

Анализ методов диагностики состояния режущей кромки инструмента Бурдо Г. Б.¹, Адерорхо К. И.²

¹Бурдо Георгий Борисович / Burdo Georgiy Borisovich – кандидат технических наук, профессор;

²Адерорхо Клемент Ихеова / Aderorho Clement Ikheowa – аспирант,
кафедра технологии и автоматизации машиностроения, факультет машиностроения,
Тверской государственный технический университет, г. Тверь

Аннотация: износ инструмента является главной причиной деформации в процессе резки. Путем проверки на износ задней поверхности и настройки глубины, можно легко исправить ошибку измерения заготовки и улучшить общее качество продукта. В этой статье, автор осветит некоторые исследования, проведенные по разным методам измерения износа режущего инструмента. Полученные результаты могут помочь провести автоматизацию старых токарных станков с модификацией или без модификации внутренней структуры станка.

Ключевые слова: обнаружение (диагностика) износа инструмента, обнаружение поломки инструмента, одно- и мультисенсорный метод.

К концу 1990-х годов развитие применения автоматизированных систем обработки для резки металла вызвало необходимость автоматической диагностики износа инструмента [2]. Задержка замены инструмента может привести к повреждению или размерной деформации обрабатываемых поверхностей. С другой стороны, чрезмерно частая замена инструмента или прямое измерение износа инструмента может прерывать процессы производства, мешать им или замедлять их [2, с. 20].

Вследствие этого, были разработаны некоторые непрямые или бесконтактные методы для определения или прогнозирования износа инструмента. В 1996 году, для определения крутящего момента вращения шпинделя были использованы мощность шпинделя и измерения тока, что является непрямым методом измерения износа инструмента. Тем не менее, измерение силы тока шпинделя не достаточно чувствительно для резки тонких слоев или небольших инструментов. Измерение силы резки также было использовано для диагностики износа инструмента, но измерения, как правило, зависят от специфики применения. По этой причине, измерение силы резки не применимо в полной мере для процессов диагностики износа инструмента общего назначения [1].

В Оусли и др., 1997 г., авторы представили подход к диагностике состояния режущего инструмента. Выделение признаков из вибраций во время сверления генерируется самоорганизующейся картой Кохонена (SOFM- искусственная нейронная). Обработка сигналов предполагает выделение спектральных признаков для получения частотно-временного представления. Эти признаки являются входными данными классификатора НММ. Авторы показали, что сеть Кохонена (SOFM) является подходящим алгоритмом для извлечения признаков из вибрационных сигналов [12].

В 1998 году, были использованы также вибрация, акустическая эмиссия и измерения электрического сопротивления. Несмотря на перспективность, измерения через акустическую эмиссию имели проблему с высоким уровнем шумового загрязнения в рабочей среде [14]. Также использовались измерения температуры инструмента, но в то время было трудно ее измерить с приемлемой точностью. И, наконец, были использованы измерения поверхностной шероховатости, но, в то время, измерение шероховатости поверхности требовало извлечения заготовок из обрабатывающих центров [1].

В результате, Бартоном, Рубеном [1], МакБрайдом и др. [11] был предложен метод, использующий бесконтактные инструменты оптического волокна и интерферометрия для измерения заготовки акустической эмиссии и обработки поверхности для прогнозирования износа инструмента. Интерферометрия предлагала высокочувствительный метод измерения перемещения или вибрации. Их метод достигает более точных измерений акустической эмиссии по сравнению с предыдущими методами, требующими контакта с устройствами, использующими пьезоэлектрические преобразователи, расположенные на станине, а также достигает точных бесконтактных, активных измерений поверхности. С другой стороны, разработанные оптические методы были очень восприимчивы к оптическим помехам или загрязнениям из-за смазочно-охлаждающей жидкости или других загрязняющих веществ.

В 1996 году Янгом [19] были рассмотрены методы измерения режущего инструмента или температуры стружки для диагностики износа инструмента. В режущие инструменты были встроены термодпары, оптические пирометры и радиоактивные изотопы для измерения температуры на поверхности взаимодействия инструмента и заготовки, но встроенные датчики изменяли измеренные температурные поля. Инфракрасное излучение, исходящее от режущих инструментов также было использовано для

диагностики температуры инструмента и, таким образом, косвенно, износа инструмента. Но, излучаемая температура не точно отражает температуру материала инструмента и позволяла только рассчитать температуры для достижимых поверхностей [11, с. 19].

В результате Янг [19] использовал инфракрасную камеру - прибор для измерения температуры на задней поверхности взаимодействия инструмента и заготовки. Янг показал, что износ инструмента влияет на температуру задней поверхности взаимодействия. Тем не менее, Янг не разрабатывал этот метод, как практичный и недорогой способ измерения температуры активной задней поверхности взаимодействия и диагностики износа инструмента.

В 1997 г., Чен и Блэк [2] рассмотрели способы диагностики поломки инструмента и его износа, включающие измерение акустической эмиссии, вибрации, силы тока электродвигателя шпинделя, интенсивности звука с использованием динамометров и тензодатчиков вмонтированных в шпиндель. По информации из их обзора, Чен и Блэк решили использовать динамометр для контроля силы резки и нечеткие внутрисетевые системы принятия решения для определения поломки инструмента на основании измерения силы резки, с точностью около 90%. Они рекомендовали использовать акселерометр вместо динамометра, чтобы снизить затраты. Позже, в 1998 году, Хуан и Чен [8] увеличили точность этой системы приблизительно на 94%.

В 1998 году, Чи и Дорнфилд [4] использовали многосенсорный подход, включающий и акустическую эмиссию и датчик силы резки, с экспертной системой использующей дерево решений и данные группового метода обработки для улучшения оценки износа инструмента и точности прогнозирования (в пределах 5% от измеренных значений) по модели, созданной с помощью пошагового регрессионного анализа.

Также в том году, Квон и др. использовали многосенсорный подход, путем комбинирования датчика акустической эмиссии и датчика мощности для диагностики износа инструмента с 96% точностью и вычисления фактического износа инструмента с точностью до 90%. Они пришли к выводу, что использование многосенсорного подхода с нейронной сетью, для определения данных с нескольких датчиков, повышает точность обнаружения износа инструмента по сравнению с односенсорным методом в сложных и изменяющихся условиях обработки [14].

В 1999 году, Чен и Чен [3] разработали систему диагностики поломки инструмента в конце фрезы, с точностью около 90%, с использованием акселерометра. Они основали свою систему на более ранних системах, которые использовали акселерометры для диагностики износа инструмента при токарных операциях и операциях сверления. Методика основана на частотном диапазоне. В области низких частот присутствует две вершины (пика), которые сравниваются, для того, чтобы вычислить коэффициент. Он может быть индикатором для мониторинга поломки инструмента. Использование акселерометров, а не датчиков акустической эмиссии или динамометров помогло снизить затраты, повысить надежность, упростить установку устройства и устранить необходимость изменения механизма для измерения. Они также отметили два основных ограничения метода: (1) режущий параметр, инструмент, и материал заготовки зависят от пороговых значений устройства и (2) неверное обнаружение поломки инструмента в присутствии вибраций при обработке.

В 1999 году Чоудхури и др. был разработан метод прогнозирования износа инструмента в токарных операциях, с точностью до 94%, с использованием волоконной оптики и нейронной сети для измерения изменений диаметра заготовки [5].

Димла в 1999г использовал многосенсорное измерительное устройство для прогнозирования износа инструмента при токарных операциях. Он использовал динамометр для измерения силы резки и акселерометр для измерения вибрации. Димла использовал однослойную нейронную сеть для достижения 73-93% точности классификации инструмента и многослойную нейронную сеть для достижения 81-98% точности классификации инструмента [6].

Гоувкар в 2000 г. [7] использовал пьезоэлектрический датчик акустической эмиссии со спектральным анализом, чтобы классифицировать форму стружки и динамометр с нелинейным анализом временного ряда для диагностики износа инструмента и динамической вибрации при токарных операциях.

Ли и др. в 2000 г. [10] снова воспользовались датчиком тока серводвигателя для диагностики износа инструмента, чтобы помочь преодолеть недостатки бывших решений, такие как высокая стоимость, коэффициенты производительности и эффективность только в ограниченном диапазоне режимов резки. В частности, использование динамометров для измерения силы резки было признано как один из наиболее популярных методов мониторинга износа инструмента, но использование его в промышленности не практично из-за высокой стоимости датчика, негативного воздействия на жесткость режущей системы, а также ограничения на длину хода из-за электропроводки динамометра.

До работ Ли и др. [10], датчики тока и сервопривод были успешно использованы для диагностики поломки инструмента, но не удавалось с их помощью точно определить степень износа инструмента. Ли и др. пришли к выводу, что использование датчиков тока имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием динамометра: более низкая стоимость, меньшая навязчивость, меньшее количество помех в рабочей зоне, простота дооснащения, и более простая конфигурация аппаратного обеспечения. Тем не менее, они снова пришли к выводу, что использование датчиков тока не предоставляет достаточную точность для тонких слоев резки, потому, что из-за износа инструмента, изменения сигнала тока трудно обнаружить в пределах сигнала суммарного тока.

В 2000 году (Атлас и др.), авторы использовали Скрытую Марковскую модель (СММ) для диагностики износа инструмента при фрезерных процессах. Выделение признаков из вибросигналов - квадратный корень среднего значения энергии и ее производной. Два условия режущего инструмента были определены: изношенное и не изношенное состояние. Описанный успех составил около 93%.

В 2002 году Ли [9] также рассмотрел использование датчиков акустической эмиссии для мониторинга состояния машины. Ли оценил датчик АЭ как один из наиболее эффективных способов диагностики износа инструмента, за то, что он реагирует на больший диапазон частот, чем другие датчики, и в то же время, не вмешивается в операции резки.

По обзору Ли [10] и предыдущим цитатам видно, что прежние методы обработки сигналов АЭ для выделения функции сигнала включали анализ временных рядов, быстрые преобразования Фурье (FFTs), кратковременные преобразования Фурье (STFTs), распределения Вигнера-Вилья, и вейвлет-преобразования. Прежние методы классификации износа инструмента от заданных характеристик сигнала, включали регрессионный анализ, классификацию образов, деревья решений, групповой метод обработки данных, нечеткую классификацию, нейронные сети, слияние датчиков, и слияние данных.

В 2002 году, Сик [16] рассмотрел 138 предыдущих публикаций, связанных с мониторингом износа инструмента при токарных операциях. Сик до сих пор оценивал даже самые перспективные методы диагностики как не рыночные из-за недостаточной точности и несовместимости со всеми операциями (операция ограничивается конкретным типом станка, конкретным материалом заготовки и покрытием инструмента или небольшим диапазоном условий резки). В соответствии с его обзором, большинство из прежних систем диагностики токарных операции использовали нейронные сети для классификации износа инструмента. Для классификационных систем, использующих нейронные сети, расширение сферы применения требует длительных тренировок [16].

Кроме того, ограничения датчика, усложняет измерения в процессе обработки. Для того чтобы расширить сферу применения, Сик предложил метод «нормализации» измеряемых сигналов силы с помощью коэффициентов влияния, основанных на условиях резки (например, геометрии инструмента и материала заготовки) и отделения изменений сигнала, зависящих от условий резания от изменений сигнала, зависящих от износа инструмента, с учетом характеристики временного сигнала

В 2003 году Saglam и Unuvar, работали с многослойной искусственной нейронной сетью (ИНС) для мониторинга и диагностики состояния режущего инструмента и шероховатости поверхности. Полученный результат - 77% для износа инструмента и 80% для шероховатости поверхности [15].

В 2004 году Dey & Stori представили подход мониторинга и диагностики, основанный на байесовской сети (BN). Этот подход объединяет несколько измерений процесса с датчиков в последовательных операциях обработки, для выявления причины изменения процесса. Она предоставляет уровень вероятностной достоверности диагноза. BN была обучена набором из 16 экспериментов, а производительность была оценена за 18 новых экспериментов. BN состояние было верно диагностировано с уровнем достоверности 60% в 16 из 18 случаев [17].

В 2004 году Габер и др. представил исследование режущего инструмента для мониторинга износа в процессе высокоскоростной обработки (HSM) на основе сигнатурного анализа различных сигналов во временных и частотных областях. Авторы использовали сенсорную информацию из динамометров, акселерометров и датчиков акустической эмиссии, чтобы получить отклонение показательных переменных. Тесты были разработаны для различных скоростей резки и скорости подачи, чтобы оценить влияние нового и изношенного режущего инструмента. Данные были преобразованы от времени к частотной области с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT). Они пришли к выводу, что вторые гармоники частоты возбуждения зубца в вибросигнале являются лучшим индикатором для мониторинга износа режущего инструмента [18].

Предложение, использовать механизмы распознавания речи в системах диагностики состояния износа режущего инструмента представлено в журнале (Вальехо и др., 2005 году) [20]. Кроме того, Вальехо и др., в 2006 году представили новый подход - онлайн мониторинг состояния режущего инструмента при торцевом

фрезеровании [21]. Это предложение основано на непрерывном классификаторе скрытой марковской модели (СММ), а векторы функция были вычислены из вибрационных сигналов между режущим инструментом и обрабатываемой деталью. Векторы признаков состояли из Мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC). Успех распознавания состояния режущего инструмента был равен 99,86% и 84,55%, для обучения и тестирования набора данных, соответственно. Кроме того, в (Вальехо и др., 2007 г.) предложен косвенный метод мониторинга, основанный на измерении вибрации во время процесса торцевого фрезеровании [22]. Авторы сравнили производительность трех различных алгоритмов: СММ, ANN, и линейной квантизации векторов (LVQ). СММ оказался наилучшим алгоритмом с точностью 84,24%, далее LVQ с точностью 60,31%

В 2015 году Георгий М. Мартинов, Антон С. Григорьев и Петр А. Никищечкин из МГТУ предложили использовать 4 датчика (тензометрический, температурный, микро-перемещений, сенсор вибрации) на станке. На практике, тензометрический датчик был установлен на державке инструмента токарного станка SA-700 с интегрированным модулем диагностики в систему ЧПУ, что позволило считывать информацию о силе резки относительно осей [23]. Этот метод имеет высокую оценку успешности и перспективы в промышленности.

Выводы

Все виды диагностики имеют свои преимущества и недостатки. Результат диагностики зависит от режима резания.

Многие подходы были опробованы, но новые диагностические системы требуют наличия базы данных, алгоритмов и интерфейса на ПК или ЧПУ станка.

На мой взгляд, косвенный метод диагностики имеет большие исследовательские перспективы. После должного рассмотрения, опираясь на цену, надежность, точность, сложность установки, условия рабочего места на заводе, предпочитаем диагностику посредством акселерометра вместе с оптическим микроскопом в виде вспомогательное устройство [24, с. 25].

Литература

1. *Barton J., Reuben B.* Tool - wear monitoring by optical techniques, *Materials World*, 4 (3), 1996. Pp. 131-132.
2. *Chen J. C., Black J. T.* A fuzzy-nets in-process (FNIP) system for tool-breakage monitoring in end-milling operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (6), 1997. Pp. 783-800.
3. *Chen J. C., Chen W. L.* A tool breakage Detection system using an Accelerometer sensor, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10, 1999. Pp. 187-197.
4. *Chi L. A., Dornfield D. A.* A self-organizing approach to the detection and prediction of tool wear, *ISA Transactions*, 37. 1998. Pp. 239-255.
5. *Choudhury S. K., Jain V. K., Rama Rao Ch. V. V.* On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39. Pp. 489-504, 1999.
6. *Dimla D. E.* Application of perceptron neural networks to tool state classification in a metal-turning operation", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12, 1999. Pp. 471-477.
7. *Govekar E., Gradisek J., Grabec I.* Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes, *Ultrasonics*, 38, 2000. Pp. 598-603.
8. *Huang P. T., Chen J. C.* Fuzzy logic-base tool breakage detecting system in end milling operations, *Computers and Industrial Engineering*, 35 (1-2), 1998. Pp. 37-40.
9. *Li X.* A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 2002. Pp. 157-165.
10. *Li X., Djordjevich A., Venuvinod P. K.* Current-sensor-based feed cutting force intelligent estimation and tool wear conditioning monitoring, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(3). 2000. Pp. 697-702.
11. *McBride R., Carolan T. A., Barton J. S., Wilcox S. J., Borthwick W. K. D., Jones J. D. C.* Detection of acoustic emission in cutting processes by fibre optic interferometry, *Measurement Science and Technology*, 4(10). 1993. pp. 1122-1128.
12. *Owsley L. M., Atlas L. E. and Bernard G. D.* Self-Organizing Feature Maps and Hidden Markov Models for Machine-Tool Monitoring, *IEEE Transactions on Signals Processing*, 45 (11), 1997. Pp. 2787-2798.
13. *Atlas L., Ostendorf M., Bernard G. D.* Hidden Markov Models for Machining Tool-Wear, *IEEE*, 2000. Pp. 3887-3890.
14. *Quan Y., Zhou M., Luo Z.* On-line robust identification of tool-wear via multi-sensor neural-network fusion, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11, 1998. Pp. 717-722.

15. *Saglam H., Unuvar A.* Tool Condition Monitoring in Milling based on Cutting Forces by a Neural Network, *International Journal of Production Research*, 41 (7), 2003. Pp. 1519-1532.
16. *Sick B.* Fusion of hard and soft computing techniques in indirect, online tool wear monitoring, *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics*, 32 (2), 2002. Pp. 80-91.
17. *Dey S., Stori J. A.* A Bayesian Network Approach to Root Cause Diagnosis of Process Variations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (45), 2004. Pp. 75-91.
18. *Haber R. E., Alique A.* Intelligent Process Supervision for Predicting Tool Wear in Machining Processes. *Mechatronics*, (13), pp. 825-849 (2003).
19. *Young H. T.* Cutting temperature responses to flank wear, *Wear*, 201, 1996. Pp. 117-120.
20. *Vallejo A. J., Nolasco-Flores J. A., Morales-Menéndez R., Sucar L. E., Rodríguez C. A.* Tool-wear Monitoring based on Continuous Hidden Markov Models, LNCS 3773 Springer-Verlag, X CIARP., 2005. Pp. 880-890.
21. *Vallejo A. J., Nolasco-Flores J. A., Morales-Menéndez R., Sucar L. E., Rodríguez C. A.* Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center, *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. 2006. Pp. 7097-7101.
22. *Vallejo A. J., Morales-Menéndez R., Garza - Castañón L. E., Alique J. R.* Pattern Recognition Approaches for Diagnosis of Cutting Tool Wear Condition, *Transactions of the North American Manufacturing of Research Institution of SME*, 35, 2007. Pp. 81-88.
23. *Tan Y. et al.* Advance in Swarm and Computational Intelligence: 6th International Conference, ICSI 2015. Part 3, 2015. Pp. 115-126.
24. *Деревянченко А. Г., Павленко В. Д., Андреев А. В.* Диагностирование состояний режущих инструментов при прецизионной обработке, Одесса: Астропринт, 1999.
25. *Алешин А. К., Гуцин В. Г.* Метод диагностики состояния инструмента. *Вестник научно-технического развития*. Вып. № 2, 2009. С. 3–6.