

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

*В. А. Залого, д-р техн. наук;*

*В. В. Нагорный,*

*Сумский государственный университет, г. Сумы*

*Рассмотрена оценка степени износа режущего инструмента (фрезы), выполненная традиционным для вибродиагностики методом - методом контроля уровня звука, излучаемого в данном случае процессом обработки металла. Для решения данной задачи были получены выражения для безразмерного параметра (индикатора). Индикатор позволяет косвенно оценить степень износа инструмента. Его величина изменяется от нуля (при исходном состоянии инструмента) до единицы (при замене инструмента).*

*Ключевые слова: износ режущего инструмента, вибродиагностика, звук, энергия резания, индикатор, длительность резания.*

Машиностроительная отрасль развивается в направлении создания ресурсосберегающих полнофункциональных систем машин с высокой степенью автоматизации при использовании микропроцессорных систем управления.

Эффективная работа таких машин при резком сокращении количества обслуживающих их высококвалифицированных специалистов невозможна без создания эффективных автоматизированных средств управления ими. Последнее можно осуществить только с помощью развитых информационных технологий контроля, составной частью которых является диагностика.

Для выполнения диагностики необходима информация о текущем состоянии заготовки (обрабатываемой детали), инструмента и металлорежущего станка [1]. Причём для инструмента в качестве диагностируемого параметра рассматривается степень его износа. Недоступность зоны резания для прямого наблюдения вынуждает получать информацию о процессах обработки материалов по косвенным параметрам. Подобным косвенным параметром может являться, например, звук, генерируемый в процессе резания [2-5]. Для контроля звука и анализа характера его изменения по мере износа инструмента можно позаимствовать методы, традиционно используемые в вибродиагностике технического состояния разнообразных машин и механизмов [6-13].

В данной работе приведен пример подобного заимствования при оценке степени износа многолезвийного режущего инструмента – фрезы.

### **1 Установление зависимости степени износа инструмента от уровня звука, генерируемого в процессе механической обработки резанием**

Техническая диагностика и вибродиагностика в частности основывается на корреляции между структурными параметрами и их диагностическими признаками. Структурный параметр характеризует состояние объекта диагностирования. В качестве структурного параметра для режущего инструмента можно рассматривать площадь пятна контакта задней поверхности лезвия инструмента с поверхностью резания на заготовке  $S_{КОН}$  (рис.16).

А в качестве диагностического признака, реагирующего на изменение площади контактного пятна, можно использовать традиционный для вибродиагностики параметр – уровень звука в Паскалях (МПа)  $A_{ЗВ}$ ,

генерируемого в процессе механобработки и регистрируемого с помощью микрофона [10, 11].

Для осуществления процедуры диагностирования необходимо получить выражение для безразмерного параметра (индикатора состояния инструмента), отслеживая величину которого можно косвенным образом оценивать степень критичности состояния инструмента (степень затупления) и определять момент его замены. Для того чтобы получить выражение для индикатора, воспользуемся балансом мощностей, имеющим место при резании.

На генерацию звука тратится мощность  $W_{ЗВ}$ , составляющая определённую часть мощности станка  $W_{СТ}$ , при этом, естественно, основная часть его мощности расходуется на процесс обработки материала  $W_{ОБР}$ . Строго говоря, на собственно процесс обработки, например, на процесс фрезерования на фрезерном станке, тратится только часть мощности  $W_{ОБР}$ , которую можно назвать полезной частью мощности ( $W_{РЕЗ}$ ) и которая определяется, как и у любой другой машины, величиной коэффициента её полезного действия .

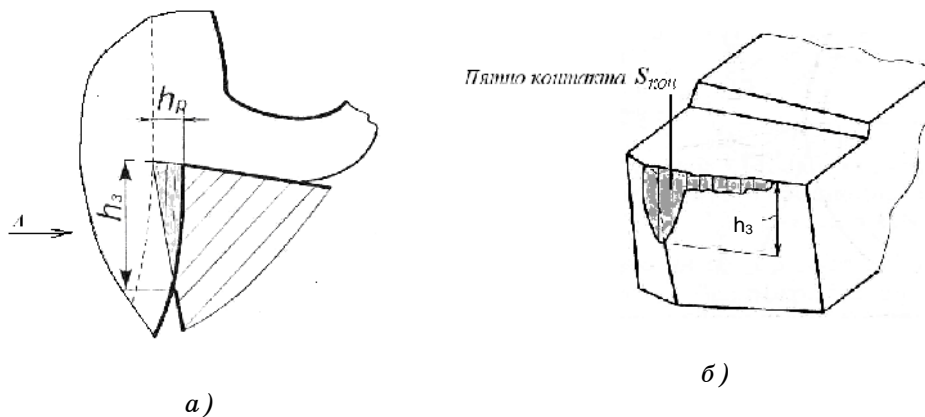


Рисунок 1 – Схема взаимодействия обрабатываемой заготовки с лезвием инструмента и его износ : а) схема износа резца в радиальном направлении и по задней поверхности; б) пятно контакта (износа) инструмента [14]

В данном случае для станка

$$W_{РЕЗ} = \eta \cdot W_{ОБР}, \text{ кВт.} \quad (1)$$

При этом наблюдается следующий баланс мощностей:

$$W_{СТ} = W_{ОБР} + W_{ЗВ}, \text{ кВт.} \quad (2)$$

Выражение (2) с учётом (1) можно переписать следующим образом

$$W_{СТ} = \frac{W_{РЕЗ}}{\eta} + W_{ЗВ}, \text{ кВт.} \quad (3)$$

Мощность, расходуемую на резание, можно определить из следующего выражения

$$W_{РЕЗ} = P_Z V, \text{ кВт,} \quad (4)$$

где  $P_Z$  и  $V$ , м/с - соответственно касательная составляющая силы резания и скорость резания.

Для гармонического акустического излучения средняя удельная мощность звука равна [5]:

$$W_{ЗВ} = 0,5 \cdot P_{ЗВ} \cdot V_{ЗВ}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $P_{ЗВ}$  и  $V_{ЗВ}$  - амплитуды давления и колебательной скорости звуковой волны, создаваемой колеблющейся (излучающей) поверхностью инструмента.

Так как скорость звука в воздухе - величина постоянная ( $V_{ЗВ} = 331$  м/с), то мощность, расходуемая на генерацию звука, как следует из (5), изменяется прямо пропорционально изменению амплитуды звукового давления  $P_{ЗВ}$ . То же самое при условии постоянства скорости резания согласно (4), можно сказать и о мощности, затрачиваемой на обработку заготовки. Интенсивность (амплитуда) звуковой волны  $A_{ЗВ}$  так же прямо пропорциональна амплитуде звукового давления [5], т. е.

$$A_{ЗВ} \sim P_{ЗВ}. \quad (6)$$

Сила резания зависит от величины разрушающего напряжения  $P_{РАЗ}$  ( $P_{РАЗ} = \sigma$ ) и от площади пятна контакта лезвия с заготовкой  $S_{КОН}$  (рис. 1 б).

$$P_{РЕЗ} = \sigma_{РАЗ} \cdot S_{КОН}. \quad (7)$$

С учетом выражений (4), (5) и (7) соотношение (3) преобразуется к следующему виду:

$$W_{СТ} = \frac{\sigma_{РАЗ} \cdot S_{КОН} \cdot V}{\eta} + 0,5 \cdot P_{ЗВ} \cdot V_{ЗВ}. \quad (8)$$

Разрешим выражение (8) относительно звукового давления

$$P_{ЗВ} = \frac{2}{V_{ЗВ}} \cdot W_{СТ} - \frac{2 \cdot \sigma_{РАЗ} \cdot S_{КОН} \cdot V}{\eta \cdot V_{ЗВ}}. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что величина звукового давления, а согласно (6) и величина звукового сигнала  $A_{ЗВ}$  для заданных условий обработки линейно зависят от площади контактного пятна  $S_{КОН}$ . Причём по мере роста площади пятна контакта уровень звукового давления падает, т. к. уменьшаемое (первый член разности) в (9) - постоянная величина

$\left( \frac{2}{V_{ЗВ}} \cdot W_{СТ} = const \right)$ . Задачей является получение индикатора состояния инструмента в безразмерном виде, изменяющемся от нуля до единицы, поэтому размерные параметры  $W_{СТ}, V_{ЗВ}, \sigma_{РАЗ}, V, \eta$  следует исключить. С этой целью вначале определим разности между исходным значением звукового давления  $P_{ЗВ}^{ИСХ}$ , измеренным в начале процесса обработки, и его величинами, зарегистрированными в определенные два момента контроля состояния инструмента: 1) в любой текущий момент времени  $P_{ЗВ}^{ТЕК}$ ; 2) в момент, предшествующий снятию изношенного инструмента  $P_{ЗВ}^{ИЗН}$  (к моменту исчерпания его стойкости). Аналогичную процедуру выполним и для пятна контакта, определив  $S_{КОН}^{ИСХ}$ ,  $S_{КОН}^{ТЕК}$  и  $S_{КОН}^{ИЗН}$ . На следующем этапе определим отношение этих разностей.

Тогда разности давлений:

$$P_{3B}^{ИСХ} - P_{3B}^{ИЗН} = \left( S_{КОН}^{ИЗН} - S_{КОН}^{ИСХ} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{РАЗ} \cdot V}{\eta \cdot V_{3B}}, \quad (10)$$

$$P_{3B}^{ИСХ} - P_{3B}^{ТЕК} = \left( S_{КОН}^{ТЕК} - S_{КОН}^{ИСХ} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{РАЗ} \cdot V}{\eta \cdot V_{3B}}. \quad (11)$$

Отношение разностей

$$\frac{P_{3B}^{ИСХ} - P_{3B}^{ТЕК}}{P_{3B}^{ИСХ} - P_{3B}^{ИЗН}} = \frac{S_{КОН}^{ТЕК} - S_{КОН}^{ИСХ}}{S_{КОН}^{ИЗН} - S_{КОН}^{ИСХ}}. \quad (12)$$

С учётом (6) выражение (12) запишется в следующем виде

$$\frac{A_{3B}^{ИСХ} - A_{3B}^{ТЕК}}{A_{3B}^{ИСХ} - A_{3B}^{ИЗН}} = \frac{S_{КОН}^{ТЕК} - S_{КОН}^{ИСХ}}{S_{КОН}^{ИЗН} - S_{КОН}^{ИСХ}}. \quad (13)$$

Выражение, стоящее в правой части равенства (13), изменяется от нуля до единицы и характеризует степень затупления инструмента в процессе его эксплуатации. Соответственно выражение, расположенное в левой части, является диагностическим признаком процесса деградации режущих свойств инструмента. Поменяв эти части равенства местами и обозначив правую часть через  $S_{отн}$ , получим формулу, связывающую структурный параметр инструмента  $S_{отн}$  с его диагностическим признаком:

$$\Delta S_{ОТН} = \frac{A_{3B}^{ИСХ} - A_{3B}^{ТЕК}}{A_{3B}^{ИСХ} - A_{3B}^{ИЗН}}. \quad (14)$$

Для аппроксимации характера изменения уровня звука по мере износа инструмента использовалась функция (15), т.к. её график описывает общеизвестную кривую износа режущего инструмента [14].

$$A_{3B} = A_{3B}^{ИСХ} + \alpha \cdot A_{3B}^{ИСХ} \cdot \left( \frac{t - t_{ИСХ}}{T_{СМЕН} - t} \right)^\beta, \quad (15)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  - соответственно коэффициент и показатель степени, определяемые в процессе аппроксимации результатов контроля уровня звука, генерируемого процессом резания;  $T_{СМЕН}$ , мин - длительность процесса резания до замены изношенного инструмента;  $t_{ИСХ}$ ,  $t$ , мин - наработка инструмента соответственно на исходный и текущий моменты времени.

Функция (15) описывает общеизвестную кривую износа режущего инструмента [14].

Произведение  $\alpha \cdot A_{3B}^{ИСХ}$  характеризует разность между текущим и минимальным уровнями звука по отношению к исходному:

$$\alpha \cdot A_{3B}^{ИСХ} = A_{3B}^{ТЕК} - A_{3B}^{MIN}. \quad (16)$$

С учётом (15) и (16) выражение (14) примет следующий вид

$$\Delta S_{OTH} = \frac{\left( \frac{t - t_{ИСХ}}{T_{СМЕН} - t} \right)^\beta}{\left( \frac{t - t_{ИСХ}}{T_{СМЕН} - t} \right)^\beta + 1},$$

или в более компактной форме, удобной для компьютерной реализации,

$$\Delta S_{OTH} = \frac{(t - t_{ИСХ})^\beta}{(t - t_{ИСХ})^\beta + (T_{СМЕН} - t_{ИСХ})^\beta}, \quad (17)$$

где  $\Delta S_{OTH} = \frac{S_{КОН}^{ТЕК} - S_{КОН}^{ИСХ}}{S_{КОН}^{ИЗН} - S_{КОН}^{ИСХ}}$ .

Соотношение (17) представляет собой выражение для индикатора износа инструмента  $S_{OTH}$ . Он согласно (17) изменяется от нуля (при  $t = t_{исх}$ ) до единицы (при  $t = T_{СМЕН}$ ) и позволяет определять степень степени изменения площади контактного пятна инструмента и тем самым косвенно оценить степень критичности степени его износа.

Эффективность применения индикатора износа инструмента  $S_{OTH}$  была проверена экспериментально при цилиндрическом фрезеровании.

## 2 Экспериментальная оценка эффективности применения индикатора износа инструмента $S_{OTH}$

### 2.1 Методика и предмет эксперимента

Эксперимент проводился на вертикальном фрезерном станке модели 6Р13. Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 2.



Рисунок 2 - Экспериментальная установка

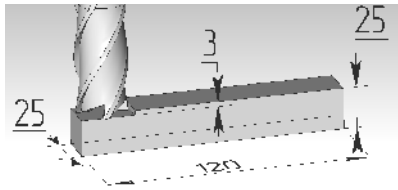


Рисунок 3 – Схема фрезерования

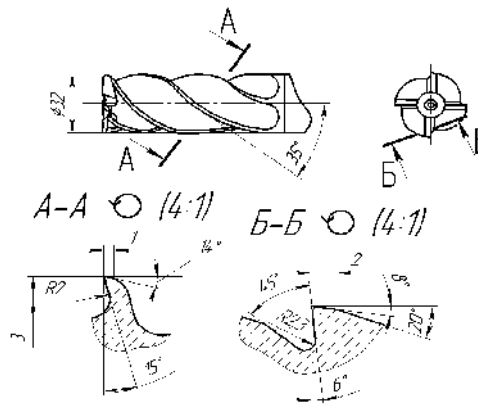


Рисунок 4 – Геометрические параметры фрезы

Для проведения экспериментов использовалась фреза  $\varnothing 32$  мм с четырьмя винтовыми зубьями, углом наклона зуба, равным  $30^\circ$ . Ширина фрезерования составляла 25 мм. Схема фрезерования и геометрические параметры режущей части фрезы показаны соответственно на рис. 3 и 4. Выбор материала фрезы (сталь Р6М5) и заготовки (сталь 45) и режим резания ( $n = 800$  об/мин, подача  $S = 0,01$  мм/зуб,  $t = 3$  мм, без СОЖ) определялся необходимостью достаточно быстрого истощения ресурса инструмента (за 3-4 прохода). После каждого прохода измерялась шероховатость поверхности. Критерием прекращения процесса резания являлось резкое ухудшение качества обрабатываемой поверхности.

Регистрация звукового сигнала осуществлялась с помощью микрофона, размещённого в непосредственной близости от зоны резания. Регистрируемый сигнал в течение всего процесса резания непрерывно подавался на компьютер, где он преобразовывался в цифровую форму и подвергался обработке с целью определения величины индикатора степени износа фрезы  $\Delta S_{отн}$ .

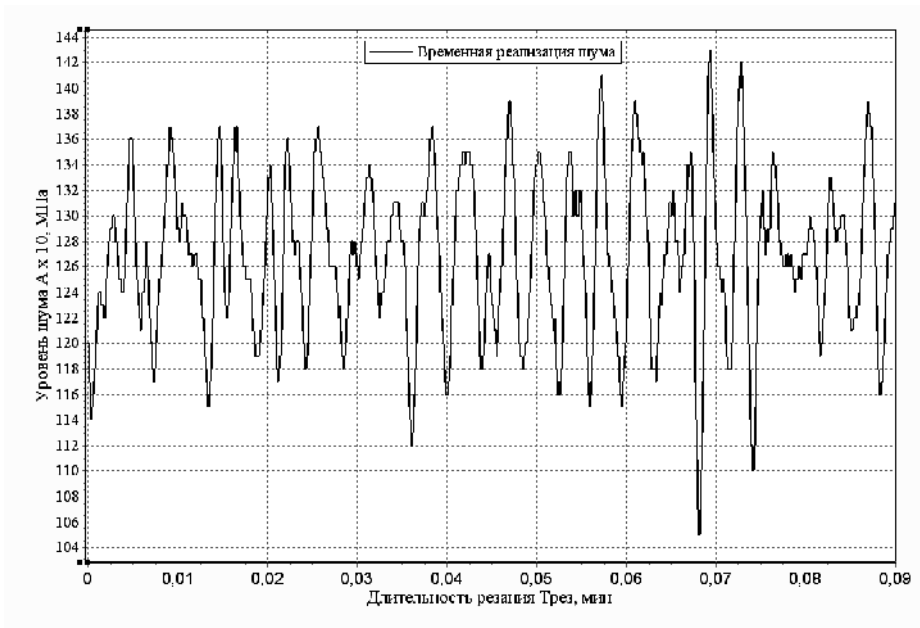
## 2.2 Результаты эксперимента

Результаты эксперимента приведены на рис. 5-8. На рис. 5 и 6 приведены соответственно временная реализация и спектр звука. Из последнего следует, что максимум звука приходится на частоту 240 Гц. Временная реализация иллюстрирует знакопеременный характер звукового сигнала.

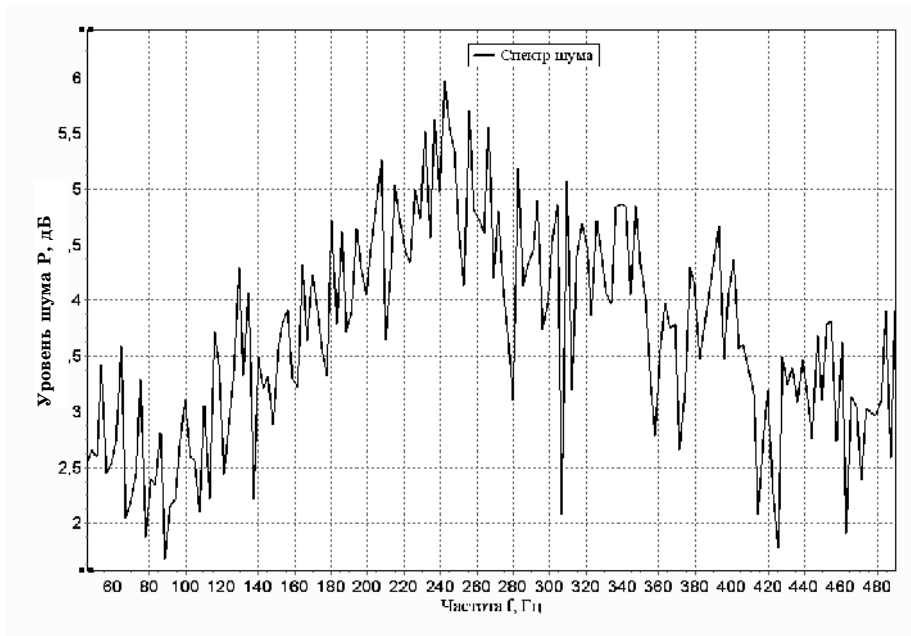
На рис. 7 показан характер изменения уровня звука от начала фрезерования до момента прекращения процесса обработки из-за достижения допустимой принятым уровнем шероховатости обработанной поверхности степени затупления фрезы. Там же приведен график функции (15), аппроксимирующий эти изменения.

На рис. 8 приведены дискретные значения индикатора  $S_{отн}$  (точки), рассчитанные по формуле (17) при каждом акте контроля состояния инструмента в дискретные моменты времени  $t_i$ . Там же показан график функции (17) при пошаговом изменении времени в интервале от  $t_{исх}$  до  $T_{смен}$ .

Из данного рисунка следует, что на момент прекращения процесса обработки индикатор  $S_{отн}$  равнялся величине 0,9. Это означает, что площадь контактного пятна  $S_{кон}$  составляла 90% от предельно допустимого его значения для данного сочетания материалов детали, инструмента и режимов резания.



*Рисунок 5 – Временная реализация шума*



*Рисунок 6 – Частотный спектр шума*

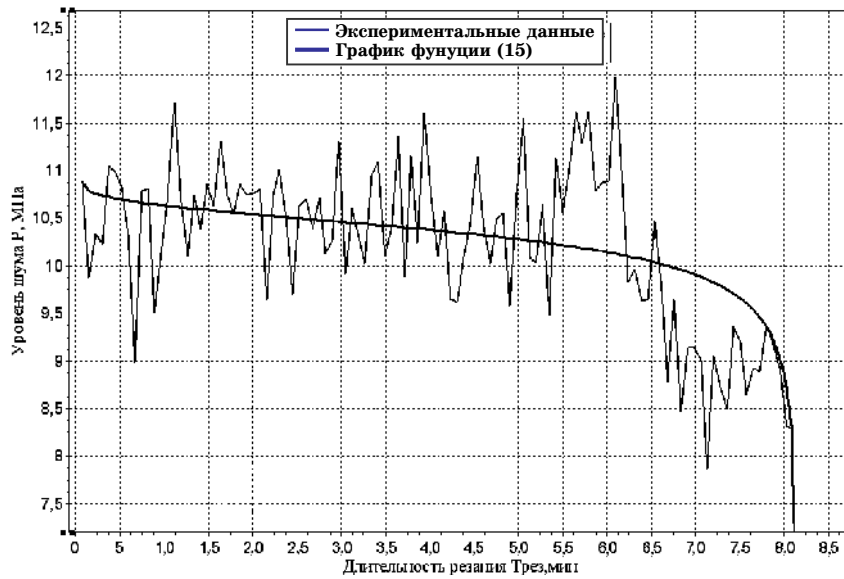


Рисунок 7 – Изменение уровня шума за время резания

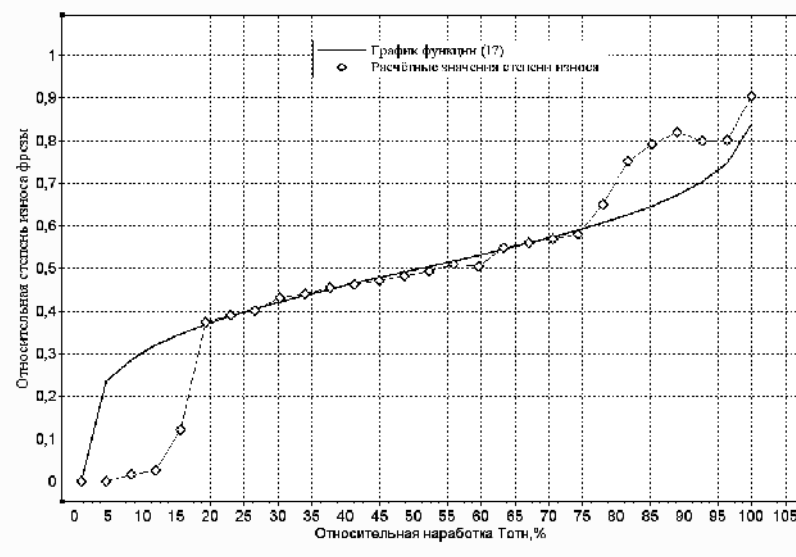


Рисунок 8 – Изменение величины индикатора  $S_{отн}$  за время резания

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для осуществления процедуры диагностирования режущего инструмента методом вибродиагностики необходимо установить зависимость между степенью износа инструмента и уровнем звука, который генерируется процессом резания. Данную зависимость можно описать посредством индикатора износа  $S_{отн}$ . Контролируя значение индикатора, изменяющееся от нуля до единицы, можно оценивать степень критичности состояния лезвия инструмента.



Эффективность индикатора износа инструмента  $S_{отн}$  была проверена экспериментально при цилиндрическом фрезеровании. Эксперимент показал, что на момент прекращения процесса обработки индикатор  $S_{отн}$  равнялся величине 0,9. Это свидетельствовало о том, что площадь пятна контакта инструмента с заготовкой  $S_{кон}$  составляла 90% от предельно допустимого его значения для данного сочетания материалов детали, инструмента и режимов резания. Т. е. во избежание брака фрезы требовала замены из-за степени её затупления, близкой к предельной.

К аналогичному выводу пришли при оценке состояния фрезы традиционным для резания методом – по ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

## SUMMARY

*In the article the authors consider evaluation of the wear of cutting tools (cutters), performed at a traditional method of vibrodiagnostics, method of controlling the sound level emitted in this case. To solve this problem the expressions for the dimensionless parameter (indicator) have been obtained. The indicator allows indirect assessment of the degree of tool wear. Its value varies from zero (at baseline instrument) to one (replacement tool).*

**Keywords:** wear of cutting tools, vibrodiagnostics, sound, energy cut, the light, the duration of the cutting

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дядюра К. А. Управление качеством механической обработки резанием на основе информации технической диагностики / К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – №2(24). – С. 44-49.
2. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
3. Нахапетян Е. Г. Контроль и диагностирование автоматического оборудования / Е. Г. Нахапетян. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
4. Кибальченко А. В. Применение метода акустической эмиссии в условиях гибких производственных систем / А. В. Кибальченко. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 56 с.
5. Акустика: справочник. - 2-е изд., перераб. и доп. / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров; под ред. М. А. Сапожкова. – М.: Радио и связь, 1989. – 336 с.
6. Неразрушающий контроль: в 5 кн., кн. 2.: Акустические методы контроля: практ. пособие. / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.
7. Подураев В. Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В. Н. Подураев, А. А. Базров, В. А. Горелов – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
8. Генкин М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
9. Хае Г.Л. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хае, В. Мгах, К. Г. Громаков и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
10. Зінченко Р.М. Підвищення ефективності точіння за рахунок діагностики зношування інструменту щодо акустичного випромінювання: автореф. дис... на здобуття ступеня кандидата техн. наук: 05.03.01 / Р.М. Зінченко. – Х., 2005. - 23 с.
11. Залого В. А. Исследование возможности применения метода диагностики по акустическому излучению при чистовом точении титанового сплава / В. А. Залого, Р. Н. Зинченко // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. – №4. – С. 118-125.
12. Нагорный В.М. Прогнозирование момента подналадки технологической системы механической обработки при возможных отклонениях от допустимых значений размеров обрабатываемых деталей / В. М. Нагорный, К. А. Дядюра // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – №2. – С. 16-20.
13. Дядюра К. А. Прогнозирование работоспособности режущего инструмента на основе оценки напряжённого состояния поверхности слоя обрабатываемого инструмента / К. А. Дядюра, В. В. Нагорный // Вісник СевНТУ. Серія "Машиноприладобудування та транспорт". - 2010. – Вып.111. – С. 66-70.
14. Мазур М. П. та ін. Основи теорії різання матеріалів: підручник / М. П. Мазур, В. М. Внуков, В. Л. Доброскоков, В. О. Залого, Ю. К. Новосолов, Ф. Я. Якубов. – Львів: Новий Світ-2000, 2010. – 422 с.

*Поступила в редакцию 6 октября 2011 г.*