

УДК 621.9

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТА

© 2014 Н.Ю. Ковеленов<sup>1</sup>, С.В. Михайлов<sup>2</sup>, С.В. Болотских<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Костромской государственной технологической университет

Поступила в редакцию 20.03.2014

Разработана ускоренная методика сравнительных испытаний режущих свойств инструмента и определения рациональных условий механической обработки. Выбор оптимальных параметров осуществляется на основе измерения и анализа динамики изменения тангенциальной составляющей силы резания в период приработочного износа. В качестве оптимального принимается состояние, соответствующее наименьшей интенсивности изменения силы в начальный период резания.

Ключевые слова: *режущие свойства, скорость резания, приработочный износ, сила резания*

Эффективность современного машиностроительного производства в значительной степени определяется качеством металлорежущего инструмента. В условиях скоростного резания материалов рабочие поверхности инструментов подвергаются интенсивному воздействию высоких контактных давлений и температур, вызывающих протекание сложных физико-химических процессов адгезии, диффузии, окисления. Для того чтобы сопротивляться этим процессам и нагрузкам, инструментальные материалы должны обладать целым комплексом многочисленных свойств, в том числе высокой твердостью, прочностью, ударной вязкостью, теплостойкостью, теплопроводностью, низкой физико-химической активностью по отношению к обрабатываемым материалам. Важнейшим требованием к режущим материалам является износостойкость, т.е. сопротивляемость удалению частиц с их рабочих поверхностей при взаимодействии с обрабатываемыми материалами. Этот показатель является комплексным, но, несмотря на его зависимость от вышеперечисленных свойств, предсказать интенсивность изнашивания инструмента для разных условий резания пока не удастся. В настоящее время количественная оценка режущих свойств инструментов осуществляется на основе проведения трудоемких производственных испытаний.

Особенно актуальной является проблема выбора марки инструментального материала при изготовлении деталей из сплавов, обладающих повышенными прочностными, пластическими, жаропрочными и антикоррозионными свойствами. Отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по выбору инструментального материала и режимов резания сдерживает освоение и оптимизацию технологических процессов механической обработки новых труднообрабатываемых материалов. Очевидно, что для устранения этих проблем необходимы ускоренные методы определения режущих свойств инструментов.

В процессе эксплуатации режущий инструмент может подвергаться постепенному или плавному износу, хрупкому разрушению, пластической деформации. В зависимости от размеров и формы отделяемых или деформируемых частей инструмента различают микро- и макровыкрашивание режущей кромки, скалывание тонких слоев или отделение слоев значительной толщины, локальное выдавливание материала. Под разрушением лезвия пластины понимается скалывание слоев толщиной, меньшей длины зоны контакта. Это разрушение определяется свойствами режущей части инструмента. Под разрушением или поломкой режущей пластины понимается отделение материала толщиной, существенно превышающей длину контакта инструмента с деталью и стружкой [1]. В этом случае прочность инструмента зависит от свойств не только пластин, но и опорной зоны их соединения с державкой. Разрушение пластины в основном зависит от подачи инструмента. Плавный износ, выкрашивание и термические трещины - от скорости резания.

Ковеленов Николай Юрьевич, кандидат технических наук, главный технолог. E-mail: [kov@virial.ru](mailto:kov@virial.ru)

Михайлов Станислав Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: [michsv@yandex.ru](mailto:michsv@yandex.ru)

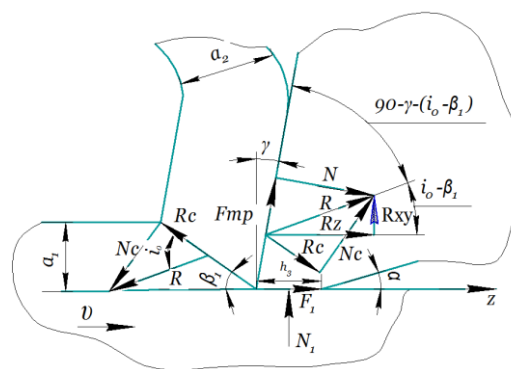
Болотских Сергей Викторович, начальник бюро внедрения и технического сопровождения. E-mail: [BolotskihSV@virial.ru](mailto:BolotskihSV@virial.ru)

Существующие методы контроля состояния режущего инструмента можно разделить на прямые и косвенные [2]. Объектами контроля служат режущий инструмент, обрабатываемая деталь, стружка, параметры процесса резания. Контролируемыми параметрами являются размеры изношенных поверхностей инструмента, вибрации, температура, шероховатость обработанной поверхности, параметры стружки, акустическая эмиссия, силы и мощность резания, ЭДС в зоне резания. Прямые методы состоят в непосредственном измерении параметров инструмента. Контролируются размеры лунки износа, образующейся на передней поверхности, ширина ленточки износа по задней поверхности, уменьшение объёма или массы инструмента, износ режущей кромки, разброс размеров деталей в партии и др. Указанные параметры могут быть определены оптико-телевизионным, лазерным, электромеханическим, ультразвуковым или пневматическим методами [3]. При выполнении прямых измерений необходим выход инструмента или режущих кромок из процесса обработки. Такие измерения обладают повышенной надёжностью, 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 технологических операциях и на основании вероятностных расчетов с учетом предполагаемого периода стойкости режущего инструмента.

При косвенных методах контролируются различные характеристики процесса резания, которые имеют определенные корреляционные связи с величиной износа и интенсивностью изнашивания режущих кромок инструмента. Косвенные методы диагностики режущих инструментов основаны на контроле изменения сил резания, мощности, температуры и других физических характеристик процесса резания в результате износа или поломки 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 за короткий интервал времени. В большинстве случаев устройства для контроля сил резания сориентированы на выявление катастрофического износа. 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 износ инструмента в процессе обработки. Применение этих методов в условиях производства затруднено вследствие экранирующего влияния стружки, сложности установки датчиков контроля косвенных факторов, погрешностей от влияния электромагнитных полей и источников виброакустических сигналов.

Из числа известных методов оценки работоспособности инструмента наиболее предпочтительными являются силоизмерительные и виброакустические косвенные методы контроля с использованием высокоточных магнитострикционных, пьезоэлектрических или тензометрических датчиков. Методы основаны на тесной связи износа инструмента с выходными характеристиками процесса резания и могут быть использованы не только для определения величины размерного износа, но и для поиска условий, при которых интенсивность износа минимальна. Новейшие тенденции в развитии устройств контроля связаны с появлением так называемых «интеллектуальных» датчиков, регистрирующих несколько характеристик процесса резания и передающих первичные сигналы без проводов.



**Рис. 1.** Схема действия сил на переднюю поверхность инструмента

С целью оценки эффективности силового метода диагностики режущих свойств инструмента определим степень влияния износа лезвия инструмента на величину составляющих сил резания. Пусть на переднюю поверхность инструмента при резании действуют сила трения  $F_{TR}$  и нормальная сила  $N$ . Эти силы определяют силу стружкообразования  $R$  (рис. 1). Силы  $R_Z$  и  $R_{XY}$  являются соответственно горизонтальной (тангенциальной) и вертикальной составляющими силы  $R$ . Так как сила сдвига  $R_C$  является проекцией равнодействующей силы  $R$  на условную плоскость сдвига  $A_B$ , то угол между силами  $R_Z$  и  $R_C$  равен углу наклона условной плоскости сдвига  $\beta_1$ . Сила стружкообразования  $R$  при резании

вызывает значительное сжатие и упруго-пластическое деформирование металла снимаемого припуска с последующим пластическим сдвигом образующихся элементов стружки. Известно, что сила сжатия вызывает разрушение срезаемого слоя по плоскости максимальных напряжений, расположенной под некоторым углом  $i_0$  к линии ее действия. Данный угол  $i_0$  определяется свойствами обрабатываемого материала и близок к  $45^\circ$ .

Принимаем, что сила стружкообразования  $R$  составляет с условной плоскостью сдвига (с силой  $R_C$ ) угол, равный  $i_0$ . Тогда угол между силами  $R$  и  $R_Z$  равен  $(i_0 - \beta_1)$ , а между  $R$  и  $F_{TP}$  ( $90 - \gamma - i_0 + \beta_1$ ). Сила сдвига  $R_C$  определяется по формуле:

$$R_C = \tau_p \cdot \frac{a_1 \cdot b_1}{\sin \beta_1}, \quad (1)$$

где  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа;  $a_1$  – толщина срезаемого слоя, мм;  $b_1$  – ширина срезаемого слоя, мм;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига, град.

Сила стружкообразования равна:

$$R = \frac{R_C}{\cos i_0}. \quad (2)$$

Подставив в уравнение (2) формулу (1) получим:

$$R = \frac{\tau_p \cdot a_1 \cdot b_1}{\sin \beta_1 \cdot \cos i_0}. \quad (3)$$

Нормальная сила  $N$ , действующая на переднюю поверхность инструмента определяется по формуле:

$$N = R \cdot \sin(90 - \gamma - i_0 + \beta_1). \quad (4)$$

Сила трения на передней поверхности инструмента равна:

$$F_{TP} = R \cdot \cos(90 - \gamma - i_0 + \beta_1). \quad (5)$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие силы стружкообразования на передней поверхности рассчитываются по формулам:

$$R_Z = R \cdot \cos(i_0 - \beta_1), \quad (6)$$

$$R_{XY} = R \cdot \sin(i_0 - \beta_1). \quad (7)$$

Чтобы перейти к составляющим силы резания  $P_Z$ ,  $P_Y$  и  $P_X$  необходимо учесть силы,

действующие на заднюю поверхность инструмента. На заднюю грань инструмента действуют касательные напряжения  $\tau$ . Если закон изменения касательных напряжений принять линейным, то среднее касательное напряжение  $\tau_{CP} = 0,5 \tau_p$ . Тогда сила трения  $F_1$ , действующая на заднюю поверхность инструмента может быть вычислена по формуле:

$$F_1 = 0,5 \cdot \tau_p \cdot L_{PK} \cdot h_3, \quad (8)$$

где  $h_3$  – длина контакта инструмента с заготовкой по задней поверхности;  $L_{PK}$  – суммарная длина активной режущей кромки.

Нормальная сила  $N_1$  на задней поверхности инструмента может быть определена как:

$$N_1 = \frac{F_1}{\mu_1}, \quad (9)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент трения на задней контактной площадке.

Коэффициент трения на задней площадке можно принять равным коэффициенту трения стружки по передней поверхности  $\mu_1 = \mu$ , который вычисляется по формуле:

$$\mu = \frac{F_{TP}}{N}. \quad (10)$$

С учетом сил на задней поверхности составляющие силы резания будут равны:

$$P_Z = R_Z + F_1, \quad (11)$$

$$P_{XY} = R_{XY} + N_1. \quad (12)$$

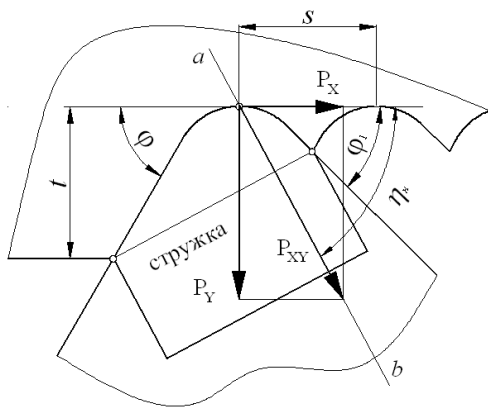
Составляющая  $P_{XY}$  действует в направлении схода стружки. Чтобы разложить ее на осевую  $P_X$  и радиальную  $P_Y$  необходимо знать угол схода стружки  $\eta_n$  (рис. 2):

$$P_Y = P_{XY} \cdot \sin \eta_n, \quad (13)$$

$$P_X = P_{XY} \cdot \cos \eta_n. \quad (14)$$

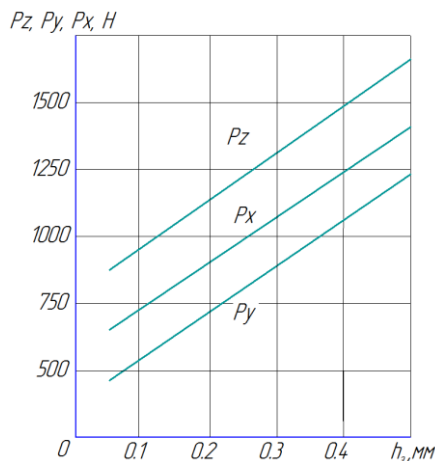
Выражение для расчета угла  $\eta_n$  с учетом влияния всех основных технологических факторов дано в работе [4].

Воспользуемся полученными зависимостями (11, 13, 14) для определения степени влияния износа режущего клина на составляющие силы резания при точении стали 45. В качестве исходных параметров модели примем: сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу  $\tau_p = 485$  МПа; толщина срезаемого слоя  $a_1 = 0,2$  мм; ширина срезаемого слоя  $b_1 = 0,2$  мм; главный угол в плане  $\varphi = 75^\circ$ ; длина активного участка режущей кромки  $L_{PK} = 3,3$  мм; угол наклона условной плоскости сдвига  $30^\circ$ .



**Рис. 2.** Схема разложения составляющей  $P_{xy}$  на  $P_y$  и  $P_x$

Расчетные зависимости составляющих силы резания от величины фаски износа на задней поверхности инструмента показаны на рис. 3. Видно, что в результате изнашивания инструмента по задней поверхности составляющие силы резания монотонно увеличиваются. С возрастанием износа от 0,05 до 0,1 мм тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  увеличилась с 875,052 Н до 955,077 Н, т.е. на 8,4%. Уровень изменения сил резания подтверждает возможность регистрации этого изменения в процессе резания с использованием современных средств измерения. Информационность динамики увеличения составляющих силы резания позволяет применить этот показатель в качестве источника диагностического сигнала, определяющего износостойкость инструмента на стадии его приработки.



**Рис. 3.** Зависимость составляющих силы резания от величины фаски износа на задней поверхности инструмента

Для практической реализации возможности ускоренного определения работоспособности инструмента по динамике изменения сил резания динамометр должен обладать следующими характеристиками: 1) высокой точностью определения силы резания с пределом допускаемой относительной погрешностью измерений

от  $\pm 1\%$  до  $\pm 5\%$ ; 3) возможностью исследования как стационарных, так и нестационарных процессов; 4) возможностью подключения динамометра к персональному компьютеру (ПК) и визуализации регистрируемых данных с последующим их сохранением в файл; 5) устойчивостью показаний прибора к промышленным помехам; 6) возможностью установки динамометра на современные станки с различной системой крепления резцедержателя; 7) компактностью и герметичностью корпуса динамометра, допускающего обработку с применением СОТС; 8) высокой жесткостью упруго-демпферной системы динамометра и её способностью к подавлению вибраций инструмента.

В настоящее время измерение сил осуществляют, используя тензометрические и пьезоэлектрические динамометры. Несмотря на многообразие конструкций и принципов действия первичных преобразователей, лишь немногие из них удовлетворяют требованиям, предъявляемым к станочным динамометрическим системам. В первую очередь это связано с нестационарными тепловыми процессами в системе СПИЗ, а также необходимостью исследования как средних, так и мгновенных значений составляющих силы резания в широком диапазоне.

С учетом вышеперечисленных характеристик весьма перспективным является использование для контроля сил резания пьезоэлектрических резонансных датчиков [5]. Принцип их действия основан на изменении частоты собственных колебаний тонкой пластинки из пьезоэлектрика при ее нагружении. Будучи наклеенной на металлический упругий элемент пластинка обладает всеми положительными свойствами классических тензорезисторов, но исключает необходимость температурной коррекции показаний динамометра. Резонансный режим работы пьезоэлектрического датчика имеет ещё одно неоспоримое преимущество: в отличие от зарядочувствительных кварцевых преобразователей, рассчитанных лишь на динамические нагрузки, резонансный датчик способен измерять как статические, так и динамические деформации (и соответственно силы резания). Анализ промышленных конструкций пьезокерамических динамометров показал, что отечественные разработки в этом направлении практически отсутствуют, а зарубежные аналоги отличаются высокой стоимостью, сопоставимой со стоимостью малобюджетного металлорежущего станка. Наиболее близким для решения поставленной задачи является новый однокомпонентный динамометр Дуна-З, разработанный учеными РГАТУ. В качестве силочувствительных элементов в этом динамометре применены кварцевые резонансные датчики ЭПКВ-10М [6]. Гистерезис и нелинейные характеристики преобразования используемых силоизмерительных пьезокварцевых



пластинок не превышают значения 0,02% от предела измерения, временной дрейф нуля при номинальной нагрузке соответственно не превышает 0,01%/час, температурный уход показаний не более 0,2% на 10°C. Силоизмерительные пластинки расположены внутри герметичного корпуса и работают при минимальном температурном градиенте. Относительная погрешность измерений силы  $P_z$  динамометром *Dyna-Z* при статических испытаниях не превышает 2-3%. Динамометр *Dyna-Z* функционирует без дополнительного источника питания, тензометрической станции или платы сбора данных. Динамометр подключается к обычному персональному компьютеру или ноутбуку и запускается с программным обеспечением (рис. 4). Информация о величине нагрузки преобразуется встроенной электроникой в импульсную последовательность, которая поступает на вход звуковой карты компьютера и с помощью программной процедуры преобразуется в текущее значение силы  $P_z$ . Полученные данные отображаются в диалоговом окне в виде графика  $P_z=f(t)$ , а также могут быть сохранены в форматах \*.csv и \*.txt для дальнейшей обработки средствами стороннего ПО.

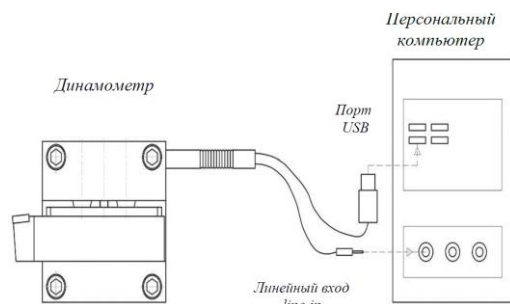


Рис. 4. Схема подключения динамометра *Dyna-Z*

Экспериментальная проверка эффективности определения износа инструмента по силам резания с использованием однокомпонентного динамометра *Dyna-Z* осуществлялась по следующей методике.

1. Исследовалось влияние времени обработки на величину износа инструмента по задней грани в разных условиях резания.

2. Для режущих пластин с разной степенью изнашивания строились кривые износа (зависимости нарастания износа за время работы инструмента).

3. Для выбранных условий резания проводились силовые испытания с компьютерной регистрацией динамики изменения тангенциальной составляющей силы резания в период приработочного износа.

4. Строились зависимости сил резания от времени обработки. Определялась интенсивность изменения сил резания экспериментальных режущих пластин.

5. Сопоставлялись экспериментальные зависимости интенсивности изнашивания с интенсивностью изменения сил резания.

6. Проводилась количественная и качественная оценка тесноты связи износостойкости инструмента с динамикой изменения тангенциальной составляющей силы резания.

Испытания проводились на станке с ЧПУ Mazak мод. QTN250II. Обрабатываемый материал – 40X13, скорости резания  $v = 120$  м/мин, 220 м/мин, глубина резания 1,5 мм, подача 0,2 мм/об, диаметр заготовки 50 мм, режущие пластины SNMG 120408 H13A, SNMG 120408 T130. Полученные по данной методике зависимости показаны на рис. 5, 6, 7.

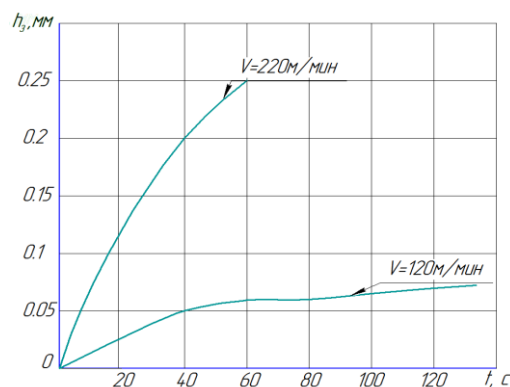


Рис. 5. Кривые износа режущих пластин SNMG 120408 H13A (Sandvik):

материал заготовки 40X13, скорости резания  $v=120$  м/мин, 220 м/мин, глубина резания 1,5 мм, подача 0,2 мм/об, диаметр заготовки 50 мм

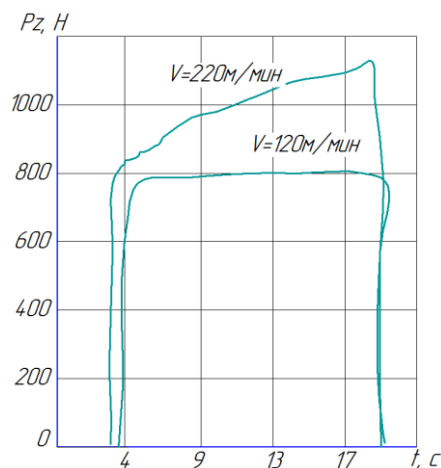
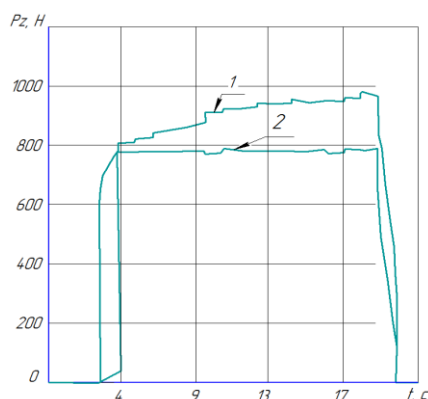


Рис. 6. Зависимость тангенциальной

составляющей силы резания  $P_z$  от времени  $t$ : заготовка 40X13, режущая пластина SNMG 120408 H13A (Sandvik), скорости резания  $v=120$  м/мин, 220 м/мин, глубина резания 1,5 мм, подача 0,2 мм/об, диаметр заготовки 50 мм

Сопоставление зависимостей интенсивности изнашивания с интенсивностью изменения сил резания подтверждает наличие тесной связи

указанных параметров и возможность экспериментального определения режущих свойств инструмента по тангенциальной составляющей силы резания. На основе этой связи предложена и реализована инженерная методика поиска оптимальных условий механической обработки, соответствующих максимальной износостойкости режущего инструмента. Выбор параметров осуществляется на основе измерения и сравнительного анализа динамики изменения тангенциальной составляющей силы резания в период приработочного износа в различных условиях безнарасткового резания. В качестве оптимального принимается состояние, при котором интенсивность изменения силы резания и износа в начальный период времени минимальные (рис. 7).



**Рис. 7.** Зависимости тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  от времени резания  $t$ , полученные при резании различными пластинами: заготовка 40X13, скорость резания 200 м/мин, глубина резания 1,5 мм, подача 0,2 мм/об, диаметр заготовки 50 мм, 1 – режущая пластина SNMG 120408 H13A, 2 – режущая пластина SNMG 120408 T130

**Выводы:** с помощью предложенной методики могут быть решены задачи выбора рационального материала режущей пластины, оценки эффективности износостойких покрытий и СОЖ; проведен сравнительный анализ эффективности инструментов различных производителей; ускоренного определения оптимальной скорости резания и геометрических параметров режущего инструмента. Предложенный способ и устройство ускоренного определения режущих свойств инструментов позволяют сократить сроки и трудоемкость технологической подготовки и совершенствования производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Хаев, Г.Л. Прочность режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. 186 с.
2. Латыпов, Р.Р. Методы диагностики состояния режущего инструмента в станочных системах: учебное пособие / Р.Р. Латыпов, В.В. Постнов, С.Х. Хадидуллин. – Уфа: УГАТУ, 2009. 96 с.
3. Педь, Е.И. Активный контроль в машиностроении / под ред. Е.И. Педь. – М.: Машиностроение, 1978. 352 с.
4. Михайлов, С.В. Компьютерное прогнозирование и системный анализ причинно-следственных связей процессов образования, завивания и дробления сливной стружки. – Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. 159 с.
5. Прецизионные кварцевые датчики производства российской компании "СКТБ ЭлПА" // [http://kit-e.ru/articles/sensor/2005\\_6\\_54.php](http://kit-e.ru/articles/sensor/2005_6_54.php)
6. Пьезоэлемент силочувствительный ЭПКВ-10М // <http://qsens.ru/products/epkv/54-epkv-10m.html>

## DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL METHOD OF ACCELERATED DEFINITION THE TOOL CUTTING PROPERTIES

© 2014 N.Yu. Kovelenov<sup>1</sup>, S.V. Mikhaylov<sup>2</sup>, S.V. Bolotskikh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JSC VIRIAL, St. Petersburg

<sup>2</sup> Kostroma State Technological University

The accelerated method of comparative tests of tool cutting properties and definition of rational conditions of machining is developed. The choice of optimum parameters is carried out on the basis of measurement and analysis the dynamics of force cutting tangential component change during running-in wear period. As the optimum the state corresponding to the smallest intensity of force change in an initial stage of cutting is accepted.

Key words: cutting properties, cutting speed, running-in wear, cutting force

Nikolay Kovelenov, Candidate of Technical Sciences, Chief Technologist. E-mail: kov@virial.ru; Stanislav Mikhaylov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Technology of Mechanical Engineering. E-mail: michsv@yandex.ru; Sergey Bolotskikh, Chief of the Bureau of Implementation and Technical Maintenance. E-mail: BolotskikhSV@virial.ru