

УДК 621.91.02:621.891

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Н. Н. ПОПОК

Предложены методика оценки эффективности режущих инструментов с износостойкими покрытиями и способ определения периода стойкости покрытия. Проведены сравнительные исследования износа режущих инструментов из различных материалов, в том числе с износостойкими покрытиями при обработке деталей из нержавеющей стали, титановых, алюминиевых и магнитно-мягких сплавов. По результатам исследований разработаны рекомендации по применению режущих инструментов с многослойными износостойкими покрытиями.

Ключевые слова: режущий инструмент, износостойкие покрытия, эффективность, режим резания, износ, работоспособное состояние режущего инструмента.

Введение. Как известно, ведущие зарубежные фирмы металлообрабатывающей промышленности до 85% выпускаемых режущих инструментов (РИ) упрочняют износостойкими покрытиями (ИП). Причем в зависимости от свойств обрабатываемых материалов рекомендуются оптимальные составы и марки покрытий, обеспечивающие необходимую износостойкость и прочность режущих инструментов.

В отечественной промышленности централизованный выпуск режущих инструментов с износостойкими покрытиями не налажен, а имеющиеся рекомендации по их применению зачастую противоречивы и не охватывают весь спектр обрабатываемых и инструментальных материалов. Предприятия вынуждены идти по пути освоения производства по нанесению износостойких покрытий на режущие инструменты. В этих условиях возникают проблемы, связанные с оценкой целесообразности упрочнения тех или иных типоразмеров режущих инструментов и выбором оптимальных составов покрытий для конкретного производства.

В настоящее время, как правило, эффективность применения режущих инструментов с износостойкими покрытиями (РИИП) оценивается на технологической операции и не рассматривается достигнутый эффект в общем производственном цикле изготовления РИИП и изделия, что искажает представление об эффективности режущих инструментов с покрытиями. Поэтому предложена методика поэтапной или многоуровневой оценки эффективности применения РИИП с выделением наиболее значимых критериев и показателей, распределенных с определенными приоритетами [1].

Основные этапы методики. На первом этапе или уровне оценивается частота и продолжительность использования тех или иных типоразмеров режущих инструментов [2]. Для этого проводится их классификация по видам обработки и характерным параметрам в соответствии с получаемыми конструктивно-технологическими элементами (КТЭ) и простейшими поверхностями (ПП) деталей. Затем формируются статистические данные о частоте и продолжительности их использования в производстве, и проводится анализ этих данных по коэффициенту условной продолжительности

$$K_n = \text{Ч П.}$$

Выявляются наиболее часто используемые режущие инструменты, на которые, в первую очередь, целесообразно наносить износостойкие покрытия.

Для данного этапа методики разработана программа на ЭВМ (IBM PC/AT), позволяющая в автоматизированном режиме формировать базу данных по КТЭ и ПП деталей и ре-

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

жушим инструментам, производить статистическую обработку данных по частоте и продолжительности встречи КТЭ и ПП и использования РИ и разрабатывать ограничительные перечни на наиболее часто встречающиеся режущие инструменты. Программа является открытой для пополнения информационной базы данных по составу и свойствам износостойких покрытий на режущих инструментах.

На втором этапе или уровне оценивается работоспособное состояние режущего инструмента с покрытием [3] по следующим коэффициентам:

- стойкости РИ $K_c = T_{ип} / T_б$;
- обрабатываемости материала детали $K_o = v_{ип} / v_б$;
- точности и качества обработки $K_{тк} = (IT, Ra)_б / (IT, Ra)_{ип}$.

Параметры, входящие в эти формулы, выбираются для базового инструмента по справочникам, технологическим картам и чертежу детали, а для инструмента с покрытием определяются экспериментальным или расчетным путем по известным методикам [4, 5]. Коэффициенты работоспособного состояния режущего инструмента, представляющего по существу бальную оценку эффективности режущего инструмента на этапе его эксплуатации, определяются по формуле:

$$K_{рс} = K_c \cdot K_o \cdot K_{тк}$$

Критерии или показатели третьего уровня характеризуют инструмент на этапе его изготовления и включают коэффициенты:

- себестоимости режущего инструмента $K_{сс} = C_б / C_{ип}$;
- срока окупаемости $K_{со} = Z_{ип} / (C_б - C_{ип})$.

Эффективность РИИП может быть оценена как показатели одного из уровней, так и нескольких уровней в баллах:

$$K_э = K_c \cdot K_o \cdot K_{тк} \cdot K_{сс} \cdot K_{со}$$

Инструмент, который наберет наибольшее количество баллов, считается эффективным. Эффективность РИИП может быть также оценена по обобщенной функции желательности:

$$K_э = f(K_c, K_o, K_{тк}, K_{сс}, K_{со})$$

Под желательностью понимают тот или иной уровень параметра или критерия оценки эффективности режущих инструментов:

$$K_i = \exp[-\exp(-K_i)]$$

Обобщенная функция желательности формируется как среднее геометрическое желательностей параметров (рис. 1):

$$K_э = (K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n)^{1/n}$$

С учетом предложенной методики на одном из машиностроительных предприятий был проведен статистический анализ применяемости режущих инструментов при изготовлении изделий из различных материалов. Выявлено, что наиболее часто в производстве изделий используются сверла, концевые фрезы и резцы определенных типоразмеров. На режущие лезвия этих инструментов в заводских условиях с использованием ионно-вакуумной установки «Мир» были нанесены износостойкие покрытия. Для сравнения были

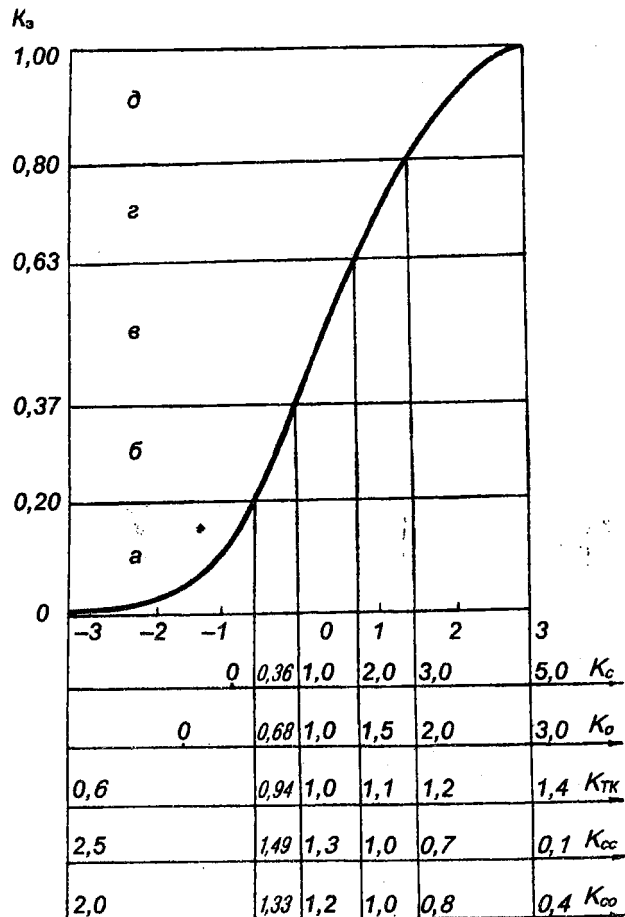


Рис. 1. К оценке эффективности РИИП по обобщенной функции желательности: а - очень плохо; б - плохо; в - удовлетворительно; г - хорошо; д - очень хорошо

взяты режущие инструменты без покрытия с твердосплавными пластинами Т15К6, ВК8, ТН20, со вставками сверхтвердого материала «БЕЛБОР», а также из быстрорежущей стали Р6М5 и РЗАМЗФ2.

Экспериментальные исследования и испытания РИИП проводились на универсальном токарно-винторезном станке модели 16К20, токарном станке с ЧПУ модели СТП220АП, фрезерном станке с ЧПУ модели 6Р13Ф3. Обрабатывались заготовки в виде прутков диаметром 10–45 мм и заготовки корпусных деталей из легированных сталей марок 12Х18Н10Т, 36НХТЮ, 07Х16Н6, ХН67МТЮ, титанового ОТ4, алюминиевого Д16Т и магнитно-мягкого 29НК сплавов. Режимы резания устанавливались по рекомендациям предприятия и литературным данным [5] в следующих пределах: при обработке легированных сталей и магнитно-мягких сплавов резцом и сверлом скорость резания изменялась от 1,5 до 200 м/мин, подача – от 0,5 до 0,1 мм/об, глубина резания – от 0,1 до 0,7 мм; при обработке титанового сплава скорость резания изменялась от 35 до 105 м/мин, подача – от 0,1 до 0,3 мм/об, глубина резания – от 0,5 до 1,0 мм; при обработке алюминиевого сплава частота вращения шпинделя станка изменялась от 800 до 2000 об/мин, величина подачи – 300 мм/мин и глубина резания – 6 мм. Обработка заготовок проводилась по «корке» и без «корки», с применением СОЖ и без нее. При испытаниях использовались методы ступенчатого изменения диаметра заготовки и скорости резания [4].

Износ по передней и задней поверхностям инструмента измерялся на инструментальном микроскопе БМИ-1, шероховатость обработанной поверхности детали – на профилографе-профилометре модели 252. В отдельных случаях проводились измерения с помощью динамометрической установки УДМ-600 силы резания и с помощью естественной термопары фиксировалась температура резания. Период стойкости покрытия на режущем инструменте определялся по способу [6], согласно которому вначале производили обработку деталей РИИП и без них, изменяя скорость резания. При этом фиксировали ЭДС в зоне резания, которая включает такие составляющие как термо-ЭДС E , возникающую за счет разности потенциалов контактирующих тел, так и деформационную ЭДС E_d , возникающую за счет изменения трения и деформаций контактирующих тел (рис. 2,а). Интерес представляет деформационная составляющая ЭДС, достоверно и точно характеризующая период истирания поверхностей контактирующих тел, так как с изменением толщины покрытия изменяется характер и величина трения и деформаций. Поэтому при фиксации ЭДС определяли скорость резания, при которой в парах деталь–РИИП и деталь–РИ возникла деформационная составляющая ЭДС E_{d1} и E_{d2} (на рис. 2,а проявляется в виде скачкообразного изменения ЭДС за счет деформационной составляющей). Так как материалы контактирующих пар различны, то и скорости, при которых возникает деформационная ЭДС, также различны. Из двух значений скоростей v_1 и v_2 выбирали наибольшее, так как оно обеспечивало возникновение E_d как в паре деталь–РИИП, так и в паре деталь–РИ.

Затем обрабатывали детали РИИП. При этом фиксировали период работы покрытия до

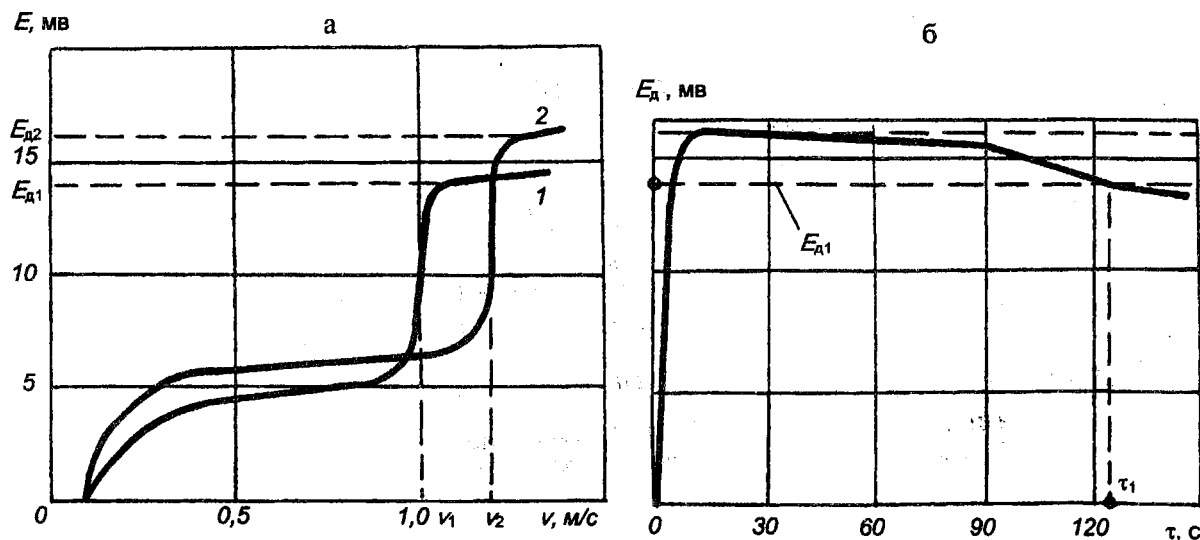


Рис. 2. Зависимость термоЭДС от скорости резания (а) и деформационной ЭДС от времени (б) при обработке: 1 – РИ; 2 – РИИП

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

его полного износа, т.е. фактически до времени начала работы инструментом без покрытия τ_1 (рис. 2б). Время от 0 до τ_1 определяет период стойкости покрытия.

В результате экспериментальных исследований и испытаний было установлено, что при точении легированных сталей наибольшую стойкость имеют резцы с пластинами ВК8 (в табл. 1 для примера представлен фрагмент полученных данных).

У пластин ВК8 наблюдалось характерное истирание по задней поверхности, в то время как износ вставок из «БЕЛБОРА» происходил в основном за счет выкрашивания режущей кромки. Упрочнение пластин Т15К6 нитридом титана не привело к повышению их стойкости по сравнению с неупрочненными, что, по-видимому, связано с химическим сродством обрабатываемого материала и материала покрытия и недостаточной адгезией покрытия. Для пластин ТН20, например, при обработке стали 36НХТЮ, не удалось подобрать скорость резания, при которой износ режущей кромки не носил бы катастрофического характера. Пластина Т15К6 обрабатывала эту сталь только при скорости резания < 5 м/мин, а «БЕЛБОР» обеспечивал необходимую стойкость на длине прохода инструмента ≤ 20 мм.

Сверление заготовок из стали ХН67ВМТЮ, упрочненными нитридом титана и неупрочненными сверлами диаметром 5 мм без применения СОЖ, не показало заметных отличий в их стойкости, что обусловлено теми же причинами как и в случае точения. Использование СОЖ приводит к некоторому увеличению стойкости упрочненных сверл.

При точении заготовок из титанового сплава ОТ4 по «корке» и без «корки» установлено, что наименьший износ имеют пластины ТН20 с покрытием TiN (рис. 3). По-видимому, это связано с более прочным сцеплением (адгезией) покрытия с основой в силу их химического сродства. Покрытие на пластинах ВК8 обеспечивает повышение стойкости по сравнению с пластинами без покрытия при максимальных режимах обработки. Значения силы резания и характер ее изменения при различных скоростях резания (рис. 4 а) и подачах (рис. 4 б) примерно одинаковы для всех инструментальных материалов. Применение пластин ТН20 с покрытием обеспечивало наименьшую шероховатость обработанной поверхности детали.

При точении магнитно-мягких сплавов наибольшую стойкость инструмента обеспечивает применение пластин ВК8 без по-

Таблица 1. Износ инструмента с пластинами

№ прохода инструмента	Величина фаски износа f_n на пластинах, мкм			
	ВК8*	БЕЛБОР*	Т15К6+	Т15К6+TiN+
1	33	36	47	95
2	81	80	91	104
3	82	80	149	150
4	84	82	159	155
5	92	86	167	170
6	99	90	174	172
7	99	96	187	193
8	106	104	233	230
9	110	108	246	288
10	110	116	263	290

Примечание. * — $l = 100$ мм; + — $l_{пр} = 50$ мм;
 $v = 96$ м/мин; $s = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм

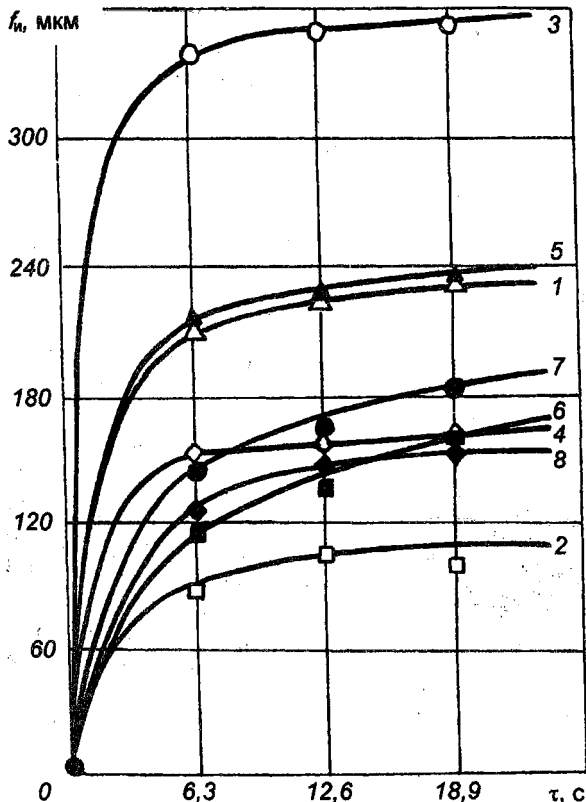


Рис. 3. Зависимость износа инструмента от времени обработки титанового сплава ОТ-4 по «корке»: 1 — ТН20; 2 — ТН20 + TiN; 3 — ВК8; 4 — ВК8 + TiN; без «корки»: 5 — ТН20; 6 — ТН20 + TiN; 7 — ВК8; 8 — ВК8 + TiN; условия обработки: $v = 106$ об/мин, $s = 0,3$ мм/об, $l = 1,0$ мм

Таблица 2. Величина фаски износа инструмента f_n при обработке магнитно-мягкого сплава, мкм

Материал инструмента	f_{n1}	f_{n2}	f_{n3}
ВК8	75	78	85
Т15К6	45	85	100
То же+TiN	65	105	115
БЕЛБОР	80	170	225
ТН20+TiN	61	75	80

Примечание. $l_{пр} = 50$ мм; $s = 0,05$ мм/об; $t = 0,05$ мм; $n_1 = 800$ об/мин; $n_2 = 1600$ об/мин.

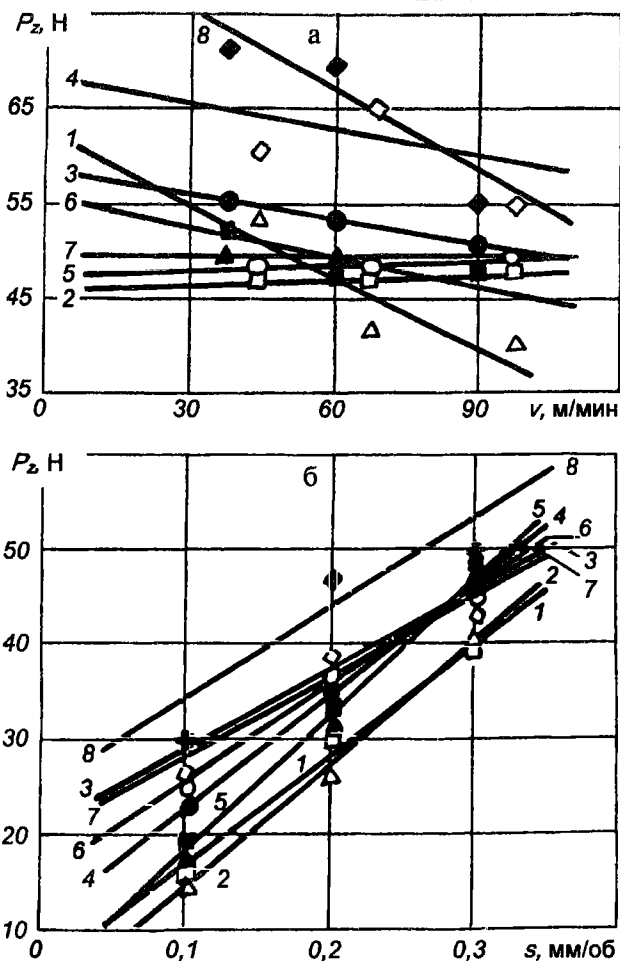


Рис. 4. Зависимость силы резания от скорости резания (а) и подачи (б) при обработке титанового сплава ОТ-4 по «корке»: 1 - TiN; 2 - TiN + TiN; 3 - VK8; 4 - VK8 + TiN; без «корки»: 5 - TiN; 6 - TiN + TiN; 7 - VK8; 8 - VK8 + TiN (условия обработки те же, что и на рис.3)

правило, не обеспечивает повышения стойкости инструмента по сравнению с традиционно применяемыми на предприятиях инструментальными материалами, были проведены исследования покрытий из нитрида циркония и многослойных покрытий, наносимых на инстру-

крытия и TiN с покрытием нитридом титана (табл. 2). Износ упрочненных пластин в период приработки инструмента происходит в виде выкрашивания, в то время как у неупрочненных пластин преобладает истирание по задней поверхности. Для инструмента, оснащенного «БЕЛБОРОм», характерно интенсивное разрушение режущей кромки в период приработки. Зафиксировано незначительное (10–20%) увеличение температуры и силы резания при обработке упрочненными пластинами по сравнению с неупрочненными, что, по-видимому, связано с большим радиусом скругления режущей кромки упрочненных пластин (32–50 мкм) по сравнению с неупрочненными (7–10 мкм).

При фрезеровании заготовок из алюминиевого сплава Д16Т упрочненным нитридом титана и неупрочненными концевыми фрезами диаметром 16 мм при $n = 800$ об/мин и $n = 45$ об/мин признаков размерного износа не обнаружено, а при $n = 200$ об/мин и $\tau = 90$ мин зафиксирован износ в виде округления режущей кромки: у упрочненных фрез – 60 ± 65 мкм и у неупрочненных – 40 ± 45 мкм. Износостойкое покрытие исключало образование нароста на режущей кромке и вибрации в зоне резания, что несколько повышало качество обработки. Силы резания примерно одинаковы для фрез с покрытием и без него (табл.3).

Учитывая, что износостойкое покрытие из нитрида титана, наносимое на инструмент в условиях предприятия, как

инструмент в условиях лаборатории Физико-технического института АН Беларуси*. Полученные результаты свидетельствуют (табл. 4), что износостойкость этих РИИП связана с числом слоев и взаимным расположением материалов в покрытии. Наилучшие результаты по снижению износа пластин, а также сил резания были достигнуты при использовании трех- и пяти-слойных покрытий, в которых внутренний и внешний по отношению к подложке слой покрытия были из нитрида титана. Микрoанализ и растровая электронная

Таблица 3. Сила резания при обработке алюминиевого сплава Д16Т

№ опыта	Режимы резания			Сила резания при обработке фрезой P_z , Н	
	t , мм	s , мм/мин	n , об/мин	без покрытия	с покрытием
1	2	240	1000	200	205
2	3			285	290
3	4			360	380
4	5			450	445
5	2	288	1000	220	235
6		240	1000	200	205
7		192	1000	160	175
8		144	1000	135	140
9	2	240	1000	195	200
10			1250	165	160
11			1600	135	145
12			2000	110	110

Примечание. $\gamma = 12^\circ$; $\alpha = 18^\circ$; $\lambda = 40^\circ$; $d_\phi = 16$ мм

* Работа выполнена А. А. Миневичем.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

микроскопия изношенных поверхностей инструмента показали, что покрытия эффективно препятствуют диффузии вольфрама, кобальта и железа на границе раздела инструментального и обрабатываемого материалов. При максимальной толщине карбидного слоя происходит хрупкое разрушение покрытия и увеличение фактической площади контакта передней поверхности инструмента со стружкой, что может приводить к некоторому увеличению коэффициента трения. Эти покрытия обеспечивали повышение стойкости инструмента в 2–5 раз по сравнению с инструментом без покрытия. В производственных условиях испытания пластин с многослойными покрытиями показали повышение стойкости инструмента в 2–3 раза.

Выводы. Таким образом, предлагаемая методика позволяет формировать базу данных РИИП и унифицировать их в зависимости от обрабатываемого материала, оценивать эффективность РИИП по комплексному критерию на этапах их изготовления и эксплуатации, а предложенный способ – повысить достоверность и точность определения периода стойкости покрытия на режущем инструменте по фиксации изменения деформационной ЭДС. По результатам исследований обрабатываемости рассмотренных групп материалов наибольшую эффективность показали и могут быть рекомендованы для использования в производстве РИ с многослойными покрытиями и покрытия на основе ZrN.

Таблица 4. Величины фаски износа инструмента при последовательных проходах в процессе точения стали 12Х18 Н10Т

Инструментальный материал	Номер прохода инструмента		
	1	2	3
T15K6	213	247	260
то же+TiN	137	151	183
–“ +TiC+TiN	162	165	181
–“ +TiN+TiC+TiN	123	124	130
–“ +ZrN	66	80	124

Примечание. $l = 500$ мм; $n = 500$ об/мин; $t = 1$ мм; $s = 0,3$ мм/об

Обозначения

ν , Π – частота и продолжительность использования режущих инструментов; $T_{ин}$, $T_б$ – периоды стойкости РИИП и базового РИ; $\nu_{ин}$, $\nu_б$ – скорости резания РИИП и базового РИ; $(IT, R_a)_{ин}$, $(IT, R_a)_б$ – точность и шероховатость детали, обработанной РИИП и базовым РИ; $C_{ин}$ и $C_б$ – себестоимость РИИП и базового РИ; $Z_{ин}$ – затраты на РИИП; K_i – безразмерное значение параметра или критерия, приведенное в соответствие со шкалой желательности; ν , s , t – скорость, подача и глубина резания соответственно; n – частота вращения; $l_{пр}$ – длина прохода РИ; γ , α , λ – передний, задний углы и угол наклона режущей кромки лезвия инструмента соответственно; d – диаметр инструмента; $f_{и}$ – фаска износа по задней поверхности РИ; τ – время обработки; P_z – сила резания; E – термо-ЭДС резания; E_d – деформационная составляющая ЭДС.

Литература

1. Попок Н. Н., Хейфец М. Л. Оценка эффективности применения режущих инструментов в производственном процессе // Известия АНБ, Сер. физ.-техн. наук (1995), №2, 64–69
2. Попок Н. Н., Хейфец М. Л. Автоматизация подготовки производства на основе унификации конструктивных элементов деталей и инструментов // Машиностроитель, Москва (1992), №4, 15–16
3. ГОСТ 25751-83 Инструменты режущие. Москва (1985)
4. Ящерицын П. И., Махаринский Е. И. Планирование эксперимента в машиностроении. Минск: Вышэйшая школа (1985)
5. Гуревич Я. М., Горохов М. В., Захаров В. И. и др. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник. Москва: Машиностроение (1986)
6. Способ определения периода стойкости покрытия на режущем инструменте: а.с. 1658025 СССР, МКИ G01N3/58; Бюл. изобр. (1990), №23 / Н. Н. Попок, О. А. Алесеев

Поступила в редакцию 10.06.96.

Popok N. N. Comparative efficiency of cutting tools with antiwear coatings.

Evaluation of efficiency of cutting tools with wear-resistant coatings is described. Comparative research is carried out in wear resistance of cutting tools made of various materials when machining the parts made of stainless steels, titanium, aluminum and soft magnetic alloys. Recommendations on application of cutting tools with multilayered wear-resistant coatings have been worked out based on the results of the research.