

ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ СТАНКОВ

Шитов А.М., Кондратьев И.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г.Москва

Ключевые слова: диагностика, шпиндельные узлы, коэффициент жёсткости, критерий стабильности технологического процесса, технологический отказ.

Аннотация. Описан метод диагностирования технологического процесса изготовления серийных шпиндельных узлов (ШУ) металлорежущих станков. Метод основан на исследовании жесткостных параметров ШУ и расчёте коэффициента стабильности технологического процесса, который отражает поле разброса выходных параметров ШУ, аттестованных после изготовления в соответствии с действующими на предприятии техническими нормами. Показано использование математической модели для исследования факторов, влияющих на разброс выходных параметров ШУ. Приведены результаты контроля и диагностирования техпроцесса изготовления шпиндельных узлов станков, которые позволили выявить факторы, влияющие на стабильность выходных параметров и качество этих узлов.

В настоящее время в условиях высокой конкуренции на рынке предприятиям, выпускающим металлорежущие станки и узлы для них, необходимо обеспечивать высокое качество шпиндельных узлов (ШУ), от технического состояния которых зависит конкурентоспособность производимого оборудования. При этом особое значение имеет достижение одинаковых значений рабочих параметров у серии однотипных ШУ, что обеспечивает их высокое качество и гарантийный срок службы.

Было проведено диагностирование шпиндельных узлов в производственных условиях на стадии их изготовления. Оно позволило получить экспериментальные данные, которые зафиксировали наличие значительных расхождений жесткостных параметров у серий однотипных ШУ. Это потребовало выяснения причин подобной нестабильности и формирования показателя для оценки качества изготовления ШУ.

В обследованных узлах шпиндели были установлены на опорах, в которых используются радиально-упорные подшипники, предварительно нагруженные осевым усилием F_H (осевой натяг). Как известно, от величины этого параметра зависят статические и динамические свойства шпиндельных узлов, точность обработки изделий и срок эксплуатации.

Однако непосредственное измерение F_H в собранном узле не представляется возможным, поэтому при оценке технического состояния ШУ проверялись другие параметры, позволяющие контролировать осевой натяг подшипников и определять состояние опор ШУ. Наиболее информативным параметром с этой точки зрения являются радиальная жесткость шпиндельного узла $J_{ш}$ [1], которая может быть как определена по результатам измерений, так и рассчитана с помощью математической модели.

Одна из расчетных схем ШУ, показана на рис. 1. Изображенные шарнирные упругие опоры А, В и С обладают линейной (радиальной) (E_a, E_b, E_c) и угловой (G_a, G_b, G_c) податливостями, соответственно.

Для представленной схемы ШУ составлена математическая модель в виде системы уравнений, содержащей уравнения статического равновесия, прогибов и углов поворота сечений шпинделя. Решение системы уравнений проводилось численными методами с учетом граничных условий, определяемых свойствами упругих опор ШУ.

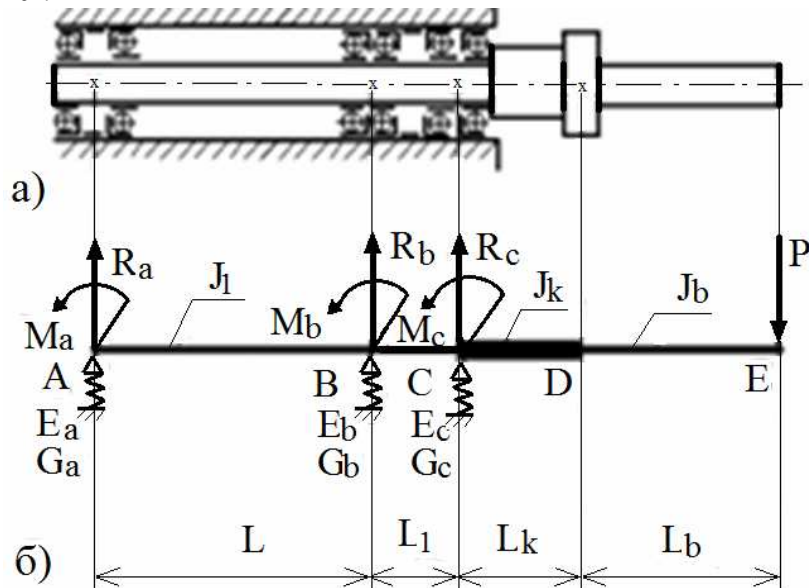


Рис. 1. Конструктивная (а) и расчетная (б) схемы трехопорного шпиндельного узла

В результате численного решения системы уравнений могут быть определены неизвестные реакции опор R_a, R_b, R_c и изгибающие моменты в опорах M_a, M_b, M_c . Затем с помощью уравнения прогибов определяется прогиб шпинделя у фланца $Y_\phi(L)$ и расчетное значение коэффициента жесткости ШУ $J_{Ш}$ [2].

В системе уравнений помимо геометрических размеров фигурируют и жесткостные параметры (линейные E_a, E_b, E_c и угловые G_a, G_b, G_c податливости), которые могут варьироваться под воздействием различных производственных факторов, в том числе связанных с технологическим процессом изготовления и сборки ШУ. В работах [3-6] приводятся формулы для расчета радиальной жесткости опор шпинделя с подшипниками качения.

В частности, формула (1) показывает влияние силы осевого натяга F_H , на радиальную жесткость J_R [3]

$$J_R = \frac{K \cdot i \cdot C^{2/3} \cdot F_H^{1/3}}{tg^2 \alpha}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, характеризующий распределение нагрузки между телами качения подшипника; F_H – сила осевого натяга; α – угол контакта тел качения в подшипнике; i – число подшипников в опорах ($i=1$ или $i=2$); C – коэффициент, учитывающий количество шариков и диаметр шариков в подшипниках.

Как следует из формулы (1) при отклонении F_H от заданного значения параметр $J_{Ш}$ тоже будет изменяться, что согласуется с результатами расчетов с помощью математической модели ШУ и исследованиями натуральных образцов ШУ.

Опытная проверка коэффициента жёсткости $J_{Ш}$ аттестованных шпиндельных узлов и сравнение экспериментальных значений с расчетными данными, полученными на основе математической модели ШУ, показала, что погрешность расчета для ШУ разного вида составляла от 12 до 27% от минимального значения этого показателя (табл.1). Это подтвердило адекватность модели реальным ШУ и достоверность полученных результатов расчетов и измерений жесткостных параметров.

Табл. 1. Результаты проверки и расчета коэффициента податливости шпиндельных узлов

Диаметр шпинделя (мм)	Коэффициент жесткости $J_{Ш} \cdot 10^5$ (Н/м)		Количество проверенных узлов (шт.)	Погрешность расчета (%)	Коэффициент K_C
	Расчет	Опыт			
100	1,618	1,429	4	27	1,55
		–			
130	6,849	2,223	9	12	2,08
		3,703			
		–			
		7,693			

Экспериментальные данные использовались для вычисления коэффициента стабильности (качества) технологического процесса предприятия – K_C , определяющего качество обработки деталей, сборки узлов и квалификации персонала. Этот показатель определялся по формуле:

$$K_C = J_{Шmax}^p / J_{Шmin}^p,$$

где $J_{Шmax}^p$ и $J_{Шmin}^p$ – соответственно, наибольшее и наименьшее значения коэффициента жесткости ШУ, измеренные у фланца на конце шпинделя.

Согласно приведенным в таблице 1 данным K_C находится в пределах от 1,55 до 2,08. Таким образом, коэффициент качества технологического процесса K_C показывает, что изготовленные и аттестованные ШУ имеют значительное расхождение в значениях диагностического параметра $J_{Ш}$.

Следствием этого обстоятельства является различие значений полного моторесурса проверенных узлов, так как начальное значение $J_{Шmax}$ у разных ШУ различно, а, следовательно, и интервал диагностического параметра – разница максимального и минимального значений ($J_{Шmax} - J_{Шmin}$) будет разной. При одинаковых условиях эксплуатации и скорости деградации полный моторесурс у узлов, имеющих меньший допустимый диапазон изменения диагностического параметра, будет меньше, чем у ШУ, имеющих большой допустимый диапазон изменения $J_{Ш}$. Это может вызвать преждевременный отказ ШУ при эксплуатации.

При обнаружении больших значений коэффициента стабильности технологического процесса K_C не следует ограничиваться только диагностикой конкретного объекта, поскольку этого часто бывает недостаточно для обеспечения высокого качества выпускаемого станочного оборудования. Необходимо проводить диагностику производственных процессов и

технологических операций по изготовлению этого оборудования и выявлять причины наблюдаемых отказов.

Наличие значительного разброса выходных параметров, обнаруженных у группы подобных ШУ, указывает на наличие отказа в структуре производственного процесса, который имеет место при изготовлении этих узлов. Можно многократно обнаруживать один и тот же отказ и ремонтировать оборудование (заменять детали, например отказавшие подшипники), но нельзя добиться надежной работы такого оборудования, если не будут выявлены и устранены глубинные причины нарушения его работоспособности, поскольку отказ оборудования может быть следствием отказа производственного технологического процесса.

Технологический отказ может проявляться в форме ошибок в составе и последовательности операций технологического процесса, нарушения режимов обработки деталей (например, термической), несоответствия свойств используемых материалов условиям работы оборудования, несоблюдения технических условий при изготовлении деталей и сборке узлов, отсутствия контроля размеров деталей, несоблюдения порядка испытаний и паспортизации готовых изделий, использования комплектующих изделий без проверки их работоспособности (например из-за отсутствия необходимой оснастки и испытательных стендов).

Обследование технологического процесса изготовления серийных ШУ на крупном машиностроительном предприятии позволило определить несколько факторов, являющихся потенциальными источниками технологических отказов, которые могут стать причиной нестабильности жесткостных параметров ШУ [6].

Проверка, в частности, показала, что на обследованном предприятии отсутствует техническая документация для контроля качества этих узлов станков (стандарт предприятия), поэтому во время приемо-сдаточных испытаний не проводится контроль жесткостных параметров ШУ и отсутствуют нормы ТУ для этих параметров. Кроме того, обкатка ШУ после изготовления проводится лишь на холостом ходу, в то время как выполненная обкатка под нагрузкой является важным условием длительной работы узла при эксплуатации. Было выявлено что на предприятии не ведётся паспортизация комплектующих изделий и аттестация корпусных деталей и шпинделя, а имеющееся стендовое оборудование не приспособлено для проведения комплексных испытаний и контроля значений жесткостных параметров ШУ, так как отсутствуют необходимые современные приборы для измерения усилия предварительного осевого натяга подшипников. И наконец, техпроцесс не содержит операций по диагностике ШУ, которые подразумевают поиск причин значительной неоднородности (разброса) значений жесткостных параметров у однотипных серийных ШУ.

Указанные факторы можно рассматривать как технологические отказы, служащие предпосылкой для выпуска узлов, имеющих значительные различия выходных параметров (в частности, радиальной жёсткости ШУ). Это отрицательно влияет на качество изготавливаемых узлов, поскольку сокращает их моторесурс и гарантийный срок службы.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- для диагностирования технологического процесса изготовления ШУ станков на предприятиях можно использовать коэффициент стабильности K_C , который определяется для каждого рабочего параметра ШУ как отношение максимального и минимального значений этого параметра;

- одной из основных причин нестабильности значений жесткостных показателей ШУ при серийном изготовлении являются операции по монтажу подшипников в опорах ШУ, не обеспечивающие постоянство усилия осевого натяга;

- отсутствие современных стендов и методических разработок для диагностирования производственных технологических процессов не позволяет обеспечить высокое и стабильное качество выпускаемого станочного оборудования;

- для обеспечения высокого качества ШУ коэффициент стабильности K_C для жесткостных показателей не должен превышать значения 1,1.

Список литературы

1. Шитов А.М, Алешин А.К. Выбор параметров модели для диагностирования шпиндельных узлов станков // Технология машиностроения. – 2011. – № 8. – С. 32–35.
2. Шитов А.М. Диагностические методы и модели шпиндельных узлов станков // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №1. – С.43-50.
3. Кирилин Ю.В., Шестернинов А.В. Расчет и проектирование шпиндельных узлов металлорежущих станков с опорами качения. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 72 с.
4. Автоматизированный справочник шпиндельных опор. – М.: ЭНИМС, 1984. –48 с.
5. Левина З.М. Расчет жесткости современных шпиндельных подшипников // Станки и инструмент. – 1982. –№ 10. – С. 1-3.
6. Shitov A.M. Complex Examination of a Spindle Drive Unit of a Profile Grinding Machine // J Mach Manufact Reliab. 2011. Vol. 40. No.2 P. 165-170.

Сведения об авторах:

Шитов Аркадий Михайлович – к.т.н., с.н.с., ИМАШ РАН, г.Москва;

Кондратьев Игорь Михайлович – к.т.н., с.н.с., ИМАШ РАН, г.Москва.

MANUFACTURING PROCESS DIAGNOSTICS FOR MACHINE TOOL SPINDLE UNITS PRODUCTION

Shitov A.M., Kondratiev I.M.

Keywords: diagnostics, spindle unit, stiffness factor, manufacturing process stability criterion, technology process fault.

Abstract. Manufacturing process diagnostics method for machine tool spindle units (SU) production is presented. The method is based on spindle unit stiffness factor investigation and manufacturing process stability criterion calculation. The results of manufacturing process' monitoring and diagnostics are shown to establish the reasons for providing stability of output parameters of SU and its quality.