

## Влияние параметров резания на вибрационное состояние станка и шероховатость обработанных поверхностей при механообработке

Д.П. Алейников<sup>1а</sup>, А.В. Лукьянов<sup>2б</sup>, П.Н. Костин<sup>3с</sup>

<sup>1</sup> Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел РФ, Лермонтова, 110, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>а</sup> aleynikov@istu.edu, <sup>б</sup> loukian@inbox.ru, <sup>с</sup> kostin95pavel@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9127-0713>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6590-7987>

Статья поступила 27.08.2021, принята 15.09.2021

*Статья посвящена исследованию вибрационных процессов металлообрабатывающего оборудования. В ходе исследования изучаются динамические явления, возникающие при обработке металлов в данной сложной динамической системе с целью последующего управления режимами резания, которые минимизируют сопутствующие колебания и вибрации. В статье рассматриваются результаты выполнения исследования по определению влияния параметров резания (скорости резания  $V_c$ , подачи на зуб  $F_z$ , глубины резания  $A_p$  и ширины резания  $A_e$ ) на вибрационное состояние станка и шероховатость обработанных поверхностей при выполнении технологической операции фрезерования. При исследовании использовались методы планирования и статистической обработки результатов эксперимента. Установлена зависимость параметров среднеквадратических значений виброускорения от режимов резания. Одним из важнейших критериев качества механообработки заготовок фрезерованием является шероховатость обработанных поверхностей. Шероховатость обработанных поверхностей определяет эксплуатационные свойства изделий, к которым можно отнести усталостную прочность, коррозионную стойкость и общий ресурс работы изготавливаемых объектов. В машиностроительной практике достаточное количество исследований посвящено изучению влияния режимов обработки на шероховатость обработанных поверхностей. В настоящее время рост вычислительных возможностей современной измерительной аппаратуры и программного обеспечения позволяет исследовать пространственные вибрации оборудования как дополнительный существенный фактор, имеющий взаимовлияние с качеством механообрабатываемых операций. Измерение пространственных вибрационных параметров при работе обрабатывающих центров позволяет повысить качество обработки деталей и предотвратить работу дорогостоящего станочного оборудования при опасных динамических нагрузках, а также обеспечивает возможность перехода от планово-диагностического к обслуживанию по фактическому состоянию.*

**Ключевые слова:** износ режущих кромок фрез; вибрация инструмента; диагностика состояния фрез по вибрации.

## Cutting data effect on machine tool vibrational state and surface roughness when machining

D.P. Aleynikov<sup>1а</sup>, A.V. Lukyanov<sup>2б</sup>, P.N. Kostin<sup>3с</sup>

<sup>1</sup> East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 110, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> National Research Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>а</sup> aleynikov@istu.edu, <sup>б</sup> loukian@inbox.ru, <sup>с</sup> kostin95pavel@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9127-0713>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6590-7987>

Received 27.08.2021, accepted 15.09.2021

*The article is devoted to the study of vibration processes of metal-removal equipment. In the course of the study, the dynamic phenomena arising in the metal processing in this complex dynamic system have been investigated for the purpose of further control of cutting modes that minimize the accompanying oscillations and vibrations. This article presents the results of studying the dependence of the roughness parameters on the vibration of the spindle assembly and processing modes in the milling operation. Planning techniques and experimental statistic were used in our investigation. The dependence of vibration acceleration root-mean square parameters (RMS parameters) on cutting set modes was determined. Compliance of the roughness of the processed surfaces with the established tolerances is one of the main criteria for their quality. Roughness affects the durability, fatigue strength and corrosion resistance of mating parts. For metal alloys, the effect of cutting conditions on surface roughness has been well studied. However, the regularity of the change in roughness depending on vibration and processing modes has been studied less. Separate experimental studies of vibration and roughness at various processing modes have shown that the cutting speed and feed per tooth have a significant effect on these response functions. Monitoring of vibration parameters when machining centres operating allows improving the quality of parts processing and preventing expensive machine operating under dangerous dynamic load. The obtained results contribute to the increase in*

*the functionality of the monitoring and diagnostic systems of the machine equipment, significantly increase the efficiency of the machine tools and enable the transition from the scheduled diagnostic to the actual service.*

**Keywords:** wear of cutting edges of milling cutters, tool vibration, vibration diagnostics of mills.

**Введение.** Конструкции механообрабатывающих центров характеризуются статической жесткостью (склонностью к упругому перемещению инструмента относительно заготовки под действием составляющих сил резания  $P$ ) и динамической податливостью (склонностью к перемещению от колебаний, вызванных возмущающей периодической силой резания) [2–7]. Последняя характеристика отражает важное свойство, состоящее в том, что деформации в станке зависят не только от величины действующих при обработке сил, но и от частотных составляющих этих колебаний. При совпадении частот этих воздействий с частотой собственных колебаний станка и его узлов возникают значительные и опасные резонансные явления. Снижается точность и сокращается срок службы станка в целом, его подшипников и инструмента, повышается шероховатость обработки [1].

Одним из важнейших критериев качества обработанных поверхностей является обеспечение соответствия полученной в результате механообрабатывающих операций шероховатости поверхностей установленным допускам. Шероховатость обработанных поверхностей определяет эксплуатационные свойства изделий, к ним можно отнести усталостную прочность, коррозионную стойкость и общий ресурс работы изготавливаемых объектов [9; 10; 11–15]. В машиностроительной практике достаточное количество исследований посвящено изучению влияния режимов обработки на шероховатость обработанных поверхностей, однако только в настоящее время рост вычислительных возможностей современной измерительной аппаратуры и программного обеспечения позволяет исследовать пространственные вибрации оборудования как дополнительный существенный фактор, имеющий взаимовлияние с качеством механообрабатывающих операций [16]. Наиболее явно это проявляется при высокоскоростном и высокопроизводительном фрезеровании алюминиевых сплавов, так как процесс резания при этом выполняется на высоких частотах вращения шпинделя и с большими динамическими нагрузками [17]. Следовательно, возрастает риск возникновения упомянутых выше резонансных колебаний [18]. Применение на указанных операциях дорогостоящих обрабатывающих центров и современного режущего инструмента не решает указанную проблему. Повышение скоростей вращения шпинделей современных обрабатывающих центров в сочетании с увеличением подач на зуб неизбежно сопряжено с нелинейным увеличением центробежных динамических сил.

В свою очередь, правильно назначенные параметры обработки обеспечивают стабильное резание, позволяют достичь максимальной производительности процесса в сочетании со значительным экономическим эффектом [19].

Ряд исследований посвящен изучению механизма возникновения вибраций при резании, в частности при фрезеровании [20; 21]. Но они, как правило, сосредоточены на процессе резания при недостаточном внимании к динамике станка и оценке последствий высоких вибраций на качество обработки и ресурс оборудования.

*Целью настоящего исследования* является обоснование эмпирической регрессионной модели, позволяющей описывать влияние режимов обработки на вибрационное состояние и параметры шероховатости обработанных поверхностей. Данные исследования позволят более детально изучить природу взаимовлияния динамических характеристик обрабатываемого центра и режимов резания с качеством механообработки.

**Эксперимент.** Экспериментальная часть включала в себя работы по определению взаимовлияний режимов резания на вибрационные составляющие колебаний обрабатываемого центра DMC 635V и шероховатость обработанных поверхностей. Исследование проводилось в соответствии с методиками планирования эксперимента. В качестве модели планирования эксперимента была выбрана дробная четырехфакторная схема Бокса – Бенкена с тремя уровнями [8; 11]. Наиболее значимыми параметрами, влияющими на шероховатость и вибрационное состояние станков, являются скорость, подача на зуб, ширина и глубина резания, которые и были выбраны в качестве исследуемых факторов при проведении эксперимента.

Эксперимент включал следующие этапы: кодирование факторов, составление плана матрицы эксперимента, реализация эксперимента, проверка воспроизводимости, определение значимости коэффициентов регрессии, проверка адекватности модели.

При реализации эксперимента выполнялась технологическая операция попутного фрезерования алюминиевой заготовки (сплав В95) концевой фрезой Sandvik Coromant R790-032HA06S2-16M диаметром  $D_c = 32$  мм. Попутная схема фрезерования способствует оптимальному и эффективному резанию и уменьшает вероятность сдвига заготовки. В табл. 1 представлены назначенные по рекомендациям производителя инструмента режимы резания и их значения на различных уровнях плана дробнофакторного эксперимента.

Уровни планирования эксперимента назначены таким образом, что на нижнем и верхнем уровнях частоты вращения шпинделя соответствуют нерезонансным участкам амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) станка DMC 635V, а основной уровень находился в зоне одного из высокочастотных резонансов, на частоте 125 Гц (см. рис. 1). Измерение шероховатости обработанной поверхности выполнялось профилометром Taylor Hobson Form Talysurf i200.

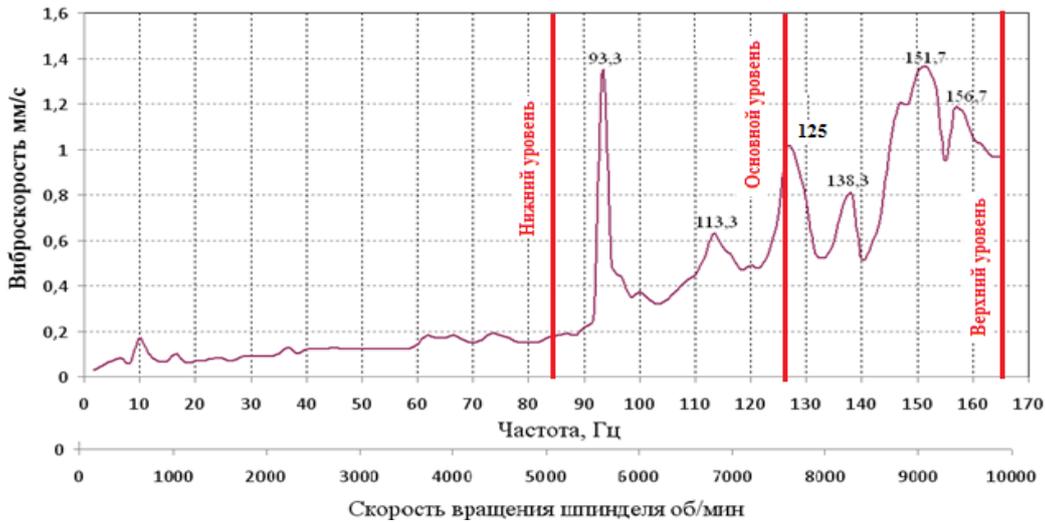


Рис. 1. Уровни режимов обработки на графике АЧХ

Таблица 1. Исследуемые факторы и их значения

Фактор	Код	Значения уровней		
		верхний	основной	нижний
$V_c, м/мин$	$x_1$	1 000	750	500
$F_z, мм$	$x_2$	0,3	0,2	0,1
$A_e, мм$	$x_3$	12,8	8	3,2
$A_p, мм$	$x_4$	4,5	3	1,5

Использование программного обеспечения Statistica 6.0 и алгоритмов теории планирования экспериментов позволило получить математические модели шероховатости обработанных поверхностей и вибрационных параметров обрабатывающих центров (ОЦ) в зависимости от режимов обработки. Измерение вибрационных составляющих ОЦ осуществлялось однокомпонентными пьезоакселерометрами «AP85» с использованием оборудования многоканальной регистрации параметров вибрации фирмы «National Instruments».

Оценка вибрационного состояния станка при выполнении технологической операции фрезерования выполнялось усредненным вектором среднеквадратических значений (СКЗ) виброускорения ( $м/с^2$ ) в трех взаимно перпендикулярных направлениях:

$$U_A = \sqrt{СКЗ_X^2 + СКЗ_Y^2 + СКЗ_Z^2} \quad (1)$$

Для оценки вибрационных характеристик ОЦ при механообработке использовался временной участок резания, соответствующий установившемуся резанию, исключая переходные процессы, вызванные врезанием и выходом из зоны резания инструмента. Также сигналы от вибропреобразователей были отфильтрованы цифровым полосовым фильтром (10–3500 Гц) с целью исключения резонансных явлений магнитного крепления датчиков вибрации, рассмотренных в работе [5].

**Результаты эксперимента.** Определив значимые коэффициенты регрессии и выполнив все необходимые подстановки, получаем математическое уравнение зависимости параметра СКЗ виброускорения от исследуемых факторов процесса фрезерования (2):

$$U_A = e^{-188.562 \cdot V_c^{57.702} - 4.376 \ln(V_c)} \cdot F_z^{-0.533 \ln(F_z) - 0.486} \cdot A_e^{0.438 - 0.495 \ln(F_z) - 0.313 \ln(A_e)} \cdot A_p^{1.84 - 0.659 \ln(A_p)} \quad (2)$$

где  $U_A$  — СКЗ виброускорения;  $V_c$  — скорость резания;  $F_z$  — подача на зуб;  $A_p$  — глубина резания;  $A_e$  — ширина резания.

Зависимости параметров СКЗ виброускорения от режимов обработки представлены на рис. 2, 3.

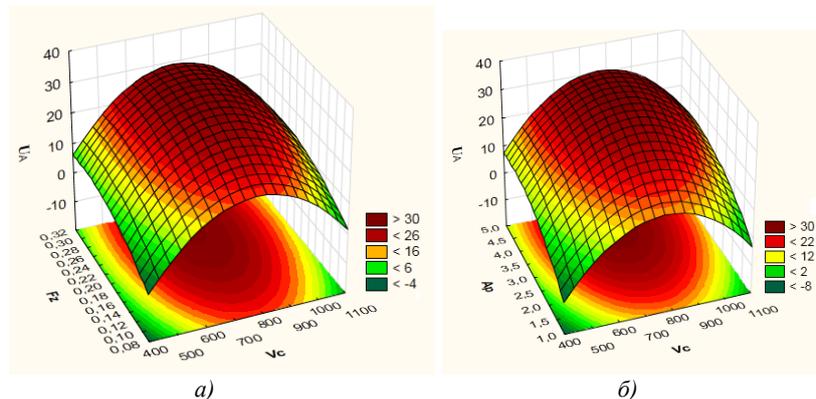


Рис. 2. Зависимости параметра СКЗ виброускорения  $U_A$ : а — от скорости резания  $V_c$  и подачи на зуб  $F_z$ ; б — от скорости резания  $V_c$  и глубины резания  $A_p$

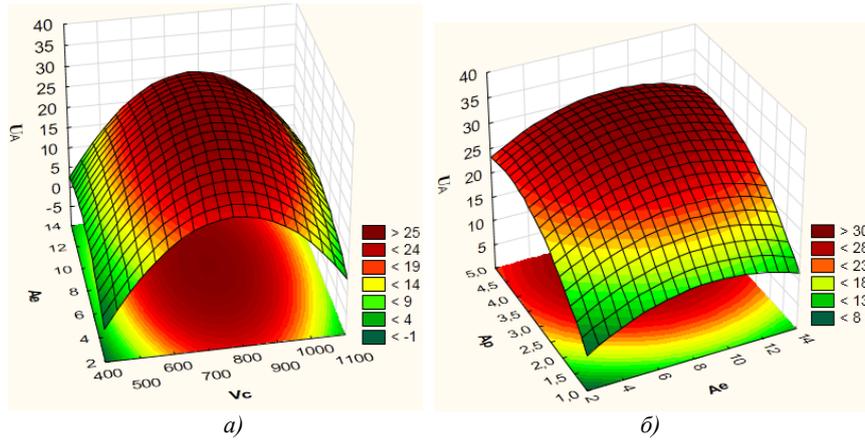


Рис. 3. Зависимости параметра СКЗ виброускорения UA: а — от скорости резания Vc и ширины резания Ae; б — от ширины Ae и глубины резания Ap

Качество обработанной поверхности оценивалось параметром шероховатости Ra по обработанной торцевой поверхности.

Математическая зависимость шероховатости поверхности от исследуемых факторов процесса фрезерования (3):

$$R_a = e^{-117.096 \cdot V_c^{34.831 - 2.657 \ln(V_c)} \cdot F_z^{-0.859}} \cdot A_p^{0.896 + 0.512 \ln(F_z)} \cdot A_e^{2.632 - 0.715 \ln(A_e) + 0.893 \ln(F_z)} \quad (3)$$

Поверхности отклика параметра шероховатости обработанной поверхности в зависимости от режимов обработки представлены на рис. 4, 5.

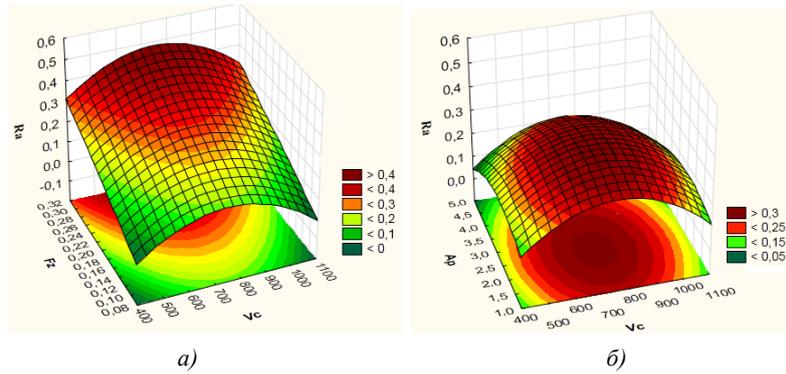


Рис. 4. Зависимости параметра шероховатости Ra: а — от Vc и Fz; б — от Vc и Ap

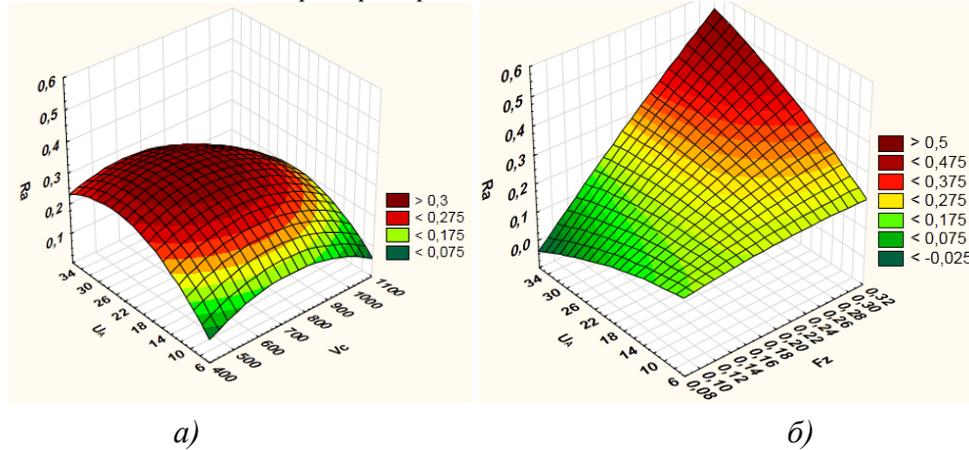


Рис. 5. Взаимовлияние параметров обработки, шероховатости и вибрации: а — от Vc и UA; б — от Fz и UA

Степенная модель отклика параметра шероховатости Ra в зависимости от режимов резания (Vc, Fz) и вибрации имеет следующий вид (4):

$$R_a = 0,00016 \cdot V_c^2 - 0,2579 \cdot V_c + 340,7249 \cdot F_z^2 - 177,9548 \cdot F_z + U_A + 93,0396 \quad (4)$$

**Заключение.** Выявленные в результате проведения экспериментальных работ данные свидетельствуют о достижении поставленной цели исследования. Статистическая обработка результатов эксперимента, выполненная по плану Бокса – Бенкена, позволила получить эмпирические формулы зависимостей шероховатости и параметров СКЗ виброускорения от режимов резания. Зависимость

вибрационного состояния обрабатывающего центра от режимов обработки имеет нелинейный характер, что свидетельствует о наличии участков стабильного резания и подтверждает эффективность методов высокоскоростной механообработки. Существующие участки стабильного резания и резонансных зон, выявленные при анализе АЧХ обрабатывающего центра, существенно влияют на качество обработанных поверхностей и свидетельствуют о необходимости проведения вибрационного мониторинга оборудования.

Использование дополнительных программно-аппаратных средств мониторинга и диагностики станочного оборудования позволяет выполнить оптимизацию режимов обработки по критерию минимизации динамических нагрузок, за счет работы вне резонансных участков АЧХ, что позволяет значительно повысить качество обработанных поверхностей.

### Литература

1. Алейников Д.П. Оптимизация высокопроизводительного фрезерования на основе мониторинга сил и вибраций: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08, 05.02.07. Иркутск, 2018. С. 108-111.
2. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Мониторинг динамического состояния обрабатывающих центров // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. VII Всерос. науч.-практической конф. (13-16 апр. 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 197-200.
3. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 30-38.
4. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Моделирование сил резания и определение вибродиагностических признаков дефектов концевых фрез // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 39-47.
5. Нагорный В.В. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса: моногр. Сумы: СумГУ, 2016. 242 с.
6. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. М.: Машиностроение, 2007. 304 с.
7. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб.: Изд. Центр СПбГМУ, 2000. 159 с.
8. Шиндовский Э., Щюрц О. Статистические методы управления качеством: пер. с нем. М.: Мир, 1976. 597 с.
9. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н., Сидорова А.В., Семенов Е.Н., Стуров А.А. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2017. Т. 21. № 6 (125). С. 39-48.
10. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2015. № 11 (106). С. 44-49.
11. Кокрен У. Методы выборочного исследования: пер. с англ. И.М. Сониной. М.: Статистика, 1976. 440 с.
12. Неразрушающий контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 8. С. 789.
13. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П. Диагностика автоматизированного производства. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
14. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. Исследование частотных характеристик работа Kuka kr210 r2700 extra // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. всерос. молодежной науч.-практической конф. (11 нояб. 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 252-257.
15. Сидорова А.В. Модель управления точностью обработки на операции фрезерования кромок на РТК // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. IX Всерос. науч.-практической конф. (12-15 апр. 2017 г.). Иркутск, 2017. С. 246-250.
16. Сидорова А.В. Исследование обработки отверстий ПКМ на РТК, дефект отклонения от круглости // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. всерос. молодежной науч.-практической конф. (11 нояб. 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 258-262.
17. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 103-111.
18. Савилов А.В., Пятых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2015. Т. 17. № 2. С. 211-216.
19. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме фрезерования // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 96-101.
20. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2015. № 2 (97). С. 28-35.
21. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. Conference on High Performance Cutting, 2012. P. 563-568.

### References

1. Alejnikov D.P. Optimizing high performance milling by monitoring forces and vibrations: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.08, 05.02.07. Irkutsk, 2018. P. 108-111.
2. Alejnikov D.P., Luk'yanov A.V. Monitoring the state of dynamic machining center // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. VII Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (13-16 apr. 2016 g.). Irkutsk, 2016. P. 197-200.
3. Luk'yanov A.V., Alejnikov D.P., Portnoj A.YU. System of control of emergency situations of machining center by vibration and stress // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. V. 21. № 4 (123). P. 30-38.
4. Alejnikov D.P., Luk'yanov A.V. Modeling of the cutting forces and determination vibrodiagnostics symptoms of defects of

- end mills // Systems. Methods. Technologies. 2017. № 1 (33). P. 39-47.
5. Nagornyj V.B. Monitoring the dynamic state of the metal-working technological system and forecasting its resource: monogr. Sumy: SumGU, 2016. 242 p.
  6. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. Cutting materials. M.: Mashinostroenie, 2007. 304 p.
  7. Barkov A.V., Barkova N.A., Azovcev A.YU. Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration. SPb.: Izd. Centr SPbGMTU, 2000. 159 p.
  8. SHindovskij E., SHCHyurc O. Statistical methods of quality management: per. s nem. M.: Mir, 1976. 597 p.
  9. CHashchin N.S., Ivanov YU.N., Sidorova A.V., Semenov E.N., Sturov A.A. Investigation of the technology of processing holes of small diameters in a poly-dimensional composite material on a robotic complex // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. V. 21. № 6 (125). P. 39-48.
  10. CHashchin N.S., Ivanov YU.N. Processing of openings in mixed packages by the method of orbital drilling // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2015. № 11 (106). P. 44-49.
  11. Kokren U. Methods of selective research: per s angl. I.M. Sonina. M.: Statistika, 1976. 440 p.
  12. Non-destructive testing / pod obshch. red. V.V. Klyueva. M.: Mashinostroenie, 2005. V. 8. P. 789.
  13. Grigor'ev S.N., Gurin V.D., Kozochkin M.P. Diagnosis of computer-aided manufacturing. M.: Mashinostroenie, 2011. 600 p.
  14. Semenov E.N., Belomestnyh A.S., Sidorova A.V. A study of the frequency characteristics of the robot Kuka kr210 r2700 extra // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. vseros. molodezhnoj nauch.-prakticheskoy konf. (11 noyab. 2016 g.). Irkutsk, 2016. P. 252-257.
  15. Sidorova A.V. Model of accuracy control processing in the operation of milling edges on the RTK // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. IX Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (12-15 apr. 2017 g.). Irkutsk, 2017. P. 246-250.
  16. Sidorova A.V. Investigation of hole machining PKM on RTK, defect deviation from roundness // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. vseros. molodezhnoj nauch.-prakticheskoy konf. (11 noyab. 2016 g.). Irkutsk, 2016. P. 258-262.
  17. Savilov A.V., Pyatyh A.S. Vibration effect on accuracy and quality of hole surface under drilling // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12 (83). P. 103-111.
  18. Savilov A.V., Pyatyh A.S. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. V. 17. № 2. P. 211-216.
  19. Luk'yanov A.V., Alejnikov D.P. Research of vibration machining center in milling mode // Systems. Methods. Technologies. 2014. №1 (21). P. 96-101.
  20. Alejnikov D.P., Luk'yanov A.V. Studying fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2015. № 2. P. 28-35.
  21. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. Conference on High Performance Cutting, 2012. P. 563-568.