlyayushchikh skolzheniya* [Improving the smoothness of the moving parts of machine tools by the formation of antifriction coatings on sliding guides]. *Perspektivnye tekhnologii* [Promising technologies], 2011, pp. 542–566.