

Анализ подходов к оценке обрабатываемости материалов резанием

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

Представлены результаты анализа существующих и разработки перспективных методик оценки обрабатываемости резанием на основе сравнения механических свойств, а также количественных показателей структуры материала инструмента и обрабатываемого материала.

Ключевые слова: резание, режущий инструмент, шероховатость обработанной поверхности.

Введение

Показатели процесса резания во многом определяются механическими свойствами контактирующих в зоне резания материалов – обрабатываемого и режущего инструмента. Сочетание этих характеристик обуславливает как саму возможность реализации процесса резания, так и обеспечение его оптимальных показателей.

Процесс резания характеризуется рядом взаимосвязанных параметров, отражающих различные физические явления, происходящие во время взаимодействия режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой. Совокупность этих параметров принято выражать общим термином – обрабатываемость резанием, под которым понимается свойство конструкционных материалов подвергаться обработке резанием [1]. Как отмечает Трент Е.М. [2], фактически не существует четких характеристик, соответствующих термину "обрабатываемость металлов". Эту характеристику можно выразить производительностью или стоимостью обработки, качеством обработанной поверхности. Материал может иметь хорошую обрабатываемость по одному критерию и плохую – по другому, при выполнении различных операций, при использовании различных инструментальных материалов.

В технической литературе приводятся различные количественные характеристики, которые принимаются за критерии обрабатываемости, однако большинство из них связано со скоростью резания как характеристикой процесса обработки, определяющей производительность процесса, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности. Так, в [3, 4] приводится критерий относительной обрабатываемости, представляющий собой отношение скорости резания данного материала, соответствующей стойкости инструмента $T = 45 \dots 60$ мин, и скорости резания стали 45 и стали 12X18H10T при той же стойкости инструмента.

Имеется ряд критериев, связывающих показатели обрабатываемости материалов резанием с условиями протекания процесса, к числу которых необходимо отнести свойства обрабатываемого материала и материала инструмента. За критерий обрабатываемости может приниматься скорость резания, соответствующая максимальной стойкости инструмента [3], угол наклона зависимости $v-T$ в логарифмических координатах [5], оптимальная скорость

резания [5], отвечающая минимальной величине относительного поверхностного износа инструмента. Последний критерий представляет собой особый интерес, так как оптимальная скорость резания (по А.Д. Макарову) соответствует стабилизации сил резания, шероховатости поверхности и реализуется при достижении оптимальной температуры резания, обеспечивающей наиболее полное использование свойств инструментального материала.

Нужно отметить, что во всех представленных случаях необходимо выполнять процесс резания, а информативности показателей недостаточно, чтобы иметь возможность корректировать режим обработки для отдельно взятой обрабатываемой детали. Последнее особенно актуально для обработки материалов с гетерогенной структурой, в частности, наплавленных и напыленных. Это связано с относительно малой толщиной слоя покрытия, что не позволяет проводить широких стойкостных испытаний инструмента, а также со значительным изменением показателей процесса резания в пределах партии деталей вследствие неоднородности структуры и свойств материала покрытий.

Учитывая, что в процессе резания в зоне обработки имеет место контактирование двух материалов, в качестве перспективного подхода представляется оценка обрабатываемости резанием на основе сравнения механических свойств, а также количественных структурных показателей материала инструмента и обрабатываемого материала. В настоящей работе предпринята попытка анализа такого подхода.

Анализ экспериментальных результатов

В технической литературе наиболее часто для оценки обрабатываемости резанием используются зависимости скорости резания от твердости обрабатываемого материала.

Между скоростью резания и твердостью обрабатываемого материала (при постоянной стойкости инструмента) имеет место зависимость

$$v_T = C/HB^x.$$

В ряде работ, например [3, 6], анализируется изменение величины угла наклона зависимости $v-T$ в логарифмических координатах от твердости обрабатываемого материала (параметр m степенной зависимости). Отмечается, что увеличение твердости закаленной стали при точении резцом из твердого сплава ТЗ0К6 приводит к снижению величины m :

HRC	50–52	57–59	61–63	67–69
m	0,49	0,226	0,21	0,161.

В исследованиях [6, 7] приводятся данные о влиянии твердости инструментального материала на этот же показатель, показано, что увеличение твердости твердого сплава в инструменте при точении стали коэффициент m увеличивается:

содержание Co, %	10–13	8	6
m	0,133	0,154	0,175.

Значительное влияние твердости обрабатываемого материала имеет место и при обработке инструментами, оснащенными другими материалами, например, поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе КНБ [8] (рис. 1).

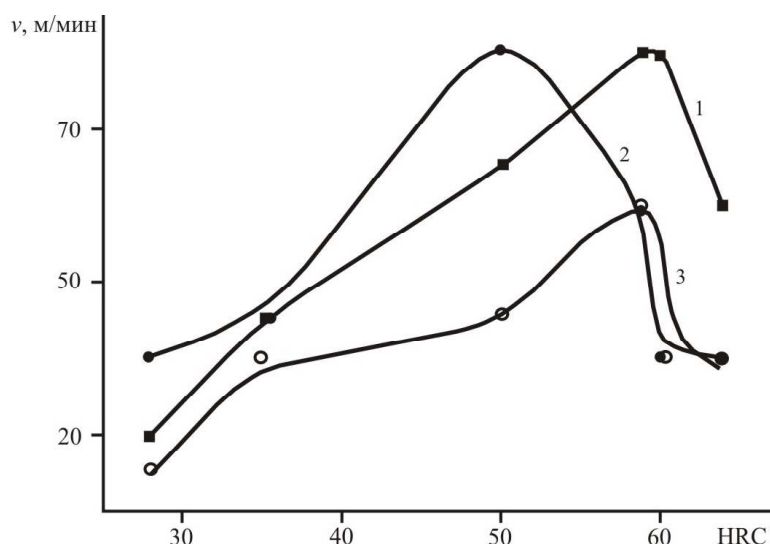


Рис. 1. Влияние твердости стали ХВГ на стойкость резцов из ПСТМ на основе КНБ: 1 – композит 01; 2 – композит 05; 3 – композит 10

Анализ приведенных данных показывает, что каждому инструментальному материалу соответствует определенная твердость обрабатываемого материала, при которой реализуется наибольшая стойкость режущего инструмента.

Практически все имеющиеся зависимости имеют ограниченный характер и являются справедливыми для одной пары «обрабатываемый материал – материал режущего инструмента» и для конкретных механических свойств материалов пары, что не позволяет распространить полученные данные на другие виды обработки.

Отмеченное возможно учесть, если рассматривать соотношение механических свойств обрабатываемого материала и материала инструмента, например их твердостей.

В [9] показано, что в зависимости от соотношения между твердостью абразива H_a и материала изделия H_M при абразивном изнашивании возможны три варианта: слабое изнашивание ($H_a < H_M$), переходный режим ($H_a \sim H_M$), сильное изнашивание ($H_a > H_M$). Для снижения абразивной составляющей изнашивания твердость материала H_M изделия должна быть в 1,3 раза большей твердости абразива H_a .

Применительно к режущему инструменту (при работе на низких скоростях резания) такой критерий может быть представлен в виде $H_u > 1,3H_o$, где H_u и H_o – твердость соответственно материала инструмента и обрабатываемого материала.

Автор [10] утверждает, что соотношение H_u/H_o связано с плотностью энергии трения: $e_T = E (H_u/H_o)$.

Количество материала инструмента, удаленного с контактной поверхности на единицу длины пути резания, существенно зависит от твердостей контактирующих материалов.

По данным [3] при схватывании $M = CGv\tau(H_o/H_u)\varphi_m X_a \xi_m$, где M – количество материала, перенесенного при схватывании; C – const; G – плотность материала; v – скорость относительного перемещения; τ – время; H_o/H_u – соотношение твердостей обрабатываемого материала и материала инструмента; φ_m , X_a , ξ_m – коэффициенты.

Длина пути резания при постоянстве критерия износа может быть определена по уравнению $vT \approx const (H_u/H_o)$.

Температура является одним из параметров, оказывающих наибольшее влияние на твердость контактирующих материалов. Это необходимо иметь в виду при оценке соотношения HV_u/HV_o .

Учитывая, что наименьшая величина относительного поверхностного износа инструмента соответствует оптимальной температуре резания, целесообразно производить оценку соотношения HV_u/HV_o именно при этой температуре. В работе Силина С.С. [11] приведены оптимальные температуры резания широкой гаммы легированных сталей различными твердыми сплавами. В среднем эту температуру можно принять равной 800 °С.

Автор [12] указывает, что уровень температуры при резании сталей инструментом из ПСТМ на основе КНБ при оптимальных скоростях резания сравнительно узок и составляет 1000...1100 °С.

В табл. 1 приведены величины соотношения HV_u/HV_o для ряда сочетаний материалов инструмента и обрабатываемых материалов при оптимальных скоростях резания.

Таблица 1

Соотношение твердостей контактирующих в зоне резания материалов

Обрабатываемый материал	Материал инструмента								
	Твердый сплав						Керамика	ПСТМ на основе КНБ	
	ВК3	ВК6	Т5К10	Т15К6	КНТ 16	СТИМЗБ	ВОК60	Композит 10	Киборит
ПП-Нп-25Х5ФМС	8,7	7,3	6,7	7,9	8,6	12,0	14,7	21,2	36,5
ПП-Нп 35В9Х3ФС	7,9	6,6	6,2	7,7	7,5	10,9	12,7	21,2	36,5
ЛС5Х4В3МФС	6,7	5,6	5,2	6,1	6,3	9,2	10,7	21,2	36,5
ПГ-10Н-01	12,5	11,6	7,6	12,2	–	16,0	–	100	130

Как видно, наиболее перспективны для обработки покрытий инструменты из ПСТМ на основе КНБ, что подтверждается многочисленными экспериментальными результатами. Резание покрытий этими инструментами характеризуются более высокими показателями по всем составляющим понятия "обрабатываемость".

Учитывая интегральный характер понятия "обрабатываемость", целесообразно разработать ее комплексный критерий, учитывающий несколько показателей. Таким критерием может быть коэффициент эффективности обработки, учитывающий в сравнении с эталоном изменение как производительности обработки, так работоспособности инструмента:

$$K = \psi / \psi_{\text{э}}$$

где ψ – относительный износ резца в единицу времени и на единицу производительности; $\psi = h_3 / QT$; $h_3 = 0,4$ мм; Q – производительность обработки; T – стойкость инструмента; K – отношение параметра ψ для эталонного инструмента, например из твердого сплава Т15К6, к параметру для резцов из исследуемого материала.

В табл. 2 приведены некоторые значения критерия K и соответствующие соотношения HV_u/HV_o . Применение инструмента из ПСТМ на основе КНБ вместо инструмента из керамики (HV_u/HV_o увеличивается на 60 %) сопровождается возрастанием критерия K в 2,5–9,0 раз.

Таблица 2
Величины критерия K при обработке отбеленного чугуна HV 4000–6000

Материал инструмента	K	HV_u/HV_o
Твердый сплав ВКЗМ	1,2–1,5	3,2–4,8
Керамика ВOK60	–	3,3–4,9
ПСТМ киборит	2,5–9,0	5,3–8,0

Анализ результатов практического опыта по обработки широкой гаммы конструкционных сталей и сплавов резцами, оснащенными твердыми сплавами, керамикой, ПСТМ на основе КНБ, показывает отсутствие закономерной связи между величиной скорости резания v с соотношением HV_u/HV_o . Некоторая корреляционная связь между соотношением микротвердостей и скоростью резания обнаруживается для более узких групп «материал инструмента – обрабатываемый материал», например при обработке напыленных покрытий (рис. 2).

Математическая обработка результатов показывает, что с ошибкой до 35 % представленные результаты можно описать зависимостью

$$v = 40,16(H\mu_u/H\mu_o) - 43,26.$$

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что для инструмента из одного материала можно вести речь о тенденции к снижению высотных параметров шероховатости обработанной поверхности Rz при уменьшении соотношения HV_u/HV_o . В области $HV_u/HV_o < 5$, снижение Rz может быть описано общей зависимостью для нескольких контактирующих материалов.

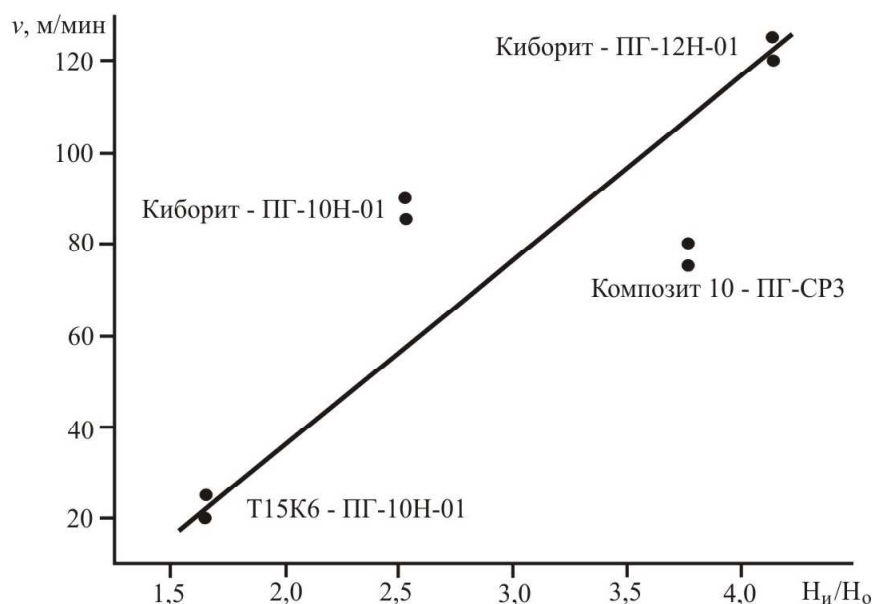


Рис. 2. Влияние соотношения твердостей HV_u/HV_o на скорость резания

Учитывая, что материалы инструментов и современные конструкционные материалы представляют собой композиты со сложной структурой, а их

контактирование в зоне резания является сложным стохастическим процессом, то для изучения свойств контактирующих материалов перспективно использование такого статистического метода микромеханических испытаний как деформационно-спектральный анализ [13]. Метод позволяет статистически оценить поверхностную прочность исследуемого материала рядом параметров, в частности величиной энергетической спектральной плотности распределения силы контактного взаимодействия между исследуемой поверхностью материала и алмазным индентором, перемещающимся по ней под нагрузкой, которая характеризует особенности деформирования материала вдоль трассы сканирования.

Соотношение максимальных величин энергетической спектральной плотности распределения силы контактного взаимодействия S_H/S_0 материала инструмента и обрабатываемого материала может быть использовано вместо соотношения HV_H/HV_0 при определении скорости резания при обработке.

На рис. 2 приведена зависимость $v = f(S_H/S_0)$ для случая обработки ряда сталей резцами из ПСТМ на основе КНБ и твердого сплава.

Из приведенных данных о связи соотношения трибоспектральных параметров с обрабатываемостью материалов резанием для широкой гаммы обрабатываемых материалов можно говорить как о тенденции к повышению с ростом величины S_H/S_0 .

Результаты аналогичных экспериментов, проведенных для случая обработки относительно узкого ряда материалов – порошковых газопламенных покрытий системы Ni-Cr-B-Si – указывают на достаточно тесную связь между изменением величины S_H/S_0 и оптимальной скоростью резания (рис. 3).

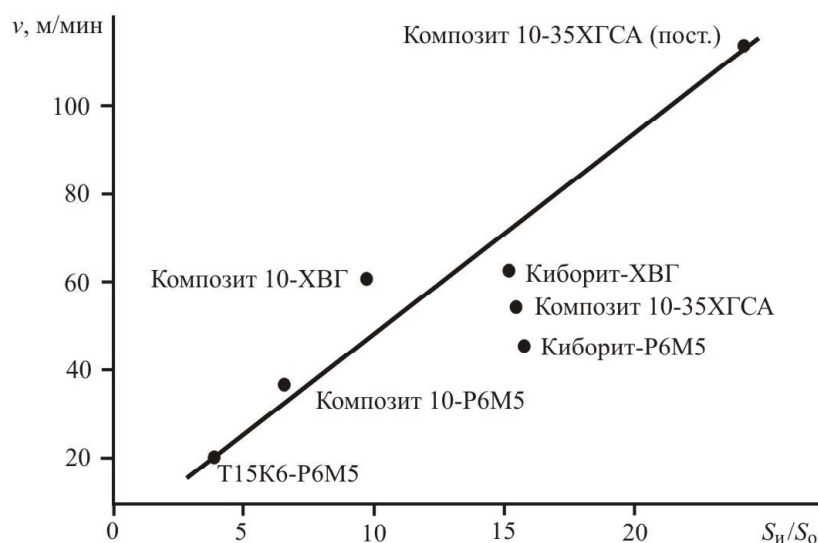


Рис. 3. Взаимосвязь соотношения максимальных величин энергетической спектральной плотности силы контактного взаимодействия S_H/S_0 для материалов инструмента и обрабатываемых материалов со скоростью резания

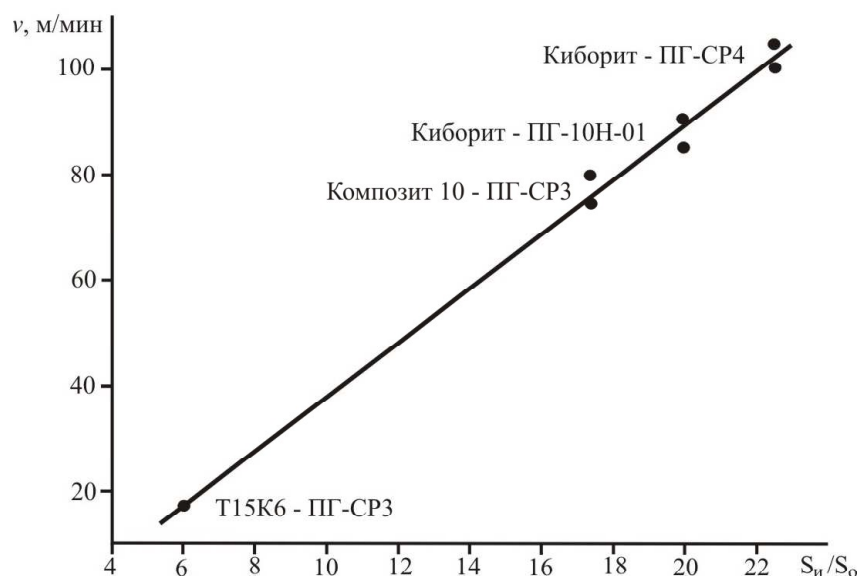


Рис. 4. Взаимосвязь соотношения максимальных величин энергетической спектральной плотности силы контактного взаимодействия S_u/S_0 для материалов инструмента и обрабатываемых напыленных покрытий системы Ni-Cr-B-Si с оптимальной скоростью резания

Результаты экспериментов могут быть описаны неравенством

$$4,8 (S_u/S_0) - 12 < v < 5,2 (S_u/S_0) - 10$$

или

$$v = 2,14 (S_u / S_0)^{1,404} e^{-0,024(S_u / S_0)}$$

где v – оптимальная скорость резания, соответствующая минимальному относительному поверхностному износу инструмента; S_u и S_0 – максимальная величина энергетической спектральной плотности силы контактного взаимодействия для материала инструмента и обрабатываемого материала соответственно.

Представленные выше результаты исследований показывают, что оценка обрабатываемости резанием, полученная на основе сравнения характеристик поверхностной прочности контактирующих материалов, может быть справедливой для узкой группы обрабатываемых материалов.

Характеристики поверхностной прочности контактирующих материалов определяются вдоль трассы сканирования образца с использованием специального оборудования. Для получения информации с площади образца, что особенно важно для образца из материала с гетерогенной структурой (рис. 4, а), необходимо выполнить несколько сканирований и «сшить» трибограммы с учетом общей начальной координаты. Таким образом, формируется визуальное изображение совокупности механических свойств поверхностного слоя образца. Пример такой визуализации показаны на рис. 4, б.

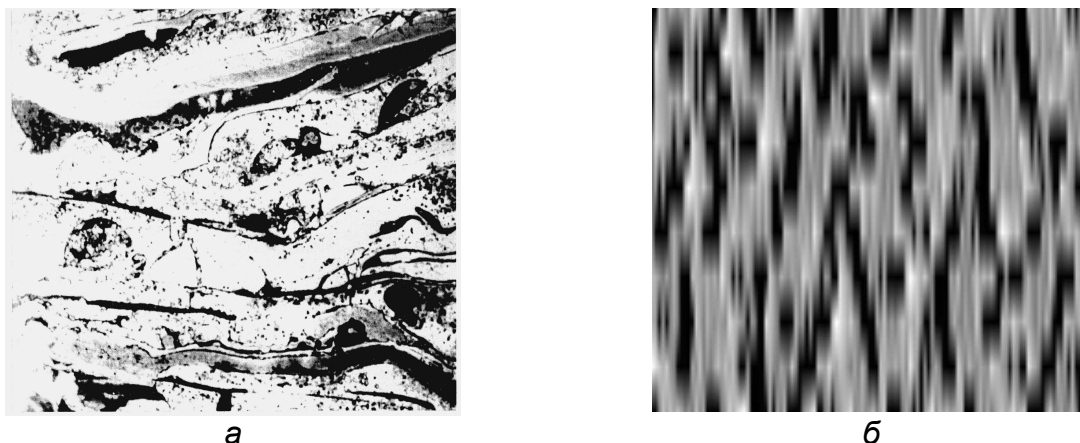


Рис. 4. Структура газопламенного покрытия из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$ (а) и визуализированная совокупность механических свойств его поверхностного слоя (б)

Мультифрактальный анализ изображений, показанных на рис. 4, показал [14], что между фрактальными размерностями структуры и совокупности механических свойств исследуемого материала имеет место связь с коэффициентом корреляции 0,99.

Это открывает новые перспективы в разработке методики оценки обрабатываемости материалов резанием. Такой подход после наполнения базы данных позволяет не только отказаться от проведения процесса резания для установления стойкости инструмента и скорости резания, но и проводить оценку обрабатываемости резанием на основе анализа изображений и сравнения параметров структур материала инструмента и обрабатываемого материала.

Заключение

Выполненный в статье анализ подходов к оценке обрабатываемости материалов резанием показывает перспективность методик, основанных на учете свойств контактирующих в зоне резания материалов – материала инструмента и обрабатываемого материала.

Применение к оценке обрабатываемости резанием параметров мультифрактального анализа структур контактирующих материалов открывает возможности выполнения такой оценки без непосредственного проведения процесса резания и использования специального оборудования для определения твердости или деформационно-спектрального анализа поверхностного слоя материалов.

Список литературы

1. Грановский, Г.И. Резание металлов [Текст] / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
2. Трент, Е.М. Резание металлов [Текст] / Е.М. Трент. – М.: Машиностроение, 1980. – 263 с.
3. Бобров, В.Ф. Развитие науки о резании металлов [Текст] / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 417 с.
4. Гуревич, Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов [Текст] / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. –

240 с.

5. Аваков, А.А. Физические основы теорий стойкости режущих инструментов [Текст] / А.А. Аваков. – М.: Машгиз, 1960. – 308 с.

6. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания [Текст] / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

7. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом [Текст] / Шустер Л.Ш. – М.: Машиностроение, 1988. – 107 с.

8. Гриценко, Э.И. Точение никелевых сплавов инструментом из кубического нитрида бора [Текст] / Э.И. Гриценко, П.Е. Дальник, В.П. Чапалюк – К.: Наук. думка, 1993. – 107 с.

9. Чикос, Х. Системный анализ в трибонике [Текст] / Х. Чикос. – М.: Мир, 1982. – 352 с.

10. Доденко, В.А. Изнашивание твердых тел [Текст] / В.А. Доденко. – М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1990. – 192 с.

11. Силин, С.С. Метод подобия при резании материалов [Текст] / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

12. Зубарь, В.П. Перспективы применения синтетических поликристаллических сверхтвердых материалов в лезвийной обработке [Текст] / В.П. Зубарь // Резание и инструмент: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1981. – Вып. 26. – С. 48–50.

14. Клименко, С. А. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту [Текст] / С. А. Клименко, Мельничук Ю. О., Встовський Г. В. – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля, 2009. – 170 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк
Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Поступила в редакцию 07.06.2013

Аналіз підходів до оцінки оброблюваності матеріалів різанням

Наведено результати аналізу існуючих і розроблені перспективні методики оцінювання оброблюваності різанням на основі порівняння механічних властивостей, а також кількісних показників матеріалу інструменту та оброблюваного матеріалу.

Ключові слова: різання, різальний інструмент, шорсткість обробленої поверхні.

Analysis of approaches to assessing machinability of materials by cutting

The results of analysis of existing and future development machinability evaluation methods based on a comparison of the mechanical properties, as well as quantitative structure of the tool material and the processed material.

Keywords: cutting, cutting tools, surface finish.