

DETERMINATION OF THE CONDITIONS MAXIMUM MACHINABILITY OF HARD-TO-PROCESS MATERIALS DURING TURNING BASED ON VIBRATION PARAMETERS

E. V. Artamonov ¹, V. M. Kostiv ², D. V. Vasilyev ¹, V. V. Voronin ^{1, 2a}

¹ Tyumen Industrial University (TIU)

² PJSC "Tyumen engine builders"

^a vladislavalbus@gmail.ru

Submitted 2022, April 28

Abstract. The paper puts forward a scientific assumption about the relationship of the vibration of the cutting tool with the parameters of the process of turning metals, namely, the mean square value of vibration acceleration with the cutting speed and the type of chips in the processing of heat-resistant and corrosion-resistant materials on the example of the Alloy601 and steel AISI 321. The possibility of determining the conditions of maximum machinability by vibration of the cutting tool has been experimentally proven.

Keywords: vibration; cutting tool; turning; heat-resistant alloy; corrosion-resistant steel.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТОЧЕНИИ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ

Е. В. Артамонов ¹, В. М. Костив ², Д. В. Васильев ¹, В. В. Воронин ^{1, 2a}

¹ ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ)

² ПАО «Тюменские моторостроители»

^a vladislavalbus@gmail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022

Аннотация. Выдвинуто и экспериментально проверено научное предположение о взаимосвязи вибрации режущего инструмента с параметрами процесса токарной обработки металлов, а именно, среднеквадратичного значения главной составляющей виброускорения со скоростью резания, температурой в зоне резания и видом сходящей стружки при обработке жаростойких, жаропрочных и коррозионностойких материалов на примере сплава ХН60ВТ и стали 12Х18Н10Т. Экспериментально доказана возможность определения условий максимальной обрабатываемости по вибрации режущего инструмента в процессе токарной обработки.

Ключевые слова: вибрация; режущий инструмент; токарная обработка; точение; жаростойкий сплав; коррозионностойкая сталь.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для эффективного решения задач импортозамещения в рамках машиностроительного производства задача оптимизации условий резания при обработке деталей из вновь создаваемых труднообрабатываемых материалов остается по-прежнему актуальной.

Исследования, направленные на разработку наименее затратных и быстрых методов определения оптимальных параметров процесса резания при токарной обработке металлов, приведены в работах [1–7].

При обработке деталей из труднообрабатываемых материалов первоочередным признаком оптимального выбора параметров режима резания служит минимальный износ инструмента [8, 9]. При точении различных материалов необходимо учитывать их назначение, особенно рабочий диапазон температур. Высокая термостойкость материала в одних условиях и охрупчивание – в других, определяет, что эксплуатировать детали, изготовленные из этих материалов, необходимо в первом случае, а обрабатывать – во втором. Процесс формообразования деталей резанием следует проводить при температуре максимальной обрабатываемости материала и максимальной работоспособности инструментального твердого сплава. При выполнении условия равенства температур максимальной обрабатываемости материала и максимальной работоспособности инструментального твердого сплава ожидается наибольший путь резания.

В работе [8] сформулировано положение, что оптимальным скоростям резания при различных комбинациях скорости резания, подачи и глубины резания соответствует постоянная оптимальная температура в зоне резания. Проверка выдвинутого положения заключалась в построении зависимостей относительного износа $h_{\text{он}}$ от скорости резания V при разных условиях резания. Скорости резания подбирались, исходя из возможности выявления минимального относительного износа инструмента, и, следовательно, оптимальной скорости резания.

При резании с различными подачами, глубинами резания и геометрическими параметрами инструмента оптимальная скорость резания, соответствующая минимальному размерному износу, может колебаться весьма существенно, однако, оптимальная температура в зоне резания остается при этом постоянной.

Поиск оптимальных температур осложнен рядом факторов, в том числе, трудоемкостью экспериментов и необходимостью модернизации оборудования для измерения и контроля температуры в зоне контакта режущего инструмента и заготовки непосредственно в процессе резания. Значительные колебания температуры в зоне резания определяются изменением контактных процессов и коэффициентов трения по передней и задней поверхностям инструмента. Также существенное влияние оказывают теплофизические свойства материала заготовки и резца, например, теплопроводность, характеризующая способность материала отводить тепло. Поиск косвенных методов контроля температуры в первую очередь приводит к тому, что наибольшее влияние на величину нагрева в зоне резания оказывает скорость резания, в меньшей степени, подача и еще меньше – глубина резания [8]. Однако, прямое измерение скорости резания невозможно, ее величина рассчитывается косвенно, исходя из оборотной частоты и размеров заготовки. В области экспериментального исследования процесса резания наиболее распространено измерение составляющих силы резания: главной или вертикальной P_z , радиальной силы P_y и силы подачи P_x .

Известен метод определения оптимальной скорости резания, описанный С. С. Силиным в работе [9], который заключается в измерении главной составляющей силы резания при токарной обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов с увеличением скорости резания до тех пор, пока не завершится интенсивное уменьшение величины составляющей P_z с выходом на квазистационарное значение. Момент стабилизации функции $P_z(V)$ или наступление минимальных значений при разных подачах показывает один диапазон оптимальной температуры резания, что является критерием оптимальности протекания процесса резания. При

проведении такого рода опытов необходимо сохранять постоянными геометрию инструмента, подачу S и глубину резания t .

Прямое измерение силы резания осуществляется чаще всего электрическими динамометрами, построенными на тензодатчиках, преобразующих деформацию упругого элемента в изменение электрического сопротивления. Однако, для установки динамометра необходимо внести существенные конструктивные изменения в технологическую систему станка, а в случаях станков с ЧПУ установка классического динамометра невозможна из-за конструкции барабана резцедержателя. Также, динамометры имеют существенный недостаток при получении спектра колебаний силы резания, поскольку имеют небольшой линейный диапазон рабочих частот и низкие собственные резонансные частоты, но отлично подходят для измерения квазистатических нагрузок. Косвенный метод измерения силы резания заключается в использовании ее корреляции с током потребления привода, так как сила резания создает крутящий момент на валу и несет основную долю нагрузки на двигатель. Современные системы ЧПУ позволяют непрерывно получать данные и токах приводов по всем осям в процессе резания и контролировать, таким образом, необходимую на стружкообразование мощность. Не нашел же применения данный метод ввиду чрезвычайно низкой чувствительности, поскольку первоначальное его назначение заключается в защите от перегрузок и предупреждении нештатных ситуаций. Очевидно, с экономической точки зрения, оптимальным параметрам процесса резания будет соответствовать минимальная мгновенная мощность приводов, но и с позиции минимизации износа инструмента меньшим нагрузкам на приводы будут соответствовать меньшие значения составляющих силы резания.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ

В работе [2] показана корреляция износа инструмента по задней поверхности и общего уровня вибрации режущего инструмента. Наличие такой зависимости говорит о возможности определять оптимальные параметры процесса резания по вибрации РИ, которая, в свою очередь, связана и с температурно-скоростными факторами [10], и механическими свойствами материалов заготовки и РИ [11]. В работах [1–7] установлено, что вибрация РИ несет оперативную информацию о процессе резания. Как и силу резания, вибрацию можно представить в виде трех проекций на оси Z , X , Y – A_z , A_x и A_y , соответственно. Осцилляции в направлении вертикальной оси вызваны двумя факторами, согласно равенству [9]:

$$P_z = R_z + F_z, \quad (1)$$

где P_z – главная составляющая силы резания; R_z – главная составляющая силы стружкообразования; F_z – главная составляющая силы трения, действующей на заднюю поверхность.

Вибрация возбуждается переменной силой со стороны стружки – вынужденные колебания – и переменным трением – автоколебания. Трение носит сложный переменный характер [8, 11]. Поскольку, в соответствии со вторым законом Ньютона, ускорение связано с силой как следствие и причина, можно выражение (1) записать в виде:

$$A_z = A_{rz} + A_{fz}, \quad (2)$$

где A_z – главная составляющая виброускорения режущего инструмента; A_{rz} – совокупность гармоник, вносимых в спектр процессом стружкообразования; A_{fz} – совокупность гармоник, вносимых в спектр переменной силой трения, действующей на заднюю поверхность.

Таким образом, вибрация режущего инструмента выступает в качестве комплексного диагностического параметра, содержащего данные о разных аспектах процесса резания, а полу-

чаемая по вибрации информация определяется способом регистрации сигнала и методом его анализа.

Зависимость вида стружки от температуры была описана в работе [10], а зависимость спектрального состава колебаний РИ от вида стружки была показана в работах [12, 13]. Температура, как определяющий параметр процесса резания, влияет на изменение механических характеристик обрабатываемого материала, что обуславливает вид сходящей стружки. Анализ данных о механических характеристиках труднообрабатываемых сталей и сплавов показал, что у ряда материалов наблюдается минимум относительного сужения и относительного удлинения в определенном диапазоне высоких температур – это явление носит название «высокотемпературное охрупчивание» (рис. 1), при этом происходит изменение вида стружки из суставчатой в элементную.

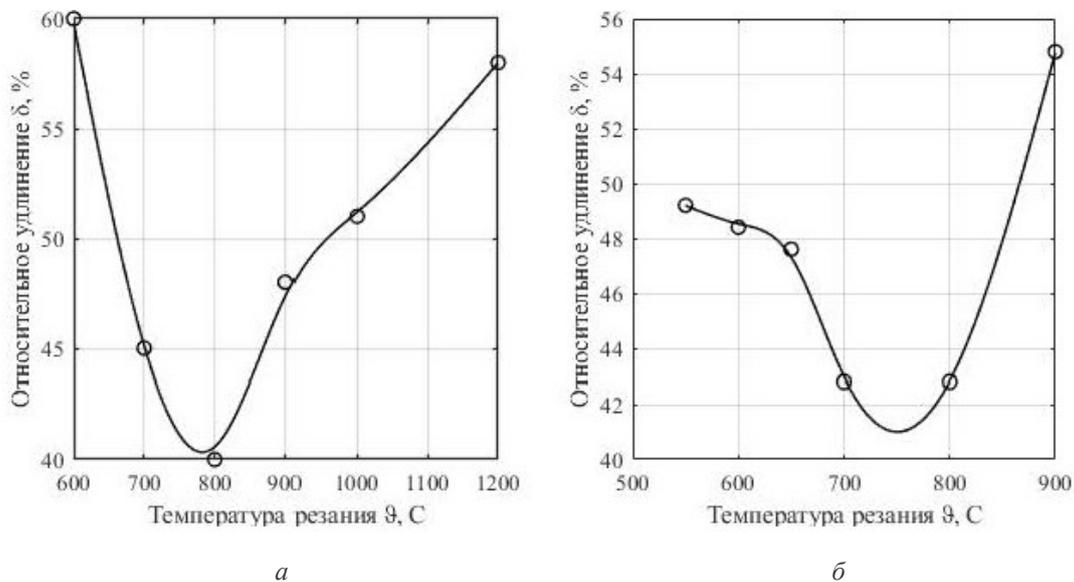


Рис 1. Зависимость относительного сужения от температуры испытания:
а – для сплава XH60VT; б – для стали 12X18H10T

При достижении скорости резания, обеспечивающей температуру в зоне резания, достаточную для охрупчивания материала, коэффициент сплошности k , коэффициент обрабатываемости K_o , нагрузка на шпиндель S_1 , относительный износ по задней поверхности $h_{\text{опз}}$ ведут себя, как показано на рис. 2 [10].

Следовательно, в области охрупчивания материала также следует ожидать изменение составляющих силы резания. Комплексное изменение указанных выше физико-механических характеристик и параметров процесса резания приведет к изменению вибрации при резании, а именно, к качественному и количественному изменению спектрального состава главной составляющей виброускорения режущего инструмента. На основании изложенного выше в работе выдвинуто научное предположение о взаимосвязи вибрации РИ с параметрами процесса токарной обработки металлов, а именно, среднеквадратичное значение (СКЗ) виброускорения со скоростью резания и видом стружки при обработке жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких материалов.

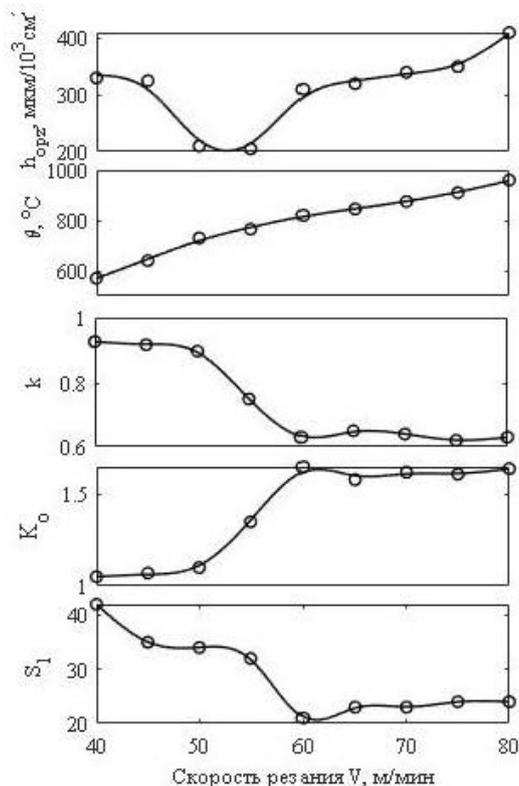


Рис. 2. Зависимость коэффициента сплошности k , нагрузки на шпиндель S_1 , относительного износа по задней поверхности $h_{опз}$, температуры резания θ , коэффициента обрабатываемости $K_о$, от скорости резания V при обработке стали 10X11H3T3MP

Первым диагностическим параметром в исследовании вибрации является СКЗ сигнала во временной области (3), поскольку оно пропорционально энергии колебательного процесса, а, следовательно, степени разрушающего воздействия вибрации.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}}, \quad (3)$$

где RMS – СКЗ, мВ; N – размер выборки, шт.; y_i – i -й отсчет выборки, мВ.

Анализ именно виброускорения обусловлен тем, что данный параметр непосредственно связан с силой, вызвавшей осцилляцию, то есть характеризует силовое динамическое взаимодействие колеблющихся масс внутри системы. Вынуждающая сила в этом случае – главная составляющая силы резания P_z , создающая момент на приводном валу станка, обуславливающий необходимую мощность на стружкообразование.

Использование СКЗ виброускорения предпочтительно для работы в режиме реального времени, то есть при непрерывном отслеживании вибрации в процессе резания с использованием систем автоматического управления, например, скоростью резания с дополнительным обеспечением защиты оборудования по превышению норм вибрации. Такая система могла бы в автоматическом режиме определять оптимальную скорость резания путем фиксации скорости, при которой было достигнуто искомое (минимальное) значение СКЗ и поддерживать ее, параллельно обеспечивая защиту оборудования от нештатных ситуаций типа разрушения РИ или его критический износ. Такой контроль не сложно алгоритмизировать и адаптировать под разные технологические системы станков. Актуальность такой системы обусловлена зна-

чительным колебанием физико-механических параметров материалов в состоянии поставки, так и непосредственно в процессе обработки в широком температурном диапазоне резания металлов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментальной проверки выдвинутого научного предположения были выбраны труднообрабатываемые материалы, широко применяемые в машиностроительной отрасли: коррозионностойкая сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т и жаростойкий жаропрочный сплав на никелевой основе ХН60ВТ. Продольное точение осуществлялось на станке с ЧПУ Victor VTurn 26 пластинами производства Iscar SNMG 120408-TF.

Данные о вибрации РИ получены с помощью пьезоакселерометра с линейным диапазоном в полосе, пропускающей до 10 кГц. Первичный сигнал был оцифрован с частотой дискретизации 50 кГц, применен антиалиасинговый фильтр, ресемплирование и последующая фильтрация с частотой среза 12 кГц.

Зависимость СКЗ виброускорения от скорости резания при точении стали 12Х18Н10Т представлены на рис. 3, сплава ХН60ВТ – на рис. 4.

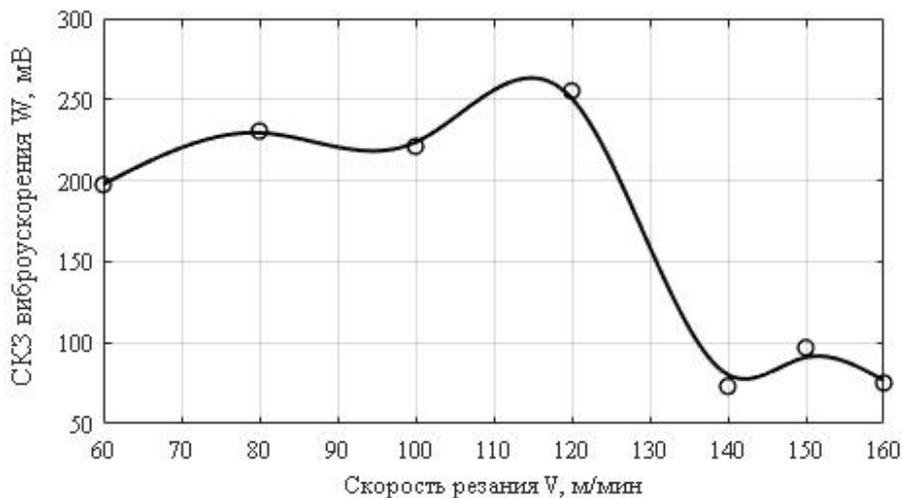


Рис. 3. Зависимость СКЗ виброускорения от скорости резания при точении стали 12Х18Н10Т.
Токарная пластина Iscar SNMG 120408-TF, $S = 0,1$ мм, $t = 1$ мм

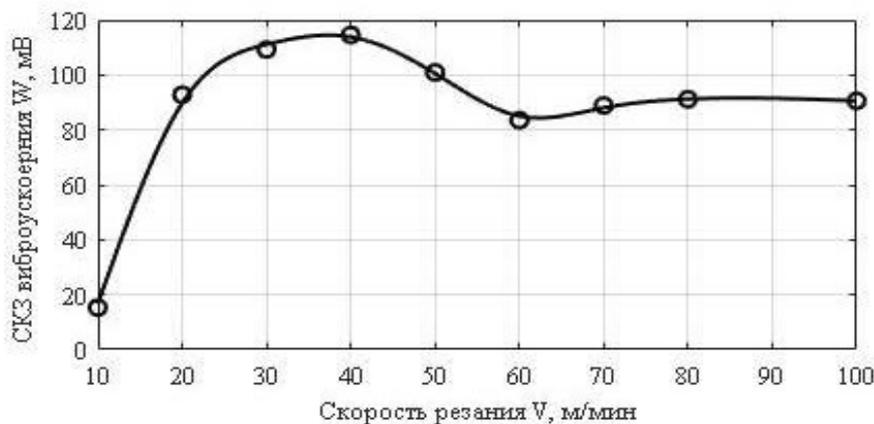


Рис. 4. Зависимость СКЗ виброускорения от скорости резания при точении сплава ХН60ВТ.
Токарная пластина Iscar SNMG 120408-TF, $S = 0,1$ мм, $t = 1$ мм

Значение СКЗ главной составляющей виброускорения в обоих случаях имеет ярко-выраженный максимум и следующий за ней минимум, причем, существенное снижение происходит при достижении скоростей резания, называемых оптимальными в работах А. Д. Макарова [8] и С. С. Силина [9]. Так, для стали 12Х18Н10Т оптимальная скорость составляет свыше 140 м/мин (Iscar 100–280 м/мин), для сплава ХН60ВТ – 60 м/мин (Iscar 50–80 м/мин). Таким образом, данные скорости входят в диапазоны, рекомендуемые производителем используемых токарных пластин Iscar.

Кроме того, достоверность полученных данных для 12Х18Н10Т подтверждается сравнением СКЗ виброускорения (рис. 3) и средней амплитуды спектра (рис. 5) с температурой максимальной обрабатываемости по данным работы [10] – 780–800 °С. Соответствие вида стружки, скорости резания, температуры резания, СКЗ виброускорения и средней амплитуды спектра приведены в табл. 1.

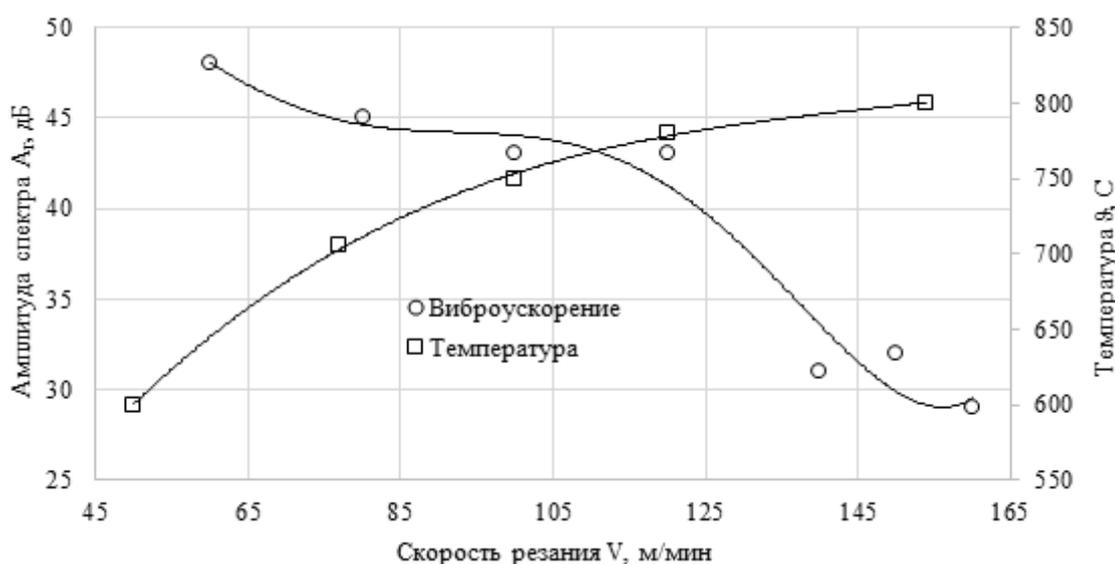


Рис 5. Зависимости средней амплитуды спектра главной составляющей виброускорения режущего инструмента и температуры в зоне резания при продольном точении стали 12Х18Н10Т. Токарная пластина Iscar SNMG 120408-TF, $S = 0,1$ мм, $t = 1$ мм

Таблица 1. Корреляция вида стружки и параметров процесса резания

№	Вид стружки 12Х18Н10Т	Скорость V, м/мин	Температура θ, °С	СКЗ W, мВ	Амплитуда спектра Ав, дБ
1	Сливная	77	706	225	47
2	Сливная	100	750	220	43
3	Суставчатая	120	780	250	43
4	Элементная	154	830	100	31
5	Элементная	194	900	120	30

На основании вышеизложенного можно заключить, что оптимальная скорость резания может быть определена по главной составляющей виброускорения режущего инструмента. При увеличении скорости резания наступает момент изменения вида стружки с суставчатой в элементную, сопровождающийся значительным снижением и стабилизацией уровня вибрации, как по СКЗ (рис. 3), так и по средней амплитуде спектра (рис. 5). Для упрощения вычисле-

ний и алгоритмизации процесса логично использовать среднеквадратичное значение сигнала во временной области вместо анализа спектра. Момент начала стабилизации параметров вибрации на минимальном уровне соответствует минимальному значению главной составляющей силы резания и, таким образом, определяет оптимальную скорость резания. Соответствующая скорость может считаться скоростью максимальной обрабатываемости данного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При токарной обработке стали 12Х18Н10Т и сплава ХН60ВТ с увеличением скорости резания при прочих равных условиях имеет место резкое уменьшение СКЗ главной составляющей виброускорения при достижении некоторой скорости, совпадающей с оптимальной для каждого материала. Данная скорость резания обеспечивает условия максимальной обрабатываемости материала.

2. Использование СКЗ виброускорения в качестве диагностического параметра процесса резания может быть положено в основу системы автоматизированного регулирования скорости резания в процессе токарной обработки, поскольку динамическое отслеживание данного параметра не сопряжено с критическими трудностями и может обеспечить минимальную временную задержку при регулировании.

3. Система, сформулированная в пункте № 2 заключения, может также осуществлять защиту от аварийных ситуаций типа разрушения РИ или ее критического износа, а также любых других ситуаций, вызывающих резкое повышение СКЗ виброускорения технологической системы станка на режущем инструменте.

4. Использование системы автоматизированного управления с СКЗ виброускорения в качестве диагностического параметра возможно, как на станках с ЧПУ, так и на универсальных станках с применением частотного регулятора для главного привода с минимальными конструктивными изменениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методика** обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента / А. В. Анцев [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 4. С. 291–296. [A. V. Antsev, et al., “The method of processing vibration signals for evaluating the cutting tool state”, (in Russian), in *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*, no. 4, pp. 291-296, 2020.]
2. **Анцев А. В., Янов Е. С., Данг Х. Ч.** Зависимость вынужденных колебаний машинной части технологической системы в процессе резания от износа режущего инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 6. С. 263–272. [A. V. Antsev, E. S. Yanov, H. Ch. Dang, “Dependence of forced vibrations of the machine part of the technological system in the process of cutting on wear of the cutting tool”, (in Russian), in *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*, no. 6, pp. 263-272, 2019.]
3. **Исследование** динамических процессов с использованием анализа форм частотных декомпозиций сигнала на основе метода Прони // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 6 (75). С. 126–136. [S. S. Gavryushin, et al, “Investigation of dynamic processes using analysis forms of frequency decomposition of the signal based on the Prony’S method”, (in Russian), in *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. Estastvennie nauki*, no. 6 (75), pp. 126-136, 2017.]
4. **Досько С. И., Утенков В. М., Молчанов А. А.** Возможности использования параметрического спектрального анализа для идентификации режима автоколебаний в станках // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 12 (73). С. 74–78. [S. I. Dosko, V. M. Utenkov, A. A. Molchanov, “Potentialities of parametric spectral analysis use for identification of self-oscillation mode in machines”, (in Russian), in *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, no. 12 (73), pp. 74-78, 2018.]
5. **Козочкин М. П.** Особенности вибраций при резании материалов // СТИН. 2009. № 1. С. 29–35. [M. P. Kozochkin, “Peculiarities of vibrations when cutting materials”, (in Russian), in *STIN*, no. 1, pp. 29–35, 2009.]
6. **Мониторинг** состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях / М. П. Козочкин [и др.] // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 8 (61). С. 56–62. [M. P. Kozochkin, et al., “Monitoring of process equipment for industrial enterprises”, (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 8 (61), pp. 56-62, 2013.]
7. **Исследование** влияния интенсивности автоколебаний на формоустойчивость режущей кромки твердосплавного инструмента / В. В. Постнов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 43–49. [V. V. Postnov, et al., “Influence research intensity of self-oscillations on form resistance the cutting edge of firm alloy tool”, (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 14, no. 1 (36), pp. 43-49, 2010.]

8. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с. [A. D. Makarov, *Optimization of cutting processes*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1976.]

9. **Силин С. С.** Метод подобия при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с. [S. S. Silin, *Similarity method for metal cutting*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1979.]

10. **Формирование** условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов на основе высокотемпературного охрупчивания при резании: монография / Е. В. Артамонов [и др.]; под общ. ред. М. Х. Утешева. Тюмень: ТИУ, 2016. 162 с. [E. V. Artamonov, et al., *Formation of conditions for maximum machinability of heat-resistant materials based on high-temperature embrittlement during cutting: monograph*, (in Russian). M. Kh. Utesheva (ed.). Tyumen: TIU, 2016.]

11. **Жарков И. Г.** Вибрация при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. 184 с. [I. G. Zharkov, *Vibration during processing with a blade tool*, (in Russian). Leningrad: Mashinostroenie. Leningradskoo otdelenie, 1986.]

12. **Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Воронин В. В.** Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. № 24 (4). С. 18–28. [E. V. Artamonov, D. V. Vasiliev, V. V. Voronin, "Diagnostics of turning metal cutting by means of analysis of vibrational parameters", (in Russian), in *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 24 (4), pp. 18-28, 2020.]

13. **Артамонов Е. В., Воронин В. В., Помигалова Т. Е.** Исследование колебаний главной составляющей силы резания при токарной обработке // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 5–10. [E. V. Artamonov, V. V. Voronin, T. E. Pomigalova, "Study of oscillations of the main component of the cutting force during turning", (in Russian), in *Omskij nauchny'j vestnik*, no. 6 (180), pp. 5-10, 2021.]

ОБ АВТОРАХ

АРТАМОНОВ Евгений Владимирович, зав. каф. «Станки и инструменты» ТИУ, проф. Д-р техн. наук по технологии и оборудованию механической и физико-технической обработки (ТПУ, 2003). Иссл. в обл. повышения работоспособности сборных режущих инструментов и определения условий максимальной обрабатываемости материалов.

КОСТИВ Владимир Михайлович, гл. контроллер ПАО «Тюменские моторостроители». Канд. техн. наук по технологии и оборудованию механической и физико-технической обработки (ТИУ, 2002).

ВАСИЛЬЕВ Дмитрий Вячеславович, доц. каф. «Станки и инструменты» ТИУ. Канд. техн. наук по технологии и оборудованию механической и физико-технической обработки (ТИУ, 2015).

ВОРОНИН Владислав Вадимович, вед. инж. гр. АСУ испытательного цеха ПАО «Тюменские моторостроители». Дипл. магистр технической физики (ТГУ, 2019).

ARTAMONOV, Evgeniy Vladimirovich, Head of the Dept. of Machines and tools TIU, Prof. Dr. of Tech. Sci on Technology and Equipment for Mechanical and Physical-Technical Processing (Tomsk Polytechnic Univ., 2003).

KOSTIV, Vladimir Mikhailovich, Chief Controller of PJSC "Tyumen Motor Builders". Cand. of Tech. Sci. on Technology and Equipment for Mechanical and Physical-Technical Processing (Tyumen Industrial Univ., 2002).

VASILYEV, Dmitry Vyacheslavovich, Assoc. Prof., Dept. of Machines and tools TIU. Cand. of Tech. Sci. on Technology and Equipment for Mechanical and Physical-Technical Processing (Tyumen Industrial Univ., 2015).

VORONIN, Vladislav Vadimovich, leading engineer gr. Automated Systems of PJSC "Tyumen Motor Builders". Dipl. master of technical physics (Tyumen State Univ., 2019).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 4-12, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).