

# РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

*Е.Ю. ТАТАРКИН, доктор техн. наук, профессор*  
*Ю.А. КРЯЖЕВ, канд. техн. наук, доцент*  
*Е.С. ОГНЕВЕНКО, канд. техн. наук*  
*А.Ю. КРЯЖЕВ, аспирант*  
(АлтГТУ, г. Барнаул)

Поступила 11 апреля 2014  
Рецензирование 15 мая 2014  
Принята к печати 17 мая 2014

Огневенко Е.С. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
e-mail: ognevenko\_e@mail.ru

Получены зависимости шероховатости от параметров акустической эмиссии при иглофрезеровании, позволяющие контролировать качество поверхностного слоя, производить замену инструмента и корректировку режимов резания в реальном времени. Получены зависимости твердости обрабатываемой поверхности от диаметра и длины режущих элементов (проволоки) иглофрезерного инструмента, позволяющие контролировать степень наклепа в реальном времени. Разработана принципиальная схема измерительного комплекса для диагностирования шероховатости и твердости поверхностного слоя при металлообработке в режиме реального времени. Применение комплекса позволяет повысить качество обрабатываемой поверхности, изменить процесс иглофрезерования на чистовых операциях механической обработки.

**Ключевые слова:** иглофрезерование, акустическая эмиссия, шероховатость, режимы резания.

## Введение

Процессы механической обработки резанием по точности, качеству обработанных деталей, а также производительности и экономичности являются более конкурентоспособными по сравнению с другими методами формообразования. Известно, что выходные параметры обработки резанием (точность, качество обработанной поверхности и т. д.) в течение всего процесса резания недоступны для прямого измерения. Поэтому алгоритмы управления технологическими системами в настоящее время, как правило, строят на базе экспериментальных зависимостей выходных параметров от режимов обработки [1–4].

Обеспечение требуемого качества изделий неразрывно связано с решением задач формирования заданных параметров микропрофиля

и наклепа обработанной поверхности. Сложность решения данных задач обусловливается многообразием динамически изменяющихся физических факторов, сопровождающих технологический процесс механической обработки материалов резанием и оказывающих влияние на показатели качества поверхностного слоя деталей. В процессе резания пластическая деформация происходит не только в срезаемом слое, но и в поверхностном слое основной массы металла [5, 6].

Глубина распространения деформации от поверхности резания и от обработанной поверхности зависит от ряда факторов и может достигать сотых долей миллиметра, а в отдельных случаях даже миллиметров. Пластическое деформирование вызывает упрочнение металла, его наклеп. Твердость наклепанного слоя в ряде случаев

может значительно превышать твердость недеформированного металла. Чем мягче обрабатываемый металл, тем большему наклепу он подвергается. Наклеп обработанной поверхности детали повышает ее износостойкость. Но с другой стороны, значительное увеличение твердости поверхности может вызвать затруднения при дальнейшей ее обработке. Таким образом, прогнозирование и управление наклёпом обработанной поверхности имеет большое значение для разработки технологического процесса механической обработки деталей машин.

Иглофрезерование является одним из наиболее перспективных видов отделочно-зачистной обработки. Основное преимущество данного метода – низкая себестоимость обработки благодаря незначительным затратам на изготовление и эксплуатацию режущего инструмента [7]. Однако до сих пор не рассматривался вопрос о применении иглофрезерования на этапах чистовой обработки для получения поверхностей высокого качества. При этом основные проблемы заключаются в отсутствии рекомендаций по выбору режимов резания и конструктивно-геометрическим параметрам (длины проволоки, диаметра проволоки) иглофрезерного инструмента [4, 8], а также значительная степень наклепа (до 40 %) обрабатываемой поверхности [9]. Поэтому актуальными задачами являются:

– исследование процесса иглофрезерования с целью определения оптимальных режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента по критерию качества обрабатываемой поверхности;

– разработка измерительного комплекса, позволяющего контролировать параметры качества и степень наклепа обрабатываемой поверхности в режиме реального времени.

Одним из наиболее универсальных и высокоинформативных методов исследования процессов механической обработки, отражающим условия формирования микрорельефа поверхности и распространения деформации от поверхности резания, является метод акустической эмиссии (АЭ). Основным источником АЭ при механической обработке материалов – зона резания, в которой происходит пластическая деформация и разрушение обрабатываемого материала, трение на контактных поверхностях режущего инструмента. Анализ АЭ на операциях механической

обработки обеспечивает возможность непосредственной диагностики вибраций, процессов разрушения, трения и пластического деформирования в зоне структуро- и формообразования, ответственных за технологические и эксплуатационные характеристики детали и инструмента, например, рациональную скорость обработки и качество поверхностного слоя обработанной поверхности [10–15]. Поэтому для решения задачи по определению оптимальных режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента был выбран метод АЭ.

Для проведения исследования твердости наклепанного слоя поверхности использовался прибор ПМТ-3, определяющий микротвёрдость материала по отпечатку, оставленному на выбранном участке после вдавливания в него индентора. Однако контактные методы контроля твердости наклепанного слоя не могут быть использованы для определения микротвердости поверхностного слоя при металлообработке в режиме реального времени, поэтому для целей контроля степени наклепа в реальном времени был выбран метод вихревых токов (МВТ). МВТ базируется на возбуждении в контролируемом объекте или среде под воздействием переменного магнитного поля вихревых токов и одновременной регистрации вторичного поля – поля наведенных вихревых токов [16]. Величина вторичного поля зависит от параметров контролируемого объекта, и если должным образом выстроить математическую модель отклика первичного преобразователя на поле вихревых токов, оказывается возможным определять раздельно более десятка параметров объекта, в том числе твердость поверхностного слоя. Твердость наклепанного слоя обработанной поверхности в реальном времени может быть определена с помощью измерителя переменного магнитного поля металлов, сплавов и композиционных материалов, действие которого основано на МВТ.

### Методика экспериментального исследования

В рамках задачи по определению оптимальных режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента проведены экспериментальные исследования [17]. По результатам экспериментов получена зависимость

параметра шероховатости поверхности  $Ra$  от длины вылета режущих элементов  $l$ , диаметра режущих элементов  $d$  и подачи  $S$ :

$$Ra = 4,867l^{-0,102}d^{-0,09}S^{0,1138}, \text{ мкм}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина режущих элементов (проволоки), мм;  $d$  – диаметр режущих элементов (проволоки), мм;  $S$  – подача, мм/об.

В данной работе для установления зависимостей между параметром шероховатости  $Ra$  и параметрами АЭ проводилась обработка иглофрезерованием поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45. Поверхности одной половины от общего числа заготовок предварительно подвергались черновой обработке, второй – чистовой обработке. В первом случае среднеарифметическое отклонение профиля варьировалось в диапазоне  $Ra = 7 \dots 8$  мкм, во втором  $Ra = 20 \dots 22$  мкм. Таким образом, проводилось два факторных эксперимента с использованием образцов с разными начальными показателями шероховатости  $Ra$  обрабатываемой поверхности.

Эксперимент проводился на вертикальнофрезерном станке марки 6Р13. Одновременно с процессом резания проводилась запись сигнала АЭ. Запись осуществлялась с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-card L-780М с частотой дискретизации до 400 кГц. В качестве преобразователя АЭ использовался пьезоэлектрический датчик на основе цирконаттитаната свинца (ЦТС). По окончании эксперимента проводилось измерение шероховатости обработанной поверхности каждого из образцов на профилографе-профилометре «HOMMEL TESTER W55».

Для проведения исследования твердости наклепанного слоя поверхности использовался прибор ПМТ-3, определяющий микротвердость материала по отпечатку, оставленному на выбранном участке после вдавливания в него индентора. Исходная твердость поверхностного слоя заготовки из стали 45 до обработки иглофрезерованием, измеренная с помощью измерителя переменного магнитного поля, имела значение  $HRC = 20 \dots 21$ .

Для проведения исследований степени наклепа в реальном времени может быть использован измеритель, разработанный на кафедре экспериментальной физики Алтайского государ-

ственного университета [16]. Аппаратная часть измерителя состоит из датчика вихревых трансформаторов (ВТНТ) и звукового устройства ЭВМ, в котором поступающий сигнал от датчика ВТНТ представляется при помощи компьютерных программ в абсолютные значения твердости поверхностного слоя металла. Датчик ВТНТ обеспечивает высокую поверхностную локальность сканирования обработанной поверхности за счёт своего сверхминиатюрного размера.

## Результаты и обсуждение

Анализ сигнала АЭ позволил установить зависимости параметра шероховатости  $Ra$  от средней амплитуды  $A$  и интенсивности  $N$  сигнала АЭ:

- при начальной шероховатости обрабатываемой поверхности  $7 \dots 8$  мкм имеем:

$$Ra = 0,000000149 \cdot N^3 - 0,000141891 \cdot N^2 + 0,033913944 \cdot N + 3,731108351, \text{ мкм}, \quad (2)$$

$$Ra = -0,001204284 \cdot A^3 + 0,099245825 \cdot A^2 - 2,582925032 \cdot A + 26,407514981, \text{ мкм}; \quad (3)$$

- при начальной шероховатости обрабатываемой поверхности  $20 \dots 22$  мкм имеем:

$$Ra = -0,000001546 \cdot N^3 + 0,000803509 \cdot N^2 - 0,111479267 \cdot N + 18,705909129, \text{ мкм}, \quad (4)$$

$$Ra = -0,000685292 \cdot A^4 + 0,071510017 \cdot A^3 - 2,693063122 \cdot A^2 + 43,062665194 \cdot A - 230,412251554, \text{ мкм}, \quad (5)$$

где  $A$  – средняя амплитуда сигнала АЭ (дБ);  $N$  – интенсивность сигнала АЭ ( $c^{-1}$ ).

Полученные зависимости показывают, что при минимальной шероховатости средняя амплитуда  $A$  сигнала АЭ имеет минимальное значение.

Проведение измерений твердости наклепанного слоя поверхности, обработанной торцовой иглофрезой, позволило установить зависимости твердости  $HRC$  от различных конструктивных параметров иглофрезы и технологических параметров процесса иглофрезерования. На рис. 2 представлены зависимости твердости  $HRC$  от диаметра ворса (проволоки) и его длины.

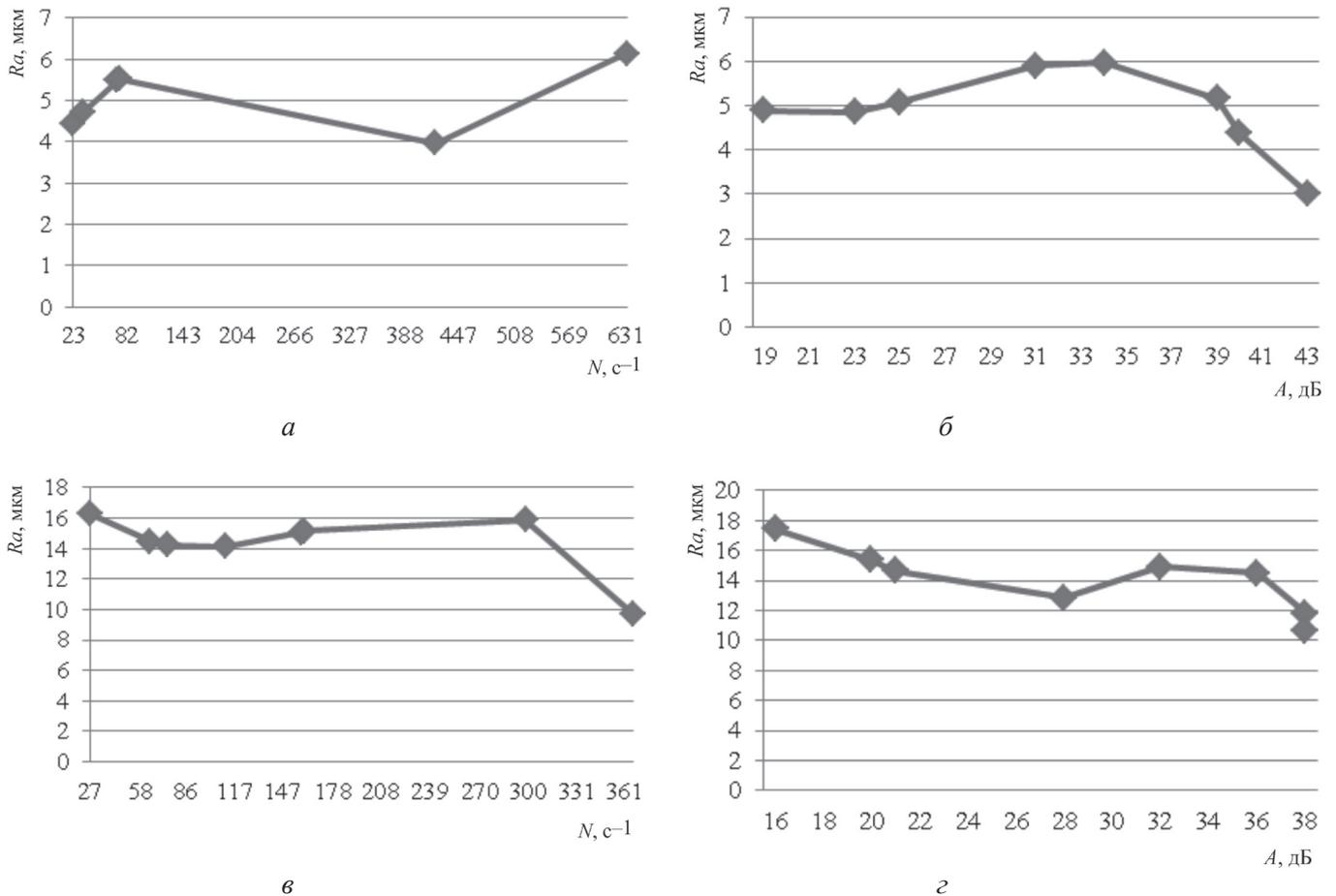


Рис. 1. Зависимости параметра шероховатости  $Ra$  от средней амплитуды  $A$  и интенсивности  $N$  сигнала АЭ:  $a$  – зависимость (2);  $б$  – зависимость 3;  $в$  – зависимость (4);  $г$  – зависимость (5)

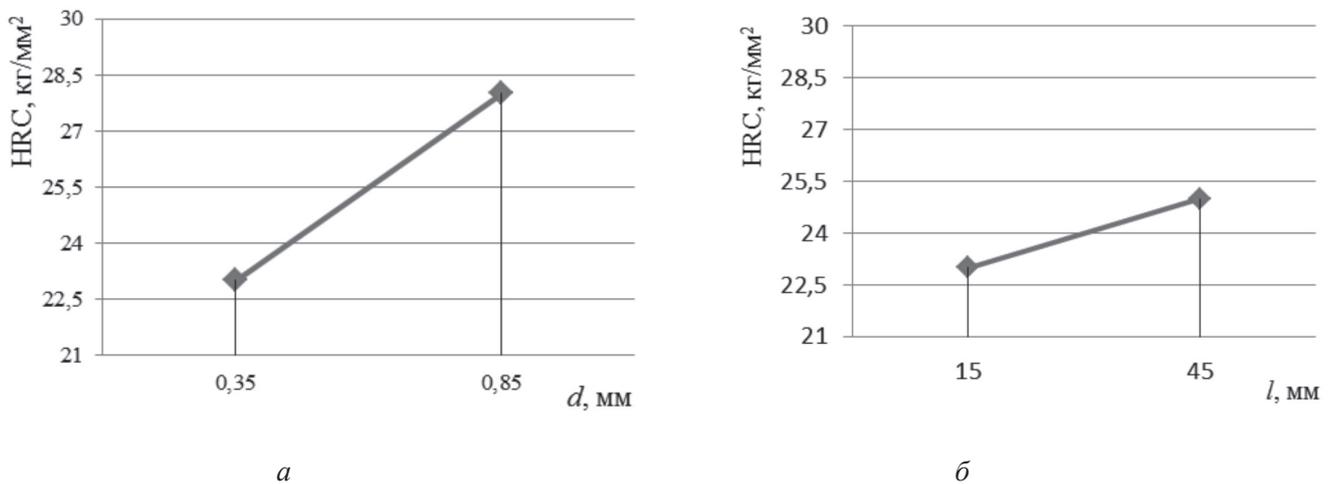


Рис. 2. Зависимости твердости HRC обработанной поверхности:

$a$  – от диаметра  $d$  режущих элементов (проволоки) ( $l = 45$  мм,  $V = 175,83$  м/мин,  $S_m = 100$  мм/мин);  $б$  – длины  $l$  режущих элементов (проволоки) ( $d = 0,85$  мм,  $V = 175,83$  м/мин,  $S_m = 100$  мм/мин)

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что диаметр режущих элементов (проволоки) оказывает большее влияние на твердость наклепанного слоя обработанной иглофрезерованием поверхности, чем их длина. Для достижения минимальной степени наклепа об-

работанной поверхности необходимо выбирать режущие элементы (проволоку) с минимально возможными длиной и диаметром.

Таким образом, использование прибора, работающего на основе метода МВТ, позволяет определить твердость поверхностного слоя

(наклёпа) обрабатываемой поверхности, оптимальные конструктивные параметры режущего инструмента и управлять технологическими параметрами процесса резания для достижения требуемых параметров качества обрабатываемой поверхности.

Результаты проведенных экспериментов были использованы для разработки измерительного комплекса диагностирования шероховатости и твердости обработанной поверхности в процессе металлообработки. Для реализации поставленных задач была разработана принципиальная схема (рис. 3) измерительного комплекса диагностирования шероховатости  $Ra$  обрабатываемой поверхности от средней амплитуды  $A$  и интенсивности  $N$  сигнала АЭ в режиме

реального времени. Полученные зависимости (1)–(5) могут быть использованы в алгоритме и реализованы в модульной программе, которая устанавливается на микроконтроллере. Центральным элементом измерительного комплекса служит микроконтроллер, функцией которого является цифровая обработка информации, поступающей с пьезодатчика и блока управления, осуществляющего, в свою очередь, управление элементами индикации и передающего сигнал на замену режущего инструмента или корректировку режимов резания в системе ЧПУ станка. Микроконтроллер по программе обрабатывает сигнал АЭ и в случае отклонения параметра шероховатости  $Ra$  от заданного чертежом детали выдает сигнал на индикатор.

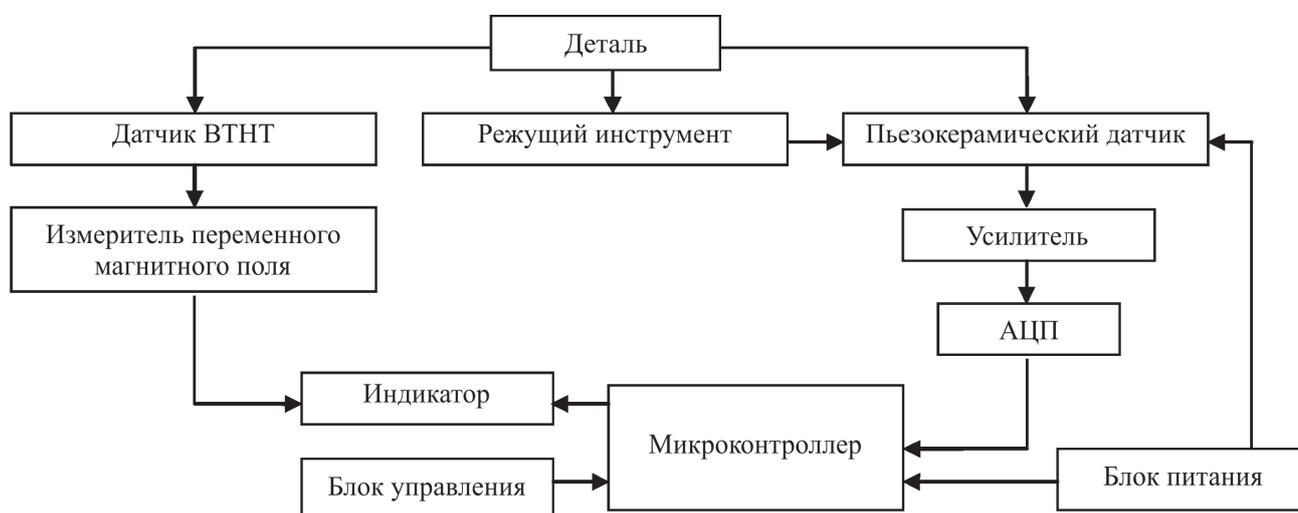


Рис. 3. Принципиальная схема измерительного комплекса

## Выводы

1. Получены зависимости параметра шероховатости  $Ra$  от параметров АЭ при иглофрезеровании, позволяющие контролировать качество поверхностного слоя, производить замену инструмента и корректировку режимов резания в реальном времени.

2. Получены зависимости твердости HRC обрабатываемой поверхности от диаметра и длины режущих элементов (проволоки) иглофрезерного инструмента, позволяющие контролировать степень наклёпа в реальном времени.

3. Разработана принципиальная схема измерительного комплекса для диагностирования шероховатости и твердости поверхностного слоя при металлообработке в режиме реального времени. Применение комплекса позволяет по-

высить качество обрабатываемой поверхности, применять процесс иглофрезерования на чистовых операциях механической обработки.

## Список литературы

1. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Marck's Standard Handbook for Mechanical Engineers : Tenth edition / Eugene A. Avallone, Theodor Baumeister III. – New York : McGraw-Hill, 1996. – 1770 p.
3. Даниленко Б. Д. Некоторые вопросы нормирования режимов резания // Инженерное образование. – №6. – 2004. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://technomag.stack.net/doc/44306.html>.
4. Обработка металлов резанием: справочник технолога / под общ. ред. А. А. Панова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.

5. Вульф А. М. Резание металлов. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
6. Филоненко С. Н. Резание металлов. – Киев: Техника, 1975 – 232 с.
7. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М. Нетрадиционные методы обработки материалов. – М.: МГОУ, 2007. – 211 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. Т. 2 / под общ. ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мешерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
9. Перепичка Е.В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. – М.: Машиностроение, 1989. – 136 с.
10. Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С. Исследование колебательных процессов, возникающих при работе спирального сверла, с применением анализа акустического сигнала // Технология машиностроения. – 2008. – №1. – С. 28–29.
11. *Acoustic Emission and Ultrasonics Handbook* [Text] / Trevor Holroyd, Charles W. Reeves. – Coxmoor Publishing Co., 2000. – 160 p.
12. *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Applications and Civil Engineering* / Jurgen Eisenblatter, Christian U. Groose, Stefan Koppel. – Berlin : Springer, 2008. – 403 p.
13. Барзов А.А. Эмиссионная технологическая диагностика. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
14. Рассказов Н. Н., Диваев А. В. Исследования повреждения режущего инструмента методом акустической эмиссии // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – № 11. – С. 150–153.
15. Подураев В. Н., Барзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
16. Дмитриев С.Ф., Панов С.Г., Ишков А.В. Виртуализированные приборы, использующие метод вихревых токов для контроля параметров различных объектов и окружающей среды // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. – С. 15–19.
17. Татаркин Е.Ю., Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С. Прогнозирование шероховатости при иглофрезеровании методом акустической эмиссии // Вестник Алтайской науки. – 2013. – № 2–1 – С. 30–33.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 39–45

### Development for measuring complex for diagnosis the quality of the treated surface in the metal cutting

**Tatarkin E.Y.**, D.Sc. (Engineering), Professor

**Kryazhev Y.A.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor

**Ognevenko E.S.**, Ph.D. (Engineering), e-mail: ognevenko\_e@mail.ru

**Kryazhev A.Y.**, Post-graduate Student

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

#### Abstract

The dependences of the roughness versus the parameters of acoustic emission during needle milling, that allow to monitor the quality of the surface layer, replacement and adjustment of tool cutting in real time are received. Obtained dependences show that the average roughness at the minimum amplitude of the acoustic signal is minimized. The dependences of the treated surface hardness versus the diameter and length of the cutting elements (wire) of the needle milling tool, that allow to monitor the degree of cold work, are received. Obtained dependences allow us to conclude that the diameter of the cutting elements (wire) has a greater impact on the hardness of the hardened layer than its length. To achieve a minimum degree of cold work of the treated surface it is necessary to choose the cutting elements (wire) with a minimal length and diameter. A principal scheme of measuring complex for diagnosing the roughness and surface hardness during metalworking in real time is developed. Using developed complex allows to improve the surface quality, apply process needle milling in finishing operations.

#### Keywords:

Needle milling, acoustic emission, roughness, cutting conditions.

## References

1. Bazrov B.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniia: Uchebnik dlia vuzov* [Fundamentals of engineering technology: Textbook for Universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 736 p.
2. Avallone E.A., Baumeister T. *Marck's Standard Handbook for Mechanical Engineers*. Tenth edition. New York, McGraw-Hill, 1996. 1770 p.
3. Danilenko B.D. Nekotorye voprosy normirovaniia rezhimov rezaniia [Some questions normalization cutting]. *Inzhenernoe obrazovanie – Engineering Education*, 2004, no. 6. (In Russ.) Available at: <http://technomag.stack.net/doc/44306.html> (accessed 10.04.2014)
4. Panov A.A., Anikin V.V., Boim N.G. et al. *Obrabotka metallov rezaniem: Spravochnik tekhnologa* [Metalcutting. The Handbook of Technologist]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Puble, 2004. 784 p.
5. Vul'f A.M. *Rezanie metallov* [Metalcutting]. 2<sup>nd</sup> ed. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 496 p.
6. Filonenko S.N. *Rezanie metallov* [Metalcutting]. Kiev, Tekhnika Publ., 1975. 232 p.
7. Kovshov A.N., Nazarov Yu.F., Iaroslavtsev V.M. *Netraditsionnye metody obrabotki materialov* [Nontraditional methods of materials processing]. Moscow, MSRU, 2007. 211 p.
8. Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K. et al. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia: V 2-kh t. T. 2.* [The Handbook of Technologist-Machine Engineer. In 2 Volumes, Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p.
9. Perepichka E.V. *Ochistno-uprochniaiushchaia obrabotka izdelii shchetkami* [Cleaning-and-strengthening treatment products brushes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 136 p.
10. Kryazhev Yu. A., Ognevenko Ye.S. Issledovanie kolebatel'nykh protsessov, vznikaiushchikh pri rabote spiral'nogo sverla, s primeneniem analiza akusticheskogo signala [Study of the twist-drill vibrating process applying audible signal analysis]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya – Mechanical Engineering*, 2008, no.1, pp. 28–29.
11. Holroyd T., Reeves Ch.W. *Acoustic Emission and Ultrasonics Handbook*. Coxmoor Publishing Co., 2000. 160 p.
12. Eisenblatter J., Groose Ch.U., Koppel S. *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Applications and Civil Engineering*. Berlin, Springer, 2008. 403 p.
13. Barzov A.A. *Emissionnaia tekhnologicheskaiia diagnostika. Biblioteka tekhnologa* [Emission process diagnostics. Library technologist]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 384 p.
14. Rasskazov N.N., Divaev A.V. Issledovaniia povrezhdeniia rezhushchego instrumenta metodom akusticheskoi emissii [Studies damage the cutting tool acoustic emission method]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1987, no. 11, pp. 150–153.
15. Poduraev V. N., Barzov A. A., Gorelov V. A. *Tekhnologicheskaiia diagnostika rezaniia metodom akusticheskoi emissii* [Process diagnostics cutting acoustic emission method]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 56 p.
16. Dmitriev S.F., Panov S.G., Ishkov A.V. Virtualizirovannye pribory, ispol'zuiushchie metod vikhrevykh tokov, dlia kontrolya parametrov razlichnykh ob'ektov i okruzhaiushchei sredy [Virtualized devices using the eddy current method, to control the parameters of different objects and the environment]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2008, no. 2, pp. 15–19.
17. Tatarkin E.Yu., Kriazhev Yu.A., Ognevenko E.S., Kriazhev A.Yu. Prognozirovaniie sherokhovatosti pri iglofrezerovanii metodom akusticheskoi emissii [Prediction of surface roughness in wire brushing by acoustic emission method]. *Vestnik Altaiskoy nauki – Bulletin of the Altai Science*, 2013, no. 2–1, pp. 30–33.

Received 11 April 2014

Revised 15 May 2014

Accepted 17 May 2014