

УДК 621.91

В.А. Залога, д-р техн. наук, Р.Н. Зинченко, канд. техн. наук,  
Ю.В. Шаповал, Сумы, Украина

## **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

*У даній статті розглянуто питання діагностики стану різального інструменту при фрезеруванні. Встановлено, що із усіх систем діагностики стану різального інструменту, які є на даний час, найбільш перспективними є системи побудовані на основі непрямих методів, у зв'язку з можливістю проведення безперервного контролю стану різального інструменту у процесі різання. Також мало уваги приділяється діагностуванню стану різального інструменту при чистовому та тонкому фрезеруванні. Показано, що основними проблемами при побудові сучасних систем діагностики стану різальних інструментів при фрезеруванні, є вибір первинних давачів, які мають широкий діапазон вимірювань і високу чутливість, а також побудова швидкодіючих систем прийняття рішень по оцінці стану зношеності із достатньо високою достовірністю*

*В данной статье рассмотрены проблемы диагностики состояния режущего инструмента при фрезеровании. Установлено, что из всех существующих систем диагностики состояния режущего инструмента наиболее перспективными являются системы построенные на основе косвенных методов, вследствие возможности осуществления непрерывного контроля состояния режущего инструмента в процессе резания. Также мало внимания уделено диагностике состояния режущего инструмента при чистовом и тонком фрезеровании. Показано, что основными проблемами при построении современных систем диагностики состояния режущего инструмента при фрезеровании являются выбор первичных датчиков, которые обладают широким диапазоном измерения и высокой чувствительностью, а также построение быстродействующих систем принятия решения по оценке состояния износа с достаточно высокой достоверностью.*

*This article describes the cutting tool diagnosing problems during milling. Found that, all the existing systems of tool diagnosing are the most promising system constructed based on indirect methods, due to the possibility of continuous monitoring of cutting tool during cutting. Also, little attention is paid to the diagnosis of the state of the cutting tool during finishing and fine milling. It is shown that, the main problems in the construction of modern systems of cutting tools diagnostics for milling are the choice of the primary sensors, which have a wide measurement range and high sensitivity, as well as the construction of high-speed systems, the decision on the evaluation of wear with high reliability.*

Износ инструмента – один из самых важных параметров, который влияет на качество и скорость обработки детали. Среди всех погрешностей и отказов, которые могут иметь место в процессе обработки, особо выделяется отказ инструмента и погрешности, вносимые его износом, что обусловлено повышенными нагрузками и работой, выполняемой изнашивающимися

(изношенным) инструментом. Как известно, на долю отказов режущего инструмента (РИ) приходится подавляющее большинство случаев от общего числа отказов обрабатываемой системы. Износ инструмента, который в процессе обработки постоянно увеличивается вплоть до его полной непригодности, в значительной мере определяет точностные показатели процесса обработки и качество обработанной поверхности (макро-, микро- и субмикрорегеометрию, физико-химико-механическое состояние и остаточные напряжения в поверхностном слое). Если износ режущего инструмента по задней поверхности, в принципе, можно рассчитать [1] и при обработке деталей с относительно простыми формами поверхностей (плоскими, цилиндрическими и т.п.) однолезвийным инструментом (резцом) его можно учесть и в какой-то мере компенсировать с помощью уже сравнительно неплохо разработанных существующих систем, то при обработке поверхностей сложной формы (фасонных) и использовании многолезвийных инструментов (фрез, сверл и др.), когда процесс резания характеризуется большей степенью нестационарности и сопровождается переменными значениями геометрии лезвия (кинематических углов как в основной, так и в главной секущей плоскостях) и параметров режима резания (скорости резания, толщины и ширины среза, даже при постоянных значениях подачи и глубины резания) состояние геометрии лезвия и самой режущей кромки инструмента в формировании выходных показателей процесса резания играет значительно большую роль, такие системы практически отсутствуют. Проблема создания систем для оценки (контроля) степени износа инструмента и его возможной компенсации при нестационарном резании путем корректирования либо режима резания, либо положения инструмента еще недостаточно разработана, хотя такие работы и ведутся [2]. Еще одной существенной проблемой при механической обработке является определение момента «остановки» (диагностика состояния режущего инструмента) процесса резания с целью замены инструмента или его режущей части, например, режущей кромки многогранной неперетачиваемой пластины, при достижении принятым критерием износа заданной величины (характеристики).

Таким образом, при контроле и диагностике состояния режущего инструмента необходимо решать следующие задачи: контроль работоспособности инструмента, т.е. пригоден еще инструмент или нет (аварийные ситуации); контроль размерного износа инструмента; контроль состояния режущей кромки, что особенно актуально при чистовой обработке поверхностей и обработке поверхностей сложной формы (потеря необходимой геометрической формы инструмента, изменение переднего и заднего углов и т.п.), особенно при обработке на станках с ЧПУ, многоцелевых (обрабатывающих центрах) и др.

**Цель работы:** анализ современного состояния вопроса диагностирования режущего инструмента в процессе фрезерования с выявлением их достоинств и недостатков.

При обработке деталей высокой сложности вопросы его диагностирования особенно актуальны. На сегодняшний день разработано относительно большое число систем для контроля степени изнашивания и определения момента выхода из строя (поломки) инструмента [2 - 10]. Эти системы классифицируются по различным показателям (рисунок 1), определяющим стратегию диагностирования инструментов, например, силе резания [7, 11], мощности резания [11] и др.

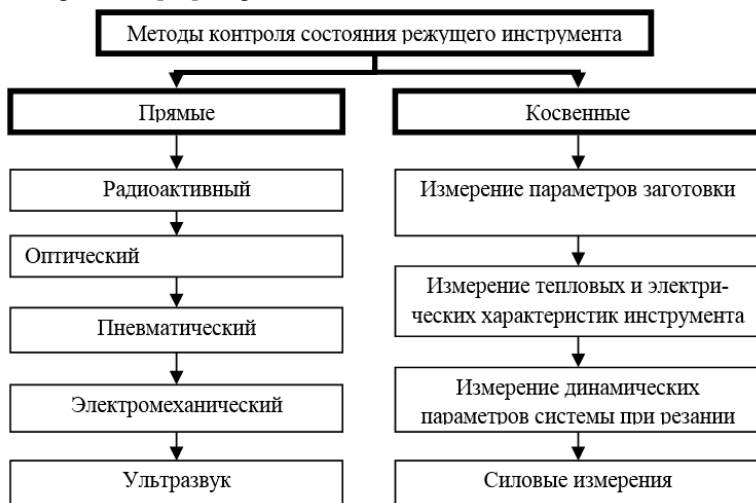


Рисунок 1 – Методы контроля состояния РИ

В зависимости от времени наблюдения за инструментом, системы можно разделить на непрерывно получающие информацию при обработке [6, 10] и получающие информацию в перерывах процесса обработки (например, с использованием контактных измерительных систем компании Renishaw [12]). И в том, и в другом случаях требуется определенное время для сбора данных о результатах измерений, например, после обработки некоторого числа заготовок.

При обработке деталей на станках - автоматах или станках с ЧПУ, где оператор практически не принимает непосредственного участия в обработке детали, системы активного (непрерывного) контроля состояния режущего инструмента являются особенно необходимыми. При проектировании систем

активного контроля, основанных на прямых методах контроля (рисунок 1) состояния РИ, существуют факторы, которые снижают эффективность работы системы. Например, при оптическом способе контроля, сложно добиться «хорошей видимости» режущей кромки при воздействии СОЖ и стружки, пневматический и радиоактивный методы ограничивают использование стандартной оснасти без дополнительной их доделки [13].

Для вращающегося инструмента проблема контроля встает более остро. Развитие инструментальных материалов и покрытий приводит к значительному увеличению скорости обработки, что очень усложняет контроль состояния кромок инструмента, и практически делает невозможным процесс его непрерывного прямого контроля. Прерывистое резание также накладывает определенные ограничения на выбор принципов диагностирования состояния режущего инструмента.

Наиболее «эластичным» направлением в контроле режущих инструментов является мониторинг (непрерывный контроль) непосредственно в процессе обработки. Все методы диагностики текущей работоспособности режущих инструментов можно условно разделить на четыре группы [13], а их, в свою очередь, на методы прямого контроля, основанные на непосредственной регистрации величины износа инструмента, и косвенного контроля (рисунок 2), использующие физические явления, которые сопровождают процессы резания и изнашивания инструмента [12].



Рисунок 2 – Косвенные методы контроля состояния режущего инструмента

При прямом контроле параметры износа (характеристики лунок и ленточек износа) на контактных площадках инструмента измеряются непосредственно в процессе обработки. Прямые измерения износа инструмента вызывают некоторые затруднения, что связано в основном со сложностью конструкции датчиков износа. При выполнении прямых измерений используют, как правило, вспомогательные или холостые ходы инструмента, выход инструмента или режущих кромок (зубьев) из процесса обработки.

Аппаратура для контроля износа режущих инструментов после окончания процесса резания может быть размещена таким образом, что на нее не будут оказывать вредное влияние различные факторы, присущие процессу материалобработки. Такие измерения обладают повышенной надежностью. Однако измерения осуществляются периодически, что не позволяет своевременно обнаружить отказы режущего инструмента. Необходимая периодичность контроля может быть определена на основании опыта использования соответствующего режущего инструмента на данных технологических операциях и на основании вероятностных расчетов с учетом предполагаемого периода стойкости режущего инструмента.

Косвенные методы используются все в больших масштабах. При этих методах контролируются различные характеристики процесса резания (рисунок 2), которые имеют определенные корреляционные связи с величиной износа и интенсивностью изнашивания режущих кромок инструмента. Принципы и техника измерения при косвенных методах сравнительно просты. Они позволяют непрерывно получать в процессе обработки информацию об износе режущей кромки. Пригодны они также для регистрации резких или скачкообразных изменений износа или разрушения режущих кромок инструмента в течение коротких интервалов времени [11].

Основной недостаток косвенных методов состоит в том, что корреляционная связь между измеренным фактором и износом инструмента должна быть определена экспериментальным путем для каждого конкретного случая обработки с тем, чтобы на ее основе можно было контролировать с помощью соответствующего датчика износа инструмента в процессе обработки.

Одним из сложных, с точки зрения диагностики состояния режущего инструмента, является процесс фрезерования, которым на сегодняшний день занимаются многие ученые. Наиболее популярными косвенными методами определения износа при фрезеровании в настоящее время являются методы анализа сигналов акустической эмиссии [8, 10], вибраций элементов технологической системы [3, 7], а также измерение мощности привода главного движения резания или усилия подачи [11].

Диагностика износа режущего инструмента методом анализа сигнала виброакустической эмиссии (ВАЭ) [2, 3, 8, 10] наряду с многими достоинствами имеет и ряд недостатков. Большое количество шумоизлучающих «включений», входящих в сигнал ВАЭ и зависящих от упругих, тепловых и других процессов, возникающих на всем пути от зоны резания до места регистрации сигнала виброакустической эмиссии, а также дополнительное возникновение составляющих сигнала ВАЭ от элементов и узлов станка, например, подшипников. В настоящее время все эти процессы и их составляющие сложно с допустимой (приемлемой) точностью описать математически, и, как следствие, сложно, по принимаемому сигналу судить о процессах, происходящих в зоне резания, в т.ч. и изнашивания.

Одним из относительно качественных методов контроля режущих свойств инструмента является метод измерения мощности резания и усилия подачи, описанный, например, в [11]. Эта система разработана и внедрена фирмой Opmative systems. Электронные системы современных станков с ЧПУ позволяют без вмешательства в систему станка передавать в измерительную систему сигналы о силовых характеристиках как главного привода, так и осевых приводов станка. Предложенная в работе система диагностики непосредственно анализирует полученные сигналы и достаточно хорошо работает при черновых и получистовых режимах обработки. Существенным недостатком данного метода контроля процесса резания является его неспособность диагностики состояния режущего инструмента при чистовой обработке.

Один из косвенных методов диагностики состояния вращающегося режущего инструмента, описанный патентом [14], основан на том, что во время резания определяют направление полета стружки, зависящего от ее веса, и судят о степени износа инструмента по изменению угла между направлениями подачи и полета стружки. Однако его применение существенно ограничено тем, что в реальном времени сложно измерять вес стружки во всех точках ее возможного схода.

Одним из перспективных методов диагностики состояния инструмента при сверлении является метод, описанный в [9]. Предлагаемый способ диагностики основан на анализе низкочастотных колебательных процессов упругой системы станка. Особенность метода заключается в источнике диагностической информации, в качестве которого используется время  $T$  поворота инструмента на один оборот. При многократных последовательных измерениях время  $T$  претерпевает случайные изменения, связанные с изменением параметров крутильных колебаний сверла под действием изменяющегося крутящего момента. Данный метод в «чистом» виде (в предложенной трактовке) достаточно сложно применить для диагностики состояния инструмента при фрезеровании. Однако, после некоторого

усовершенствования возможно его применение и для диагностики состояния многолезвийного инструмента, лезвия которого работают по схеме «резание-отдых». Для этого необходима разработка системы с достаточно высоким быстродействием.

Способ диагностики, предложенный учеными T.Amin J., E.M. Joo и L.Xiang [15], позволяет с использованием системы искусственного интеллекта достаточно хорошо осуществлять мониторинг состояния фрез. В качестве первичных датчиков авторами предложено использовать для определения сил резания динамометр, трехосевой акселерометр и датчик акустической эмиссии. Контроль состояния инструмента осуществляется посредством анализа пиков сигналов датчиков, которые возрастают в зависимости от степени износа инструмента. Вместе с тем, метод хорошо показал себя только на фрезях с одинаковой геометрией. Для осуществления диагностики система должна быть обучена хотя бы на одной фрезе, доведенной до критического износа. Также метод плохо работает при обработке деталей с малыми объемами срезаемого металла.

Еще один способ анализа состояния инструмента разработанный учеными Azmi A.I., Lin R.J.T. [16], а также P. Fu, A.D. Hore P.[17, 18] в качестве первичных данных использует измерение составляющих сил резания. Диагностическая система выполнена на базе интеллектуальной нечеткой логики модели износа инструмента. Проведенные авторами исследования показали, что точность прогнозирования системы в большей степени зависит от усилия подачи, нежели от других составляющих силы резания. Применять такую диагностическую систему в реальных производственных условиях довольно сложно из-за громоздкости динамометров, а также из-за внесения в технологическую систему относительно маложесткого звена.

Польскими учеными Bogdan Broel – Plater, Krzysztof Jaroszewski, Paweł Waszczuk [19] разработана система диагностики инструмента при микрофрезеровании. Поводом для разработки данной системы диагностики послужила практическая невозможность определения износа для фрез диаметром менее 0,5 мм. В качестве первичных датчиков было использовано 3 одноосевых пьезоэлектрических акселерометра, установленных возле шпинделя. В качестве диагностической системы использована нейронная сеть определенной структуры. Система указывает на наличие инструмента в шпинделе, а также распознает, поврежден инструмент или нет. К недостаткам данной диагностической системы можно отнести невозможность определения фактической величины износа, а также то, что система работает хорошо только при определенных оборотах (24000об/мин).

Методы контроля состояния режущего инструмента при фрезеровании, разработанные многими учеными [20-26] достаточно схожи между собой.

Они используют принципиально схожие датчики и системы принятия решения. Разница между ними состоит в различных способах и условиях обработки.

### **Выводы.**

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1) в настоящее время диагностика режущего инструмента при фрезеровании является актуальным вопросом, о чем свидетельствует достаточное количество как относительно «старых», так и новых работ, посвященных одним и тем же методам диагностирования, что свидетельствует о недостаточной изученности и перспективности данного вопроса;

2) из всех существующих систем диагностики РИ, на наш взгляд наиболее перспективными являются системы диагностики, построенные на основе косвенных методов вследствие возможности осуществления непрерывного контроля состояния РИ в процессе резания;

3) даже самые современные системы диагностики РИ обладают рядом недостатков, которые затрудняют их использование, причем большинство из них должны обладать хорошей базой данных для обучения системы принятия решений [17, 19].

4) некоторые системы диагностики РИ разработаны для узких задач, например микрофрезерования [19], либо фрезерования торцевыми фрезами [25];

5) мало внимания уделено диагностике состояния РИ при чистовом и тонком фрезеровании;

6) основными проблемами при построении современных систем мониторинга состояния РИ при фрезеровании является выбор первичных датчиков, которые бы обладали широким диапазоном измерения и высокой чувствительностью для обеспечения достаточно высокой (заданной, требуемой) достоверности получаемого результата оценки степени износа, а также построение быстродействующих систем принятия решения об изменении положения инструмента или его замене.

**Список использованных источников:** 1. *Грубый С.В.* Методика расчета скорости изнашивания лезвийных инструментов // Материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии приборостроения». – Орел, 2003. – С.168-171. 2. *Румбешта В.А., Кокаровцев В.В., Харкевич А.Г.* Организация системы диагностики инструмента в процессе механообработки // Стойкость и диагностика режущего инструмента в условиях автоматизированного производства, ЦДНТИ, Ижевск, 1988. – с. 102-106. 3. *Симута М.О., Румбешта В.О., Підвисоцька В.С.* Діагностика технічного стану різального інструмента при обробці // Вісник НТУУ «КПІ». Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2010. – Вип. 39. – с. 111-116. 4. *Антошук С.Г., Николенко А.А., Билошенко П.Н.* Компьютерная система диагностики режущего инструмента // Міжвідомчий науково – технічний збірник «Електромашинобудування та електрообладнання» випуск 62/2004р. – с. 141-144.

5. Деревянченко А.Г., Павленко В.Д., Андреев А.В. Диагностирование состояний режущих инструментов при прецизионной обработке, Одесса: Астропринт, 1999г. 6. Остафьев В.А. Устройство для измерения скорости износа режущего инструмента в системах адаптивного управления процессом резания / В.А.Остафьев, Г.С.Тымчик, В.В.Шевченко // Приборостроение: Респуб. межведомст. научн.-техн. сб.–1985. – Вып. 37. – С. 91-93. 7. Медведев В.В., Медведев В.С., Толкач В.В. Разработка и исследования критерия диагностики состояния режущего инструмента, инвариантного к режимам резания // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. Вип. 40. – 276 с. 8. Подураев В.Н., Барзов А.Л. Анализ и прогнозирование процесса резания методом акустической эмиссии. - В сб. Перспективы развития режущего инструмента. М.: МДНТП, 1978. С. 323-328. 9. Алешин А.К., Гуцин В.Г. Метод диагностики состояния инструмента. – Вестник научно-технического развития 2009г. – Вып. №2. – с. 3 – 6. 10. Зінченко П.М. Підвищення ефективності точіння за рахунок діагностики зношування інструменту щодо акустичного випромінювання: автореф. дис. на здобуття ступеня кандидата техн. наук: 05.03.01 / П.М. Зінченко. – Х., 2005. - 23 с. 11. *Omative Systems*, Техническая спецификация системы адаптивного регулирования и мониторинга для металлообрабатывающих станков с CNC. 12. *Renishaw OMP60 Quick-start guide A-4038-8501* 13. Палей С.М. Использование электрических явлений при резании для контроля состояния режущего инструмента: Метод. Рекомендации. – М.: ЭНИМС. 1984. 14. Способ диагностики состояния режущего инструмента: Пат 2098234 Рос. Федерация/ Гречинников В.А.; Хаemt Л.Г.; Жохова В.В.; Диденко Г.П.; заявитель и правообладатель Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", заявл. 06.05.1996, опубл. 10.12.1997 15. Fuzzy clustering of wavelet features for tool condition monitoring in high speed milling process /T.Amin J., E.M. Joo, L.Xiang at all. // Annual Conference of the Prognostics and Management Society.– 2010. – Pp. 1–5. 16. Azmi A.I., Lin R.J.T. and Bhattacharyya D. Fuzzy Logic Predictive Model of Tool Wear in End Milling Glass Fibre Reinforced Polymer Composites/ *Advanced Materials Research* Vol. 214 (2011) pp 329-333. 17. Fu P. Tool condition monitoring based on an adaptive neurofuzzy architecture, P. Fu, A.D. Hope, G.A.King // *Advances in Materials Manufacturing Science and Technology*, 2004. – Vol. 471–472. – Pp.196–200. 18. Fu P. A hybrid pattern recognition architecture for cutting tool condition monitoring, *Pattern Recognition Techniques / P.Fu, A.D. Hope // Technology and Applications*. – 2008. – Pp. 547–558. 19. Bogdan Broel – Plater, Krzysztof Jaroszewski, Pawel Waszczuk. Tool condition monitoring based on artificial neural networks in micromilling/ XIV International PhD Workshop OWD 2012, 20–23 October 2012 20. Sebastien GARNIER, Benoit FURET. Identification of the specific coefficient to monitor the cutting process in milling// Institut de Recherche en Cybernetique de Nantes (IRCyN) CNRS UMR 6597 21. Iulian Marinescu, Dragos A. Axinte. A time frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multipletooth cutting simultaneously, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.49, pp.53-65, 2009. 22. Dragos A. Axinte, Nabil Gindy, Kate Fox, Iker Unanue. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.44, pp.1091-1108, 2004. 23. Teti R., I.S.Jawahir and K.Jamelniak, T.Segreto, S.Chen and J.Kossakowska “Chip Form Monitoring through Advanced Processing of Cutting Force Sensor Signals”, *Annals of the CIRP*, Vol. 55(1), pp. 75- 80, 2006. 24. C. S. Ai, Y. J. Sun, G. W. He, X. B. Ze, W. Li, K. Mao, ”The milling tool wear monitoring using the acoustic spectrum”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-011-3738-z, 2011. 25. Claudiu-Florinel BISU, Raynald LAHEURTE, Philippe DRANIS, Alain GERARD. Dynamic Behavior Characterization of the Milling Tool During the Cutting Process// *Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III WCE 2012*, July 4 - 6, 2012, London, U.K. 26. Bisu C.F., Zapciu M., Gerard A., Vijeleda V., and Anica M.. Envelope dynamic analysis for cutting milling tool. In *Eighth International Conference on High Speed Machining - HSM 2010*, 8-10 December, Metz.

*Поступила в редколлегию 04.07.2013*