

## Машиностроение

УДК 621.9

**Е.И. Яцун**, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск)  
(e-mail: mtio@kurskstu.ru)

**С.В. Швец**, канд. техн. наук, доцент, Сумский государственный университет  
(e-mail: shvets46@yandex.ua)

**А.И. Ремнев**, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск)  
(e-mail: alexeyremnev@mail.ru)

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Предложен расчет режимов системы резания, позволяющий прогнозировать условия обработки при использовании различных инструментальных и обрабатываемых материалов.*

*Ключевые слова:* резание металлов, режимы резания, система резания, моделирование.

Механизм стружкообразования с учетом механических свойств обрабатываемого материала и параметров относительного движения элементов системы резания отображает работу деформаций сжатия и изгиба. Работа внешних сил создает критический уровень внутренней энергии в обрабатываемом и инструментальном материале. Синтез общей теории стружкообразования базируется на исследовании и описании структуры системы резания. Целью управления системой резания является обеспечение минимального потребления энергии и предельной устойчивости технологического процесса системы резания.

Для исследования системы резания использована термодинамическая методология. Главной целью термодинамической системы резания является направленное разрушение. Термодинамической системой может быть любая система, находящаяся в равновесном состоянии. Пластичность обрабатываемого материала влияет на передаточные свойства рычага – стружки, в которой создается неравномерное напряженное состояние. У вершины лезвия образуется неподвижная пластическая область, которая влияет на направление и характер приложения сил (наклонная плоскость, рычаг) и форму образовавшейся стружки (стружкозавивание). Поэтому актуальным становится исследование формы границы начала пластических деформаций в зоне реза-

ния, размеров пластической застойной зоны, формирования прирезцового слоя стружки.

При минимуме потребления внешней энергии повышается коэффициент полезного действия (КПД) системы резания,  $\lim \omega \rightarrow 1$ . Внешняя энергия поступает в систему резания через лезвие. Уменьшение потерь при ее движении в зону разрушения способствует повышению устойчивости системы резания. Асимптотический предел устойчивости (аттрактор) процесса резания, который характеризует максимальное значение работы лезвия при резании (дЖ). Определение аттрактора позволяет математически описать движение системы резания. Чем меньше потери, тем меньше работа внешних сил, что снижает интенсивность расхода ресурса работоспособности лезвия,  $R_r \rightarrow \min$ .

Для расчета стойкости инструмента, силовых и тепловых нагрузок, решения обратной задачи - определение параметров режима резания по заданной стойкости - создан расчетно-экспериментальный комплекс исследования процесса резания при точении. В основу его положено понятие о предельной работе лезвия - асимптотическом пределе устойчивости диссипативной системы [1 - 4].

Глубина резания определяется при пересечении контура детали контуром лезвия как расстояние от обрабатываемой до обработанной поверхности (рис.1).

Если произошло очередное,  $j$ -тое изменение координат вершины лезвия на  $x$  и  $y$ , то текущее значение глубины резания в  $i$ -том интервале неизменных условий существования системы резания равно

$$t_{ij} = y_{j-1} + \Delta y, \quad (1)$$

где  $y$  - координаты вершины до  $j$ -го изменения.

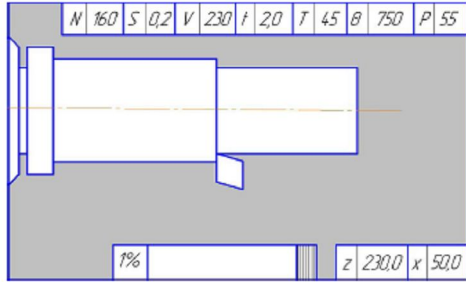


Рис. 1. Компьютерная модель процесса системы резания резцом

Приращение времени обработки определяют зависимостью

$$\Delta \tau_{ij} = \frac{\Delta x}{S_i n_i}, \quad (2)$$

где  $S_i$  - подача,  $n_i$  - обороты.

Текущее значение скорости резания рассчитывается по формуле

$$V_{ij} = \frac{\pi(d - 2t_{ij})n_i}{1000}. \quad (3)$$

Удельная работа в системе резания зависит от механических свойств обрабатываемого материала и коэффициента полезного действия (КПД) системы резания, для чего создается банк данных обрабатываемых материалов, тогда

$$A_{y_{ij}} = \frac{A_0}{\omega_{ij}}, \quad (4)$$

где  $\omega_{ij}$  - КПД системы резания.

Удельная работа при разрушении обрабатываемого материала определяется по формуле

$$A_0 = \int \sigma(\epsilon) d\epsilon. \quad (5)$$

Функция КПД системы резания от параметров режимов резания представляется как

$$\omega = \omega_V(V) \cdot \omega_S(S) \cdot \omega_t(t). \quad (6)$$

Для конкретной системы резания нельзя заранее установить точную зависимость (6), так как КПД отражает все особенности текущего процесса резания, в том числе и его стохастичность. По результатам массива экспериментальных данных получены выражения для расчета номинального значения КПД. Программа начинает работу при следующих соотношениях

$$\omega_V = V^u \quad \omega_S = B S^p \quad \omega_t = C t^q, \quad u = 0,04; \\ p = 0,38; \quad q = 0,15 \quad B = 1,3 \quad C = 0,7. \quad (7)$$

Экспериментальная часть комплекса заключается в уточнении констант ( $u$ ,  $p$ ,  $q$ ,  $B$ ,  $C$ ) эмпирических зависимостей. То есть, в отличие от уравнения

$$\frac{U}{A_j + A_{Tj}} = \omega \rightarrow \max, \quad \text{определяется левая}$$

часть неравенства  $A_j + A_{Tj} \leq A$  по установленному экспериментально значению  $\omega$ . При кратковременном точении определяется  $Pz = f(V)$ ,  $Pz = f(S)$  и  $Pz = f(t)$ .

С помощью формулы  $\omega = \frac{St}{Pz} \int \sigma(\epsilon) d\epsilon$  значения  $Pz$  переводятся в соответствующие значения КПД и рассчитываются уточненные константы в формулах (7).

В результате изменения координат вершины лезвия получено приращение работы

$$\Delta A_{ij} = \frac{A_0}{\omega_{ij}} V_{ij} S_i t \cdot \Delta \tau_{ij}. \quad (8)$$

Полная работа системы резания

$$A_{ij}^p = A_{i-1}^p + \sum_{j=1}^m \Delta A_{ij}, \quad (9)$$

где  $A_{i-1}^p$  - работа, выполненная за предыдущие интервалы между остановками или изменениями условий резания;  $m$  - количество последовательных приращений координат в  $i$ -том интервале неизменных условий.

В программе предусмотрена проверка взаимодействия инструмента и детали. Если их профили не пересекаются, то  $A = 0$ .

Банк данных по инструментальному материалу содержит константы эмпирических формул, по которым, задавая значение  $h_3$ , рассчитывается значение предельной работы лезвия,  $A$ . По величинам  $A_{ij}^p$  и  $A$  определяется в процентах расход ресурса работоспособности лезвия

$$R = \frac{A_{ij}^p}{A} 100\%. \quad (10)$$

На каждом  $i$ -том промежутке точения рассчитывается предполагаемая стойкость лезвия при условии, что режим резания изменяться не будет до полного исчерпания ресурса работоспособности

$$T_i = \frac{A}{Pz_{ij} V_{ij}}. \quad (11)$$

При этом, главная составляющая силы резания определяется как

$$Pz_{ij} = A y_{ij} S_i t_{ij}. \quad (12)$$

Исследование работы комплекса показало, что температура резания хорошо коррелируется с удельной работой резания. По единичному испытанию устанавливается коэффициент  $\delta_m$  и рассчитывается температура

$$\theta_{ij} = \delta_m A y_{ij}. \quad (13)$$

В программе предусмотрен контроль за соблюдением неравенств

$$A_{ij}^p < A; \quad \theta^\circ < \theta_{\text{ед}}^\circ. \quad (14)$$

В случае нарушения этих соотношений выполнение программы приостанавливается и выдается сообщение о критическом износе лезвия. Заменяя в формуле (8) конечные приращения координат соответствующими дифференциалами, с учетом (6) и (7), получим общее выражение для расчета работы [3] при неизменных условиях резания

$$A_j = \frac{A}{BCS^p n^u} \left( \frac{\pi}{1000} \right)^{1-u} \times \left( d - 2 \int_{y_1}^{y_2} dy \right)^{1-u} \left( \int_{y_1}^{y_2} dy \right)^{1-q} \int_{x_1}^{x_2} dx. \quad (15)$$

Тогда работу разрушения, расход ресурса работоспособности лезвия в единицу времени, главную составляющую силы резания, стойкость инструмента и температуру в процессе резания, соответственно, определяют:

$$A^p = A^p + \sum_{j=1}^n A_j, \quad (16)$$

$$A^p \leq A, \quad (17)$$

$$R = \frac{A^p}{A} 100\%, \quad (18)$$

$$Pz_j = \frac{ABCS^{p-1} \left( \int_{y_1}^{y_2} dy \right)^{q-1} 1000^u}{\left( \pi n \left( d - 2 \int_{y_1}^{y_2} dy \right) \right)^u}, \quad (19)$$

$$T_j = \frac{A \left( d - 2 \int_{y_1}^{y_2} dy \right) 1000}{Pz_j \pi n}, \quad (20)$$

$$\theta_j = \frac{\delta A \cdot 1000^u}{\pi^n n^u BCS^p \left( d - 2 \int_{y_1}^{y_2} dy \right)^u \left( \int_{y_1}^{y_2} dy \right)^q}. \quad (21)$$

Проверка работоспособности комплекса проведена путем моделирования стойкости при точении напильного ПС-12НВК-01 (65% порошка ПП-10Н-01 + 35% WC) инструментом из киборита (композит 03). Длина обрабатываемой поверхности 45 мм и диаметр 46 мм. Для определения эмпирических констант в (7) потребовалась только одна заготовка. Предельный износ  $h_3 = 0,4$  мм. В диапазоне параметров режимов резания  $V = 0,5 \dots 5$  м/с;  $S = 0,05 \dots 0,35$  мм/об;  $t = 0,05 \dots 0,4$  мм получены полные сведения о стойкости инструмента (рис. 3, 4), что невозможно при традиционных методах.

Эффективность данной методики расчета (рис. 2) и формирования на ее основе инструментальной базы данных заключается в снижении объема информации, хранящейся в памяти ЭВМ, сокращении время расчетов, снижении затрат на формирование справочных данных,

упрощении расчетных работ при высокой достоверности получаемых результатов.

Сравним расход машинного времени на создание справочных материалов традиционным путем и инструментальной базы данных в расчетно-экспериментальном комплексе. Для расчета режимов резания десяти обрабатываемых материалов при использовании пяти инструментальных материалов получается 50 случаев сочетаний инструментального и обрабатываемого материалов. Пусть влия-

ние  $S$  и  $t$  необходимо установить при 3-х их значениях. Зависимость  $T = f(V)$  построим по 5-ти точкам. Тогда количество опытов для определения зависимости износа инструмента от времени его работы для всех случаев сочетания материалов составит  $N_1 = 3 \times 3 \times 5 \times 50 = 2250$ . Если, в среднем, на один опыт затратить  $\Omega$  мин, то на всю серию потребуется времени  $T_{N_1} = \Omega N_1$ .

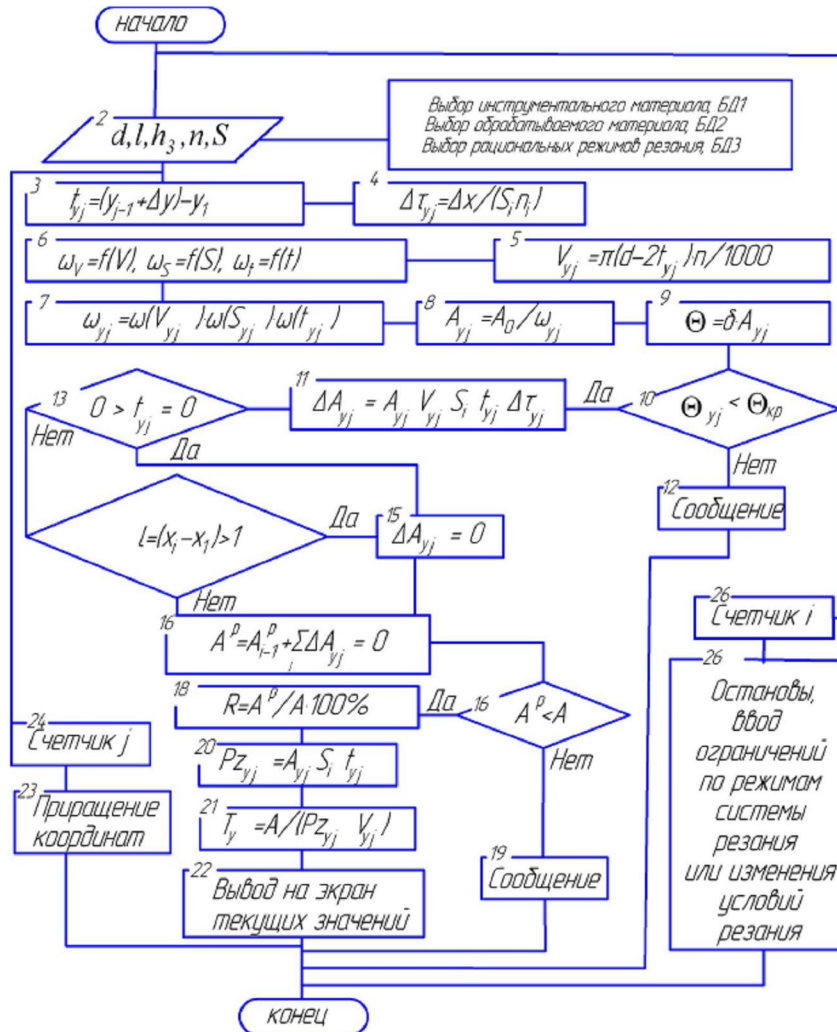


Рис. 2. Алгоритм расчета основных характеристик процесса системы резания при точении

По методике с использованием аттрактора, чтобы установить  $A = f(h_s)$  для одного инструментального материала проведем 15 опытов, также в среднем по  $\Omega$  минуте каждый. Для определения зависимостей  $\omega = (V, S, t)$  потребуется 10 экспериментов (по количеству обрабатываемых материалов).

Следовательно, количество необходимых испытаний  $N_2 = 15 \times 5 + 10 = 85$ . Чтобы упростить расчет, примем длительность стойких испытаний и испытаний по определению  $\omega = (V, S, t)$  одинаковой. Тогда затраченное машинное время  $T_{N_2} = \Omega N_2$ . Отношение  $T_{N_1}/T_{N_2} = 26$  показывает, что расход машинного времени сокращается в десятки раз. Расчетные и рекомендуемые фирмой-изготовителем значения параметров режимов резания хорошо согласуются, но нуждаются в производственном уточнении параметров режимов резания, полученных по предложенной методике.

Предлагаемая методика расчета режимов резания может применяться при любом сочетании инструментального и обрабатываемого материалов, не имеет ограничений по значениям параметров режимов резания в отличие от дискретной структуры таблиц, не требует высокой квалификации исполнителя.

Назначив стойкость инструмента, можно, как показано на рис. 6, построить поверхность, координаты каждой точки

которой соответствуют необходимым для ее обеспечения параметрам режима резания. Этап уточнения режима резания также максимально автоматизирован. Он заключается в измерении на рабочем месте - станки с ЧПУ позволяют это сделать - и использовании в расчетах формулы  $\omega = \frac{St}{Pz} \int \sigma(\epsilon) d\epsilon$  для фактической силы резания.

Механические характеристики качественного инструмента изменяются в узком интервале, что приводит к совпадению расчетных и действительных значений параметров процесса резания.

Сопоставление расчетных значений параметров режимов резания с данными операционных карт различных заводов [2] также показывает хорошее совпадение результатов.

Сравнение параметров режимов резания при точении установленных по предложенной методике и с использованием справочной литературы, также подтверждает [2] адекватность предложенной модели.

Известно, что процесс резания стохастический и относится к семейству случайных величин, являющихся функцией времени,  $\{E(\tau, w), \tau \in T, w \in W\}$ , ( $\tau$  - отрезки времени,  $w$  - случайные величины).

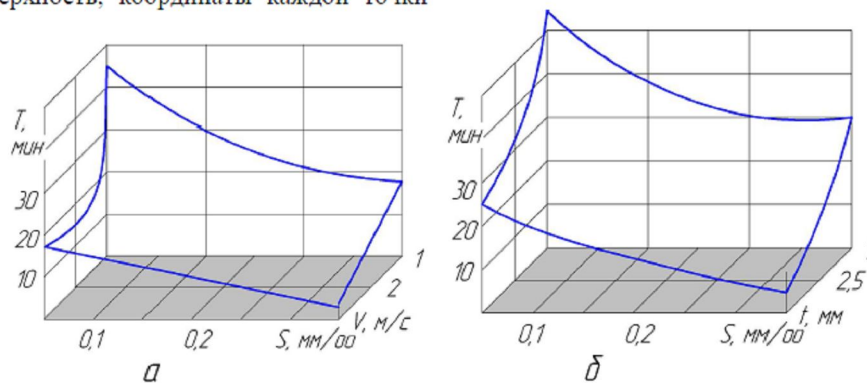


Рис. 3. Зависимость стойкости инструмента от скорости резания и подачи, а также глубины: а - сталь 60С2, композит 03; б - сталь 40Х, композит 10

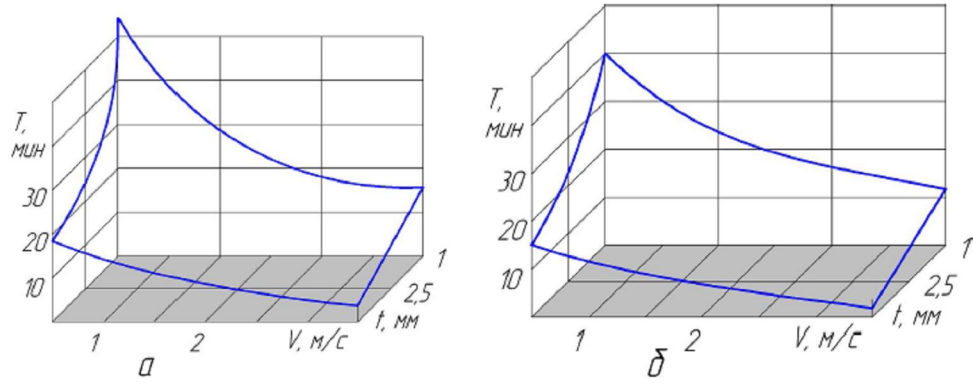


Рис. 4. Зависимость стойкости от скорости и глубины резания:  
а - Сталь 20X13, композит 01; б - чугун СЧ20, композит 12

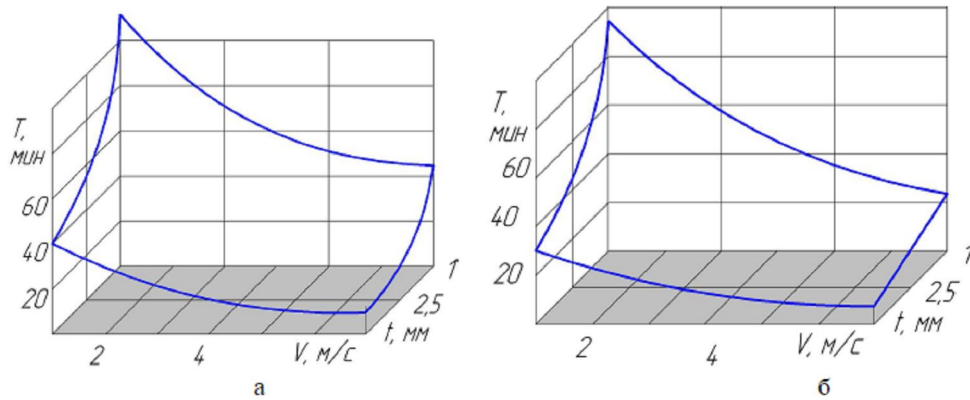


Рис. 5. Зависимость стойкости от скорости и глубины резания сплавов :  
а - АК6, композит 01; б - АК12, композит 12

При резании используются материалы со случайными значениями механических характеристик. Поэтому, очевидно, что

расчетные результаты не могут полностью совпадать с практическими данными.

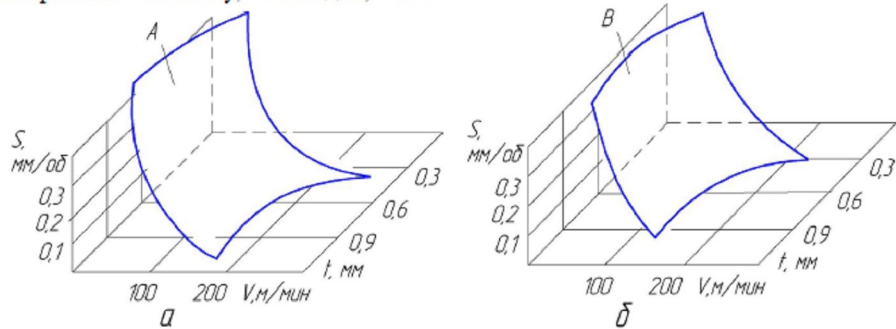


Рис. 6. Зависимость подачи, скорости и глубины резания для координат множества точек поверхностей А и В по системе  $V, S, t$  при точении стали 20X13 и стали 38ХНМФА композитом 10 для А:  $V=(60-313)$  м/мин;  $S=(0,1-0,4)$  мм/об;  $t=(0,1-0,5)$  мм;  $T=60$  мин; для В:  $V=(92-310)$  м/мин;  $S=(0,1-0,6)$  мм/об;  $t=(0,6-1,2)$  мм;  $T=15$  мин

Кроме того, оказалось, что зависимость главной составляющей от скорости резания можно аппроксимировать периодической кривой – синусоидой вида

$$P_z(V) = P_0 + P_a \sin(\beta(V + V_0)),$$

где  $P_0$  – среднее значение функции  $P_z(V)$ ;  $P_a$  – амплитуда;  $V_0$  – начальная фаза;  $\beta = (2\pi)/V_p$  – отношение предела изменения аргумента синуса к интервалу скоростей, дающих соседние экстремальные значения функции  $P_z = P_z(V)$ .

Начальная фаза  $V_0$  и среднее значение  $P_0$  функции  $P_z = P_z(V)$  оказались чрезвычайно чувствительны к любым изменениям свойств материалов и условий взаимодействия в процессе резания. Это объясняет его стохастическое поведение.

Учитывая особенности процесса резания, не может быть создан математический аппарат, позволяющий без обратной связи с высокой точностью прогнозировать параметры проектируемого процесса. Однако, основываясь на положениях разработанной концепции, возможна адаптация расчетно-экспериментального комплекса к конкретным условиям производства. Исходя из энергетической теории прочности, считаем, что величина энергии разрушения для данного обрабатываемого материала постоянна. И если изменение параметров режима резания влияет на величину работы резания, то это свидетельствует об изменении КПД процесса резания. КПД процесса резания отражает его стохастичность и эффективность простых механизмов в зоне резания, поэтому нет строгой функциональной зависимости между ним и параметрами режима резания, геометрией. Однако на основании экспериментальных исследований предложены выражения (7) для расчета номинального значения КПД, обеспечивающих расчетно-экспериментальному комплексу работу при таких его значениях. Расчетные кривые (см. рис. 3, 4 и 5) получены именно при использовании формул (7). В случае необходимости уточнения представления о конкретном

процессе, определяют точную зависимость КПД от параметров режима резания, выполнив кратковременное точение с измерением  $P_z$  и рассчитав его значение по формуле  $\omega = \frac{St}{P_z} \int \sigma(\epsilon) d\epsilon$ .

Адаптация расчетного комплекса к условиям производства заключается в уточнении констант эмпирических зависимостей (7) или вида самих зависимостей. Это переводит процесс резания из разряда стохастического в вероятностный, так как тогда для фиксированного момента времени процесс  $E(\tau_0, w)$  является случайной величиной.

Сравнение расхода ресурса работоспособности инструментального материала с его предельными возможностями позволяет максимально сгладить противоречия между стремлением к полному использованию инструментального материала и необходимостью предотвращения критического износа лезвия.

#### Список литературы

1. Швец С.В., Клименко С.А. Работоспособность лезвийного инструмента при обработке напылённых покрытий // Сверхтвердые материалы. 1997. № 2. С. 47-51.
2. Эффективное применение режущего инструмента, оснащенного синтетическими сверхтвердыми материалами и керамикой, в машиностроении: методические рекомендации. М.: ВНИИТЭМР, 1986. 208 с.
3. Теория резания: математическое моделирование и системный анализ / С.Г. Емельянов, С.В. Швец, А.И. Ремнев, С.А. Сергеев, Е.В. Павлов, Л.А. Ремнева. Старый Оскол: ТНТ, 2010. 312 с.
4. Яцун Е.И., Швец С.В., Ремнев А.И. Исследования образования наростов при резании металлов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: матер. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2011. С. 125-132.

Получено 28.03.12

**E.I. Jatsun**, Candidate of Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk)  
(e-mail: mtio@kurskstu.ru)

**S.V. Shvets**, Candidate of Sciences, Associate Professor, Sumy State University  
(e-mail: shvets46@yandex.ua)

**A.I. Remnev**, Doctor of Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk)  
(e-mail: alexeyremnev@mail.ru)

#### **CALCULATION OF PARAMETERS OF THE SYSTEM FOR CUTTING PROCESSING TOOL FROM COMPOSITE MATERIALS**

*Proposed calculation of modes of cutting system for forecasting the future conditions of processing with the use of the various tools and processed materials.*

**Key words:** cutting of metals, cutting modes, cutting system, modeling.

УДК 621.762.227

**Е.В. Агеев**, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск)  
(e-mail: ageev\_ev@mail.ru)

**В.Н. Гадалов**, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск)  
(e-mail: gadalov-vn@yandex.ru)

**Д.Н. Романенко**, канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск) (e-mail: romanenko-kstu46@yandex.ru)

**А.А. Давыдов**, ст. преподаватель, Юго-Западный государственный университет (Курск)  
(e-mail: truper@mail333.com)

**В.И. Шкодкин**, канд. техн. наук, начальник технического управления ООО «Завод по ремонту горного оборудования» (Курск) (e-mail: shkodkin-vi@yandex.ru)

**А.И. Фомин**, директор ООО «Завод по ремонту горного оборудования» (Курск)  
(e-mail: fomin-ai@yandex.ru)

#### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИЕМ**

*В статье представлены результаты исследования свойств порошка, полученного из отходов машиностроительных производств. Экспериментально установлено, что электроискровое легирование режущего инструмента материалами, полученными электроэрозионным диспергированием отходов твердого сплава, является перспективным методом повышения их стойкости.*

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, отходы твердых сплавов, электроэрозионное диспергирование, твердосплавный порошок, свойства порошка и изделий.

Одним из основных направлений современного материаловедения является создание новых материалов и поверхностных слоев с повышенными физико-химическими и эксплуатационными свойствами, разработка экологически чистых ресурсосберегающих технологий их получения.

Одним из перспективных методов в настоящее время для получения на металлических поверхностях покрытий многофункционального назначения, способствующих увеличению ресурса работы, надежности и конкурентоспособно-

сти деталей газовых и паровых турбин, транспортных и сельскохозяйственных машин, аппаратов химического производства, инструментов и изделий штамповой оснастки и др., позволяющих восстанавливать работоспособность изношенных поверхностей формированием покрытий с требуемыми свойствами, является метод электроискрового легирования (ЭИЛ), впервые предложенный Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

В общей классификации электрофизических способов ЭИЛ отнесено к электроискровой обработке с преимущест-