

Автоматизированный неразрушающий контроль в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников

А.А. Игнатъев¹, В.А. Добряков¹, М.Ю. Захарченко¹, С.А. Игнатъев²,
В.А. Каракозова¹, Е.В. Березина¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

²Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

Аннотация: Рассматриваются вопросы организации автоматизированного неразрушающего контроля деталей, станков и режимов резания в структуре системы мониторинга технологического процесса (СМТП) в подшипниковом производстве, направленного на обеспечение высокого качества подшипников. В основе контроля качества деталей лежит вихретоковый метод, обеспечивающий выявление неоднородности структуры поверхностного слоя дорожек качения колец подшипников при шлифовании как финишной операции. Данные измерений колец (время проверки, тип кольца, модель и номер станка) сохраняются в компьютере вихретокового прибора, а также передаются в лабораторию мониторинга. Результаты контроля колец служат основанием для контроля динамического качества станков по виброакустическим колебаниям. По результатам контроля в рамках СМТП принимается решение по управлению качеством обработки. Внедрение СМТП обеспечило существенное снижение брака колец по качеству шлифования до 2-3 % и повышение эксплуатационной надежности подшипников.

Ключевые слова: мониторинг процесса шлифования, кольца подшипников, вихретоковый контроль, виброакустические колебания, динамическое качество станка, качество колец

Введение

Для обеспечения конкурентоспособности изделий машино- и приборостроения необходимо изготавливать их с высоким качеством в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015, что связано с внедрением системы менеджмента качества продукции [1], в рамках которой рассматриваются этапы разработки изделий, их производства и эксплуатации. Основопологающим в этом случае является использование компьютерных технологий, позволяющих организовать эффективное производство наукоемких изделий и обеспечить их заданное качество в процессе изготовления. Особое внимание следует уделить автоматизированному контролю качества деталей и изделий, что отмечено в ряде работ различных авторов [2,3]. Наиболее эффективным является включение автоматизированного контроля в систему мониторинга технологического

процесса (СМТП) [4], которая охватывает также станки [5], в том числе, режимы обработки деталей, что позволяет оперативно принимать решение как о корректировке режима резания, так и о техническом обслуживании оборудования [6]. Указанное в полной мере справедливо для подшипникового производства, однако в известных работах недостаточно отражен системный подход к реализации автоматизированного контроля в рамках СМТП.

Шлифовальная обработка дорожек качения колец как финишная операция в основном формирует показатели их качества, к которым относятся точность и однородность структуры поверхностного слоя [4, 7]. Именно они в значительной степени определяют эксплуатационную надежность подшипников. На значения параметров точности накладываются достаточно жесткие требования, например погрешность размера – не более 2...4 мкм, овальность – не более 1...2 мкм, волнистость – не более 0,3...0,6 мкм, шероховатость R_a – не более 0,2...0,4 мкм. Неоднородность структуры поверхностного слоя, определяемая различными дефектами, должна иметь как можно более низкий уровень, что выявляется специальными методами контроля, например, вихретоковым [4].

Цель и задачи

Для обеспечения высокого качества шлифования колец в рамках СМТП целесообразен системный подход, включающий, во-первых, осуществление надежного контроля качества деталей, во-вторых, обеспечение заданного уровня технологической надежности станка [8], в-третьих, определение наиболее приемлемых значений параметров режима резания.

Общая структура контроля в СМТП шлифовальной обработки колец подшипников подробно представлена в работе [4]. Она отражает основные контролируемые параметры станков и процесса обработки, соответствующее программно-математическое обеспечение (ПМО), а также управляющие

решения по результатам мониторинга.

Для реализации эффективного контроля целесообразно провести анализ факторов, влияющих на качество обработки, и классифицировать их на две группы: детерминированные и стохастические (рис. 1). Это необходимо для определения математических методов обработки данных о состоянии технологического процесса, включающих параметры качества деталей, станков и процесса шлифования. В этом комплексе факторов необходимо выделить доминирующие и идентифицировать их влияние, чтобы на этой основе реализовать управление качеством обработки. Динамическое качество станка, как указывалось в ряде известных работ [9, 10], является важнейшим фактором, определяющим качество обработки резанием, поэтому именно ему далее будет уделено основное внимание.

Шероховатость шлифованной поверхности в значительной степени определяется технологическими параметрами (характеристики круга, режим шлифования, состав СОЖ и другие), так что ниже будут затрагиваться другие параметры точности обработки [11, 12].

Методы и средства

Волнистость поверхности качения существенно влияет на уровень виброакустических (ВА) колебаний подшипника, которые являются одним из факторов, определяющих долговечность подшипника. Она формируется в основном вследствие относительных колебаний круга и детали в зоне обработки, обусловленных различными факторами. Кроме того, указанные колебания и ряд других факторов при резании обуславливают колебания контактной температуры шлифования, что повышает как неоднородность структуры поверхностного слоя в виде дефектов (прижоги, трещины и другие), так и неравномерность его физико-механических характеристик

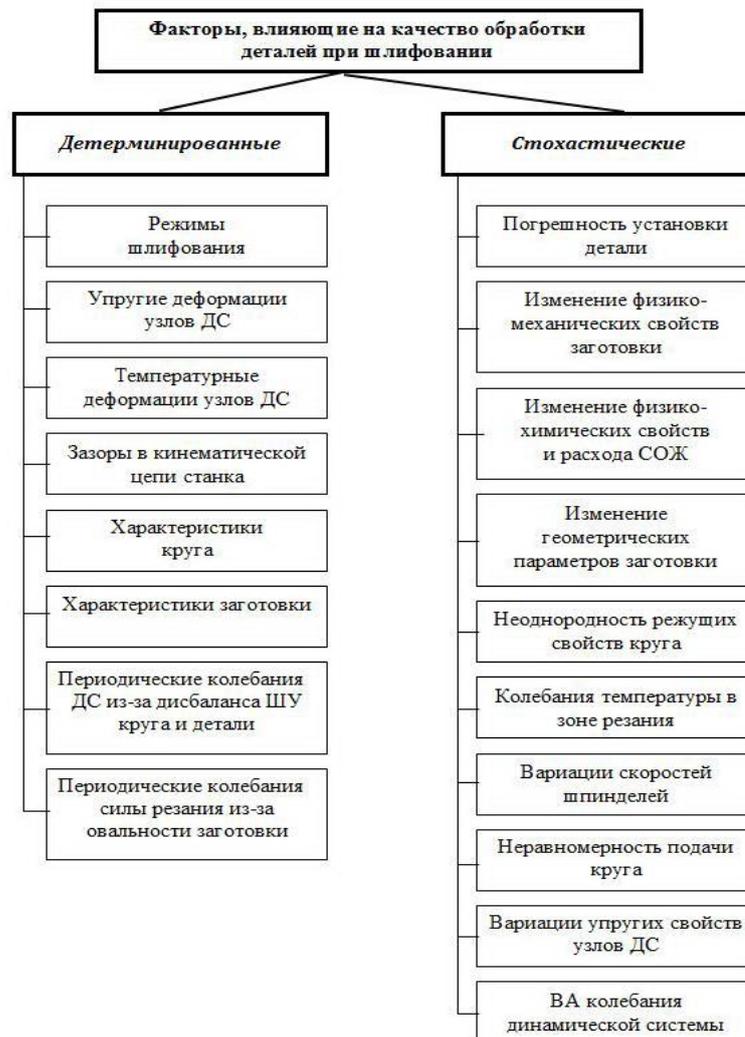


Рис. 1 – Классификация факторов в рамках системного подхода, определяющих качество шлифования колец подшипников

(микротвёрдость поверхности, распределение остаточных напряжений) [7].
Пример влияния вибраций шпинделя круга на круглошлифовальном станке SWaAGL-50 на параметры точности колец приведен на рис. 2. Амплитуда вибраций измерялась на частоте вращения круга при различной величине его дисбаланса виброизмерителем ВШВ-003-М3 (рис. 3а), датчик которого устанавливался на шпинделе с помощью магнитного основания.

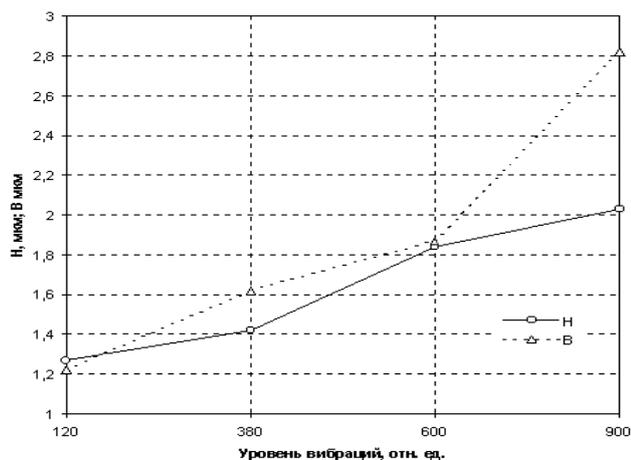
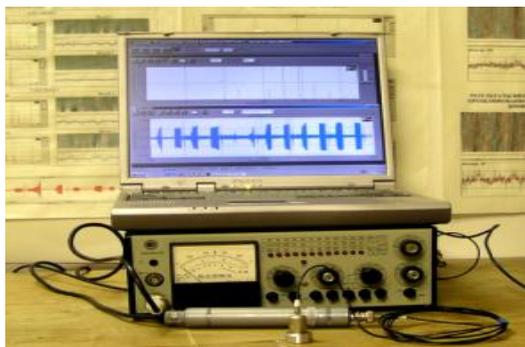
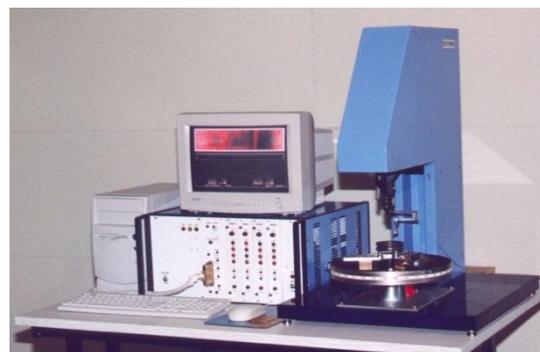


Рис. 2 – Зависимость волнистости (B) и овальности (H) поверхностей качения колец от уровня вибраций шпинделя круга



а



б

Рис. 3 – Виброизмерительный комплекс (а) и прибор автоматизированного вихретокового контроля ПКВ-К2М (б)

Одновременно выполнялись измерения однородности структуры поверхностного слоя дорожки качения вихретоковым методом с помощью компьютеризированного прибора ПКВ-К2М (рис. 3б), включенного в Госреестр средств измерений под номером 26079-03 [4].

Результаты

Типичные вихретоковые образы (сканограммы) дорожки качения практически без дефектов и с периодической неоднородностью из-за воздействия вибраций шпинделя круга показаны на рис. 4. С помощью разработанного специального классификатора оценивается неоднородность

поверхностного слоя в баллах от 1 до 10 (чем выше балл, тем однороднее структура).

Из приведенных результатов анализа качества шлифования дорожки качения колес следует, что колебания в системе «круг – кольцо» оказывают доминирующее влияние на качество поверхностного слоя.

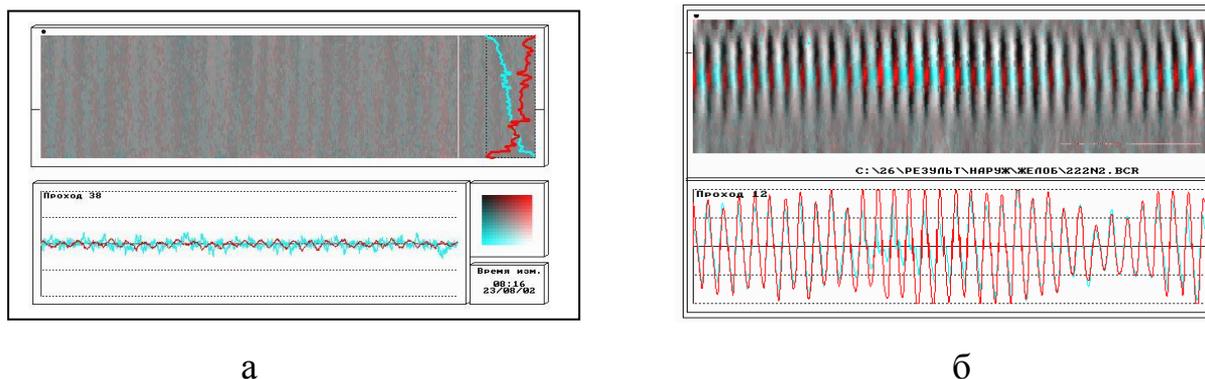


Рис. 4 – Сканограммы поверхностей качения колес с практически однородным поверхностным слоем (а)

и периодической неоднородностью поверхностного слоя (б)

Указанное снижает долговечность подшипников, поэтому для обеспечения их высокого качества необходимо минимизировать вибрации в станках. В условиях эксплуатации это достигается систематическим контролем ВА колебаний шпиндельных узлов (ШУ) круга и детали в диапазоне частот их вращения и проведение при необходимости профилактических мероприятий [4, 13].

Известно [14, 15], что ВА колебания ДС имеют и стохастическую составляющую, причем ее соответствующая математическая обработка позволяет сформировать численные оценки, служащие критериями, во-первых, для оценки динамического качества станков одной модели, во-вторых – для назначения целесообразного режима шлифования. В качестве такой достаточно достоверной оценки может использоваться запас устойчивости динамической системы (ДС) при резании, причём, чем он больше, тем выше динамическое качество станка и более приемлем режим

обработки по качеству обработанной поверхности [15]. Запас устойчивости замкнутой процессом резания ДС определяется по специальной методике, в основе которой лежит определение автокорреляционной функции (АКФ) ВА колебаний ДС [13]. При изменении параметров режима шлифования меняется спектр вибраций и, соответственно, АКФ. Теоретической основой применения АКФ для оценки динамического качества станка при резании является метод, разработанный в работе [16], рассматривающий решение стохастического дифференциального уравнения при условии, что его правая часть является сигналом типа «белый шум».

Проведем обоснование применимости аналогичного решения для уравнения колебаний в системе «круг – деталь», сформулировав ряд ограничений:

1) рассматриваются колебания только по одной оси, наибольшим образом влияющие на параметры качества деталей;

2) уравнение справедливо для стационарного в вероятностном смысле режима резания, то есть после завершения переходного процесса, обусловленного врезанием круга в заготовку;

3) износ круга за время обработки одной детали считается пренебрежимо малым;

4) сила резания рассматривается как процесс типа «белый шум» $\xi(t)$ [11, 14].

Уравнение колебаний в системе «круг – деталь» имеет вид:

$$M \cdot \ddot{y} + H \cdot \dot{y} + Cy = \xi(t), \quad (1)$$

где M , H , C – приведенные массы, коэффициент демпфирования и жесткость упругой системы, $\xi(t)$ – сила резания, действующая на систему, $y(t)$ – относительные колебания круга и заготовки.

Стохастическое уравнение (1) в явном виде решается только относительно АКФ $K_{yy}(\tau)$ выходной переменной $y(t)$ [15, 16].

Преобразуем уравнение (1) к виду:

$$\ddot{y} + 2\rho\dot{y} + \omega_0^2 y = \xi(t), \quad (2)$$

где $\rho = H/2M$, $\omega_0^2 = C/M$.

Известно [17], что сигнал типа «белый шум» имеет АКФ вида:

$$K_{\xi\xi}(\tau) = S_0\delta(\tau), \quad (3)$$

где $\delta(\tau)$ – дельта-функция, S_0 – постоянная величина.

С учетом условия (3) уравнение (2) преобразуется к виду:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial\tau^2} + 2\rho\frac{\partial}{\partial\tau} + \omega_0^2\right)\left(\frac{\partial^2}{\partial\tau^2} - 2\rho\frac{\partial}{\partial\tau} + \omega_0^2\right) \cdot K_{yy}(\tau) = K_{\xi\xi}(\tau) \quad (4)$$

Решением последнего уравнения является затухающая косиноида:

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0}{4\omega_0\rho} e^{-p\tau} \left(\cos\omega_1\tau + \frac{\rho}{\omega_1} \sin\omega_1(\tau) \right), \quad (5)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \rho^2}$ – собственная частота, вычисленная с учетом демпфирования ($\rho < \omega_0$).

При $\omega_1 \gg \rho$ формула (5) преобразуется к более простому виду:

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0}{4\omega_0\rho} e^{-p\tau} \cos\omega_1\tau. \quad (6)$$

Из изложенного следует, что АКФ ВА колебаний, зарегистрированных, например, на ШУ круга, могут служить оценкой динамических процессов в системе «круг – деталь». Далее осуществляется идентификация АКФ $K_{yy}(\tau)$ в виде аналитического выражения, а затем вычисляется передаточная функция ДС $W_3(\rho)$ по формуле, полученной в работе [18]:

$$K_{yy}(p) + K_{yy}(-p) = W_3(p)W_3(-p), \quad (7)$$

где $K_{yy}(\rho)$ – изображение АКФ по Лапласу.

Из передаточной функции определяется амплитудно-частотная характеристика ДС, а из нее, в свою очередь, вычисляется показатель колебательности, характеризующий запас устойчивости системы [18, 19]. Наибольшая величина запаса устойчивости ДС соответствует значениям показателя колебательности 1,1...1,3 (большим его значениям соответствует меньший запас устойчивости). Изменение спектра вибраций при изменении режима шлифования или при износе круга приводит к соответствующему изменению запаса устойчивости ДС. Подобные изменения спектра вибраций, АКФ, передаточной функции и запаса устойчивости наблюдаются при исследовании процесса шлифования на станках одной модели, обрабатывающих близкие по типоразмеру кольца. Экспериментально подтверждено (рис. 5), что внутришлифовальный станок с более высоким динамическим качеством (№ 247) обеспечивает обработку колец с более высокой геометрической точностью и более однородной структурой поверхностного слоя поверхности качения.

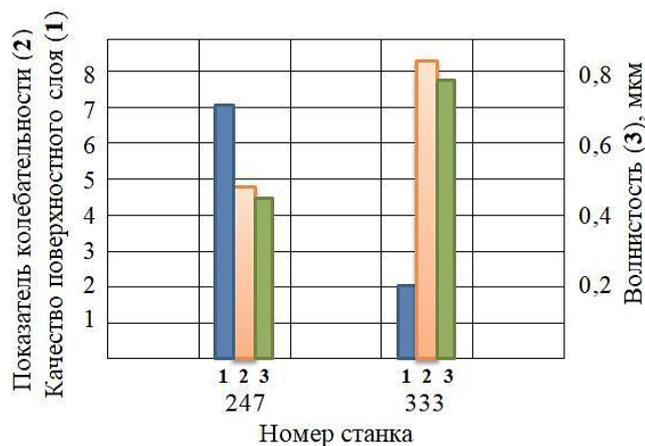


Рис. 5 – Сопоставительный анализ качества поверхностей качения колец и динамического качества станков модели SIW-4

Целесообразным оказалось применение запаса устойчивости ДС для обоснования момента правки круга. При обработке колец подшипников 308 на внутришлифовальном станке SIW-3 правка круга осуществлялась на

пятом кольце. При проведении специального эксперимента, включающего вычисление запаса устойчивости ДС и оценку качества поверхностного слоя вихретоковым методом, было установлено, что реальное снижение значений этих показателей наступает после десятого кольца (рис. 6, 7). Это позволило рекомендовать производить правку круга на 11 кольце, то есть в два раза реже, и, следовательно, повысить время эксплуатации круга и правящего инструмента.

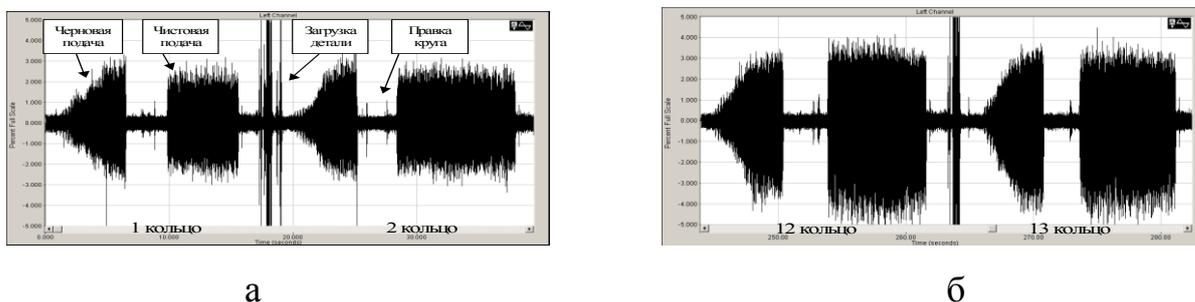


Рис. 6 – Уровень вибраций при обработке: а – первого после правки круга кольца, б – двенадцатого после правки круга кольца

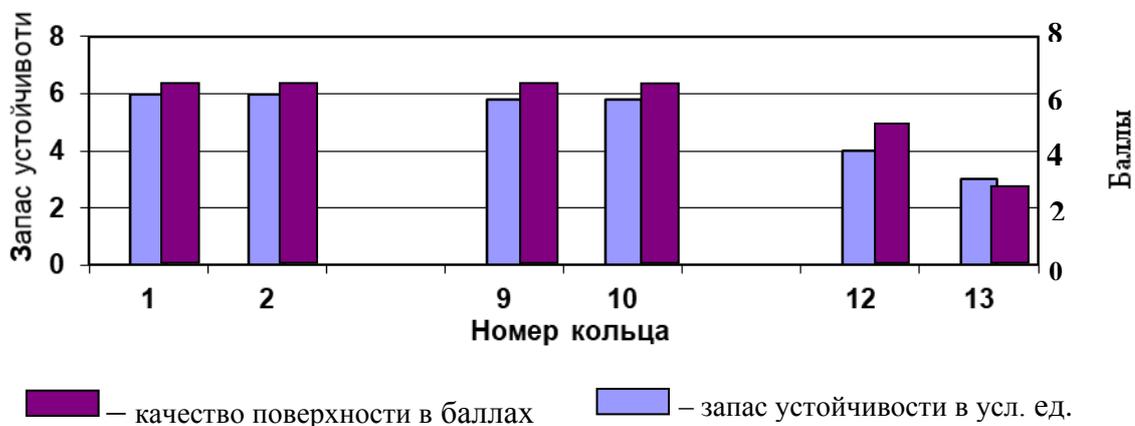


Рис. 7 – Сопоставительный анализ запаса устойчивости динамической системы и качества поверхностного слоя дорожки качения колец при износе круга

При шлифовании колец на станках с микропроцессорными приборами активного контроля возникает возможность управления подачей круга, обеспечивающего снижение уровня теплофизических процессов в зоне резания, что существенно уменьшает вероятность возникновения дефектов в

поверхностном слое дорожек качения. Для реализации такого управления в результате специального эксперимента установлена реальная зависимость глубины дефектов поверхностного слоя обработанных деталей от скорости съема припуска на станке SIW-3B при предварительном шлифовании дорожек качения наружных колец подшипника № 308 (рис. 8) [4]. Каждому значению припуска соответствует предельное значение скорости съема припуска, что учитывается в микропроцессорном приборе активного контроля.

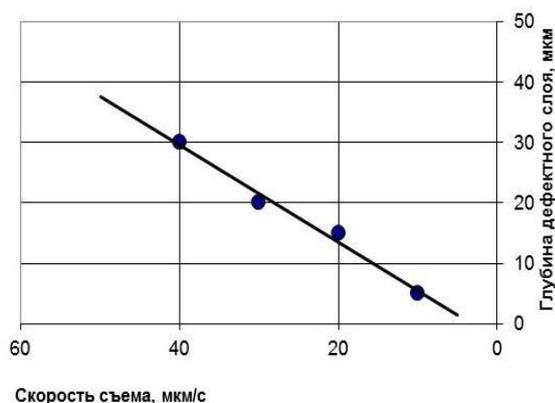


Рис. 8 – Зависимость глубины дефектного слоя от скорости съема припуска

Автоматизированный контроль колец вихретоковым методом позволяет с помощью специализированного ПМО (вейвлет-анализ, фрактальный анализ, нейронные сети) распознавать вид дефектов в поверхностном слое [20, 21] и, соответственно, делать выводы о динамическом качестве станков, состоянии инструмента и целесообразности установленных значений параметров режима шлифования.

Заключение

В ОАО «Саратовский подшипниковый завод» (в настоящее время АО «ЕПК-Саратов») впервые в подшипниковой промышленности была реализована СМТП шлифовальной обработки колец подшипников [4, 19]. В

качестве автоматизированно контролируемых параметров процесса шлифования выбраны характеристики ВА колебаний ДС станка, геометрическая точность обработанной дорожки колец, а также неоднородность её поверхностного слоя.

При вихретоковом контроле анализируются дефекты 1-5 % колец, обработанных на каждом станке. Результаты контроля сохраняются как в компьютере прибора ПВК-К2М, так и на сервере лаборатории мониторинга. Данные о динамическом качестве станков периодически заносятся на сервер оператором. Электронный паспорт динамического качества станков обеспечивает технический персонал достоверными данными об их параметрах, что позволяют организовать восстановление по реальному состоянию. По результатам контроля в рамках СМТП принимается решение по управлению качеством обработки, как это показано ранее на рис. 1. Внедрение СМТП обеспечило существенное снижение брака колец по качеству шлифования до 2...3 % и повышение эксплуатационной надежности подшипников.

Литература

1. Глудкин О.П., Горбунов Н.М., Гуров А.И., Зорин Ю.В.. Всеобщее управление качеством М.: Радио и связь, 1999. 600 с.
2. Волосов С.С., Гейлер С.Ш. Управление качеством продукции средствами активного контроля. М.: Изд-во стандартов, 1989. 264 с.
3. Воронцов А.Н., Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г. Управление контролем в системе менеджмента качества. Старый Оскол: ТНТ, 2008. 298 с.
4. Игнатьев С.А., Горбунов В.В., Игнатьев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 160 с.
5. Пуш А.В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем // СТИН. 2000. № 9. С. 12-20.

6. Тугенгольд А.К., Димитров В.П., Волошин Р.Н., Борисова Л.В. Мониторинг состояния станков и станочных систем СТИН. 2017. № 3. С. 11-17.
 7. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А., Дунин-Барковский И.В. Предотвращение дефектов при шлифовании. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.
 8. Технологическая надежность станков под ред. А.С. Проникова. М.: Машиностроение, 1971. 342 с.
 9. Курило А.А., Сорокин М.А., Стародубцев Ю.И. Методика обработки результатов мониторинга с динамически изменяемым уровнем разрешающей способности базы данных Инженерный вестник Дона, 2021. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6882/
 10. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
 11. Lin Z.H., Hodgson D.C. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures Int. J. Mach. Tools and Manufact. 1988. V. 28. № 2. pp. 93-101.
 12. Цысь А.С., Пашкевич Р.Р. Система контроля технического состояния технологических мехатронных объектов с использованием нейронной сети анализа состояний. Инженерный вестник Дона, 2019, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6161.](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6161/)
 13. Игнатъев А.А., Гаврилова А.В., Игнатъев С.А. Экспертная система поддержки принятия решения при контроле динамического качества шлифовальных станков. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2018. 104 с.
 14. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков. Киев: Техніка, 1975. 135 с.
 15. Игнатъев А.А., Каракозова В.А., Игнатъев С.А. Стохастические методы идентификации в динамике станков. Саратов: СГТУ, 2013. 124 с.
-

16. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. М.: Наука, 1979. 336 с.
17. Бесекерский В.А., Попов Е.В. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
18. Скляревич А.Н. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М.: Наука, 1965. 460 с.
19. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. Automated measurements in process monitoring system in bearing production Journal of Physics: Conference Series. 2020. V.1515. № 052057. (ICMIT-2020 – Metrological Support of Innovative Technologies: International Scientific Conference. Saint Petersburg-Krasnoyarsk, 2020. March 4).
20. Игнатъев А.А., Шумарова О.С., Игнатъев С.А. Распознавание дефектов поверхностей качения колец подшипников при автоматизированном вихретоковом контроле с применением вейвлет-преобразований. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 108 с.
21. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Игнатъев С.А. Автоматизированный контроль в системе управления качеством изготовления деталей подшипников. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 14-25.

References

1. Gludkin O.P., Gorbunov N.M., Gurov A.I., Zorin Yu.V. Vseobshchee upravlenie kachestvom [Universal quality management] . М.: Radio i svyaz', 1999. 600 p.
 2. Volosov S.S., Gejler S.Sh. Upravlenie kachestvom produkcii sredstvami aktivnogo kontrolya [Product quality management by means of active control]. М.: Izd-vo standartov, 1989. 264 p.
-

3. Voroncov A.N., Polyanchikov Yu.N., Skhirtladze A.G. Upravlenie kontrolom v sisteme menedzhmenta kachestva [Control management in the quality management system]. Staryj Oskol: TNT, 2008. 298 p.
 4. Ignat'ev S.A., Gorbunov V.V., Ignat'ev A.A. Monitoring tekhnologicheskogo processa kak element sistemy upravleniya kachestvom produkcii [Process monitoring as part of the product quality management system]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2009. 160 p.
 5. Push A.V. STIN. 2000. № 9. pp. 12-20.
 6. Tugengol'd A.K., Dimitrov V.P., Voloshin R.N., Borisova L.V. STIN. 2017. № 3. pp. 11-17.
 7. Kulakov Yu.M., Hrul'kov V.A., Dunin-Barkovskij I.V. Predotvrashchenie defektov pri shlifovanii [Prevention of grinding defects]. M.: Mashinostroenie, 1975. 144 p.
 8. Tekhnologicheskaya nadezhnost' stankov [Technological reliability of machine tools]. Pod red. A.S. Pronikova. M.: Mashinostroenie, 1971. 342 p.
 9. Kurilo A.A., Sorokin M.A., Starodubcev Ju.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6882/
 10. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Dynamics of machine tools]. M.: Mashinostroenie, 1967. 360 p.
 11. Lin Z.H., Hodgson D.C. Int. J. Mach. Tools Manufact., 1988, V. 28, № 2, pp. 93-101.
 12. Cys' A.S., Pashkevich R.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6161.
 13. Ignat'ev A.A., Gavrilova A.V., Ignat'ev S.A. Ekspertnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri kontrole dinamicheskogo kachestva shlifoval'nyh stankov [Expert decision support system for dynamic quality control of grinding machines]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2018. 104 p.
-

14. Popov V.I., Loktev V.I. Dinamika stankov [Dynamics of machine tools]. Kiev: Tekhnika, 1975. 135 p.

15. Ignat'ev A.A., Karakozova V.A., Ignat'ev S.A. Stohasticheskie metody identifikacii v dinamike stankov [Stochastic identification methods in machine dynamics]. Saratov: SGTU, 2013. 124 p.

16. Bolotin V.V. Sluchajnye kolebaniya uprugih system [Random vibrations of elastic systems]. M.: Nauka, 1979. 336 p.

17. Besekerskij V.A., Popov E.V. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. M.: Nauka, 1975. 768 p.

18. Sklyarevich A.N. Operatornye metody v statisticheskoy dinamike avtomaticheskikh system [Operator methods in statistical dynamics of automatic systems]. M.: Nauka, 1965. 460 p.

19. Ignat'ev A.A., Dobrjakov V.A., Ignat'ev S.A. Journal of Physics: Conference Series. 1515(2020) 052057 (ICMIT-2020 – Metrological Support of Innovative Technologies: International Scientific Conference. Saint Petersburg-Krasnoyarsk, 2020. March 4).

20. Ignat'ev A.A., Shumarova O.S., Ignat'ev S.A. Raspoznavanie defektov poverhnostej kacheniya kolec podshipnikov pri avtomatizirovannom vihretokovom kontrole s primeneniem vejvlet-preobrazovanij [Detection of defects of bearing rings rolling surfaces during automated eddy current monitoring with the use of wavelet transformations]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2017. 108 p.

21. Ignat'ev A.A., Dobrjakov V.A., Ignat'ev S.A. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 2020, № 1 (84), pp. 14-25.