

УДК 537.311.3:621.91.01  
DOI 10.17513/snt.40060

## ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ ПО ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С., Рогачев А.В., Медников С.В.,  
Чигиринская Н.В., Исламов А.М.

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград,  
e-mail: alexsandrogachev@ya.ru*

Эффективность процессов резания в металлообработке тесно связана с технологическими возможностями и надежностью режущего инструмента. В процессе лезвийной обработки на инструмент интенсивное воздействие оказывают множество разнообразных факторов, таких как обрабатываемый материал, скорость резания, температурные условия, геометрия инструмента, электрофизические свойства и др. Определение степени влияния отдельных факторов на режущие свойства не представляется возможным без оценки работоспособности инструмента. Статья посвящена исследованию возможности использования величины электрического сопротивления твердосплавного инструмента с многослойным покрытием в качестве критерия оценки режущих свойств инструмента. Описана методика измерения величины электрического сопротивления твердосплавных пластин с покрытием. Сделан акцент на необходимости предварительной подготовки измеряемых образцов, что связано с низкой электропроводностью покрытий. Приведены факторы, влияющие на величину электрического сопротивления. Выяснено, что электрофизические свойства инструмента в целом определяются свойствами наименее электропроводного слоя покрытия. Проведен анализ корреляционной связи электрического сопротивления с величиной термоЭДС, в результате которого сделан вывод об отсутствии функциональной зависимости между величинами. Результаты исследования позволяют сделать вывод о невозможности использования величины электрического сопротивления твердосплавного инструмента с многослойным покрытием в качестве критерия оценки режущих свойств инструмента.

**Ключевые слова:** электрическое сопротивление, режущие свойства, термоЭДС, инструмент с покрытием

## THE ABILITY TO EVALUATE THE CUTTING PROPERTIES OF A COATED CARBIDE TOOL BASED ON ITS ELECTROPHYSICAL PROPERTIES

Kraynev D.V., Tikhonova Z.S., Rogachev A.V., Mednikov S.V.,  
Chigirinskaya N.V., Islamov A.M.

*Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: alexsandrogachev@ya.ru*

The efficiency of cutting processes in metalworking is closely related to the technological capabilities and reliability of the cutting tool. In the process of blade processing, the tool is intensively affected by a variety of factors such as the material being processed, cutting speed, temperature conditions, tool geometry, electrophysical properties, etc. Determining the degree of influence of individual factors on cutting properties is not possible without evaluating the performance of the tool. The article is devoted to the study of the possibility of using the value of the electrical resistance of a carbide tool with a multilayer coating as a criterion for evaluating the cutting properties of the tool. A method for measuring the electrical resistance of coated carbide plates is described. The emphasis is placed on the need for preliminary preparation of the measured samples, which is associated with the low electrical conductivity of the coatings. The factors influencing the value of electrical resistance are given. It was found out that the electrophysical properties of the instrument as a whole are determined by the properties of the least electrically conductive coating layer. The analysis of the correlation between the electrical resistance and the value of the thermal EMF is carried out, as a result of which it is concluded that there is no functional dependence between the values. The results of the study allow us to conclude that it is impossible to use the value of the electrical resistance of a carbide tool with a multilayer coating as a criterion for evaluating the cutting properties of the tool.

**Keywords:** electrical resistance, cutting properties, thermal EMF, coated tool

Эффективность процессов резания в металлообработке тесно связана с технологическими возможностями и надежностью режущего инструмента, так как именно инструмент является ключевым элементом в процессе обработки металла и его характеристики непосредственно влияют на производительность и качество изготавливаемых деталей. В процессе лезвийной обработки на инструмент интенсивное

воздействие оказывают множество разнообразных факторов, таких как обрабатываемый материал, скорость резания, температурные условия, геометрия инструмента, электрофизические свойства и др. [1]. В связи с этим определение степени влияния отдельных факторов на режущие свойства, а также установление аналитических и математических зависимостей с целью оптимального управления и обеспечения

наибольшей эффективности процесса лезвийной обработки, в том числе при разработке и внедрении новых инструментальных технологий и методов, не представляются возможными без оценки работоспособности инструмента.

Целью данного исследования является определение возможности оперативной оценки режущих свойств инструмента с покрытием по его электрофизическим свойствам.

**Материал и методика исследования**

В качестве основного инструментально-го материала при проведении экспериментальных исследований применялись твердосплавные инструменты марки Sandvik [2]. Были отобраны пластины WNMG080408 PM4225 группы применимости «Р». Пластины имеют покрытие, нанесенное методом CVD, включающее в себя слои Ti(CN)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN.

Для предварительной оценки режущих свойств инструментального материала выбран параметр термоЭДС в качестве управляемого фактора. Все пластины прошли предварительное тарирование по режущим свойствам по величине термоЭДС (табл. 1) на режимах пробного прохода при обработке стали 40X [3].

В рамках настоящего исследования величина термоЭДС пробного рабочего хода рассматривается в качестве эталонной меры для оценки существования корреляционной связи с электрофизическими свойствами серийно выпускаемого твердосплавного инструмента. Функциональная связь величины термоЭДС с режущей способностью твердосплавного инструмента была обоснована ранее [3].

Комплексные электрические свойства твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями в рамках настоящего исследования

оценивались по величине полного электрического сопротивления образца.

Измерения электрического сопротивления проводили при помощи «Измерителя иммитанса» модели «E7-25», позволяющего измерять величины электрического сопротивления в диапазоне 10<sup>-5</sup>...10<sup>9</sup> Ом. Измерение полного электрического сопротивления материалов с низкой электропроводностью невозможно при использовании точечных контактных щупов (рис. 1). С учетом больших величин удельного электрического сопротивления материалов, составляющих износостойкое покрытие, для измерения полного электрического сопротивления необходима подготовка исследуемых образцов (рис. 2). Для обеспечения надежности измерений контактные поверхности исследуемого образца покрываются слоем материала с высокой электропроводностью (серебро, медь). К сформированным таким способом проводящим поверхностям припаиваются контактные провода измерительного прибора.



Рис. 1. Общий вид контактных щупов для измерения электрического сопротивления проводящих материалов

Подготовленный образец (рис. 3) рассматривается как элемент электрической цепи, представляющий собой три последовательно соединенных резистора с удельными сопротивлениями и линейными размерами (толщинами) соответственно r<sub>0</sub> / h<sub>0</sub> и r / h.

$$r_{\Sigma} \cdot h_{\Sigma} = 2 \cdot r_0 \cdot h_0 + r \cdot h$$

**Таблица 1**

ТермоЭДС пластин WNMG080408 PM4225, сталь 40X

интервал	1,00 мВ = 3,06			стандартных отклонения											
наибольшее значение	5,9			мВ											
наименьшее значение	4,9			мВ											
среднее значение	5,25			мВ											
стандартное отклонение	0,33			мВ											
коэффициент вариации	0,06														
№ пластины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
термоЭДС, мВ	4,9	5,9	5,1	5,1	5,1	5,6	4,9	4,9	5,0	5,2	5,4	5,9	5,2	5,3	5,6
№ пластины	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
термоЭДС, мВ	5,9	5,2	5,4	5,4	5,3	5,4	4,9	5,1	5,1	4,9	4,9	5,1	5,0	5,9	5,0

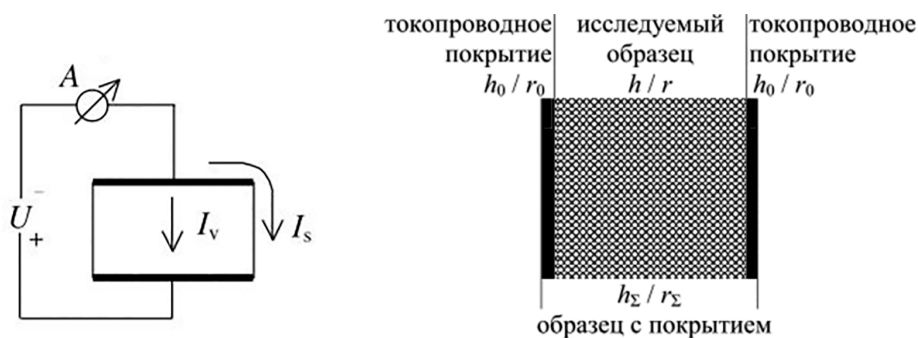


Рис. 2. Схема измерения полного электрического сопротивления материалов с низкой электропроводностью



Рис. 3. Общий вид образца с передней поверхностью, подготовленной для измерения полного электрического сопротивления

Поскольку толщина проводящего слоя ( $h_0$ ) и удельное сопротивление ( $r_0$ ) на контактных поверхностях исследуемого образца малы по сравнению с толщиной ( $h$ ) и удельным сопротивлением ( $r$ ) собственно образца, можно считать, что погрешность измерений, вносимая за счет токопроводящего покрытия, незначительна.

Информационная способность свойств инструментального материала в настоящем исследовании оценивается с точки зрения возможности оперативной диагностики состояния одного из элементов технологической системы, а именно режущего инструмента. Важнейшей эксплуатационной характеристикой режущего инструмента, определяемой его состоянием в каждый момент времени, является режущая способность [1]. Количественно режущую способность инструмента, как правило, оценивают по величине периода стойкости [1, 4] (долговечности), т.е. по продолжительности работы инструмента от начала процесса резания до наступления «катастрофического» износа.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что процесс резания, а следовательно, и процесс изнашивания режущего

инструмента, представляет собой комплекс элементарных физико-химических явлений, интенсивность которых может количественно оцениваться по величине тех или иных сигналов, генерируемых элементами технологической системы в результате изменения определенных свойств элементов системы. Ранее [4, 5, 6] было обосновано, что одним из возможных методов оценки работоспособности режущего инструмента может быть термоЭДС пробного рабочего хода.

Однако контактные процессы между рабочими поверхностями режущего инструмента, обработанной поверхностью заготовки и прирезцовою поверхностью стружки, а также деформационные процессы в зоне стружкообразования могут проявляться не только в виде непосредственных электрических сигналов (термоЭДС), но и через изменение определенных – теплофизических и электромагнитных – свойств материала режущего инструмента. В данном исследовании рассмотрена возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с многослойными износостойкими. Особый акцент делается на возможности оперативного оценивания режущих свойств инструмента в производственных условиях.

Таблица 2

Удельное электрическое сопротивление составляющих покрытия

Расположение слоя по отношению к матрице		Материал	Удельное сопротивление при 20°C, Ом*см*10 <sup>-6</sup>		Температурный коэффициент сопротивления
3	внешний	TiN	металлоид	21,7...25,0	0,016
2	промежуточный	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	диэлектрик	1*10 <sup>16</sup> ...1*10 <sup>17</sup>	-8,16*10 <sup>12</sup>
1	внутренний	Ti[CN]	металлоид	23,2...27,0	0,016
0	твердый сплав (матрица)		металлоид	9,7...15,0	0,004

Примечание: термин «металлоид» в данном контексте используется в значении: «вещество, не являющееся металлом, но близкое к металлам по физическим свойствам»

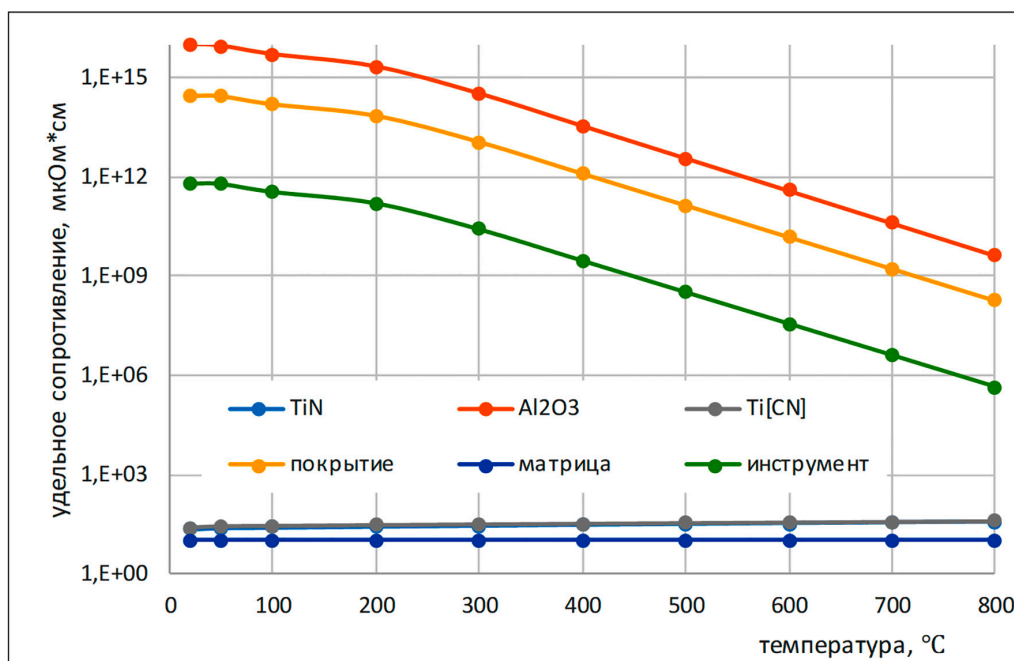


Рис. 4. Температурная зависимость электрического сопротивления

Полное электрическое сопротивление – величина, обратная электропроводности, – в настоящем исследовании рассматривается с точки зрения возможности оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с многослойными износостойкими покрытиями. Следует отметить, что электрофизические свойства (удельное сопротивление, удельная электропроводность) карбидов, нитридов, оксидов и карбонитридов, в частности, используемых при производстве твердосплавного инструмента, существенно зависят [7] от технологии их производства, химической чистоты источника исходного сырья, толщины слоев в покрытии, температуры и могут изменяться в пределах десятичного порядка (табл. 2), что весьма существенно влияет на величину эффективного удельного сопротивления инструмента в целом.

Температурная зависимость электрофизических свойств материалов, входящих в состав твердосплавного инструмента с многослойным CVD-покрытием, показана на рисунке 4. Из диаграммы видно, что удельное сопротивление твердосплавного инструмента определяется электрофизическими свойствами промежуточного слоя – оксида алюминия – материала, который при обычных условиях является диэлектриком ( $\rho = 1 \cdot 10^{16} \dots 1 \cdot 10^{17}$  мкОм\*см).

При повышении температуры до величин, соответствующих условиям получившейся или чистой лезвийной обработки, удельное сопротивление оксида алюминия снижается практически на 11 десятичных порядков, но в любом случае превышает удельное сопротивление металлоидов (прим. к табл. 2) более чем в  $10^5$  крат.

Таблица 3

Электрическое сопротивление серийно выпускаемого инструмента

интервал	19*10 <sup>6</sup> Ом = 2,98		стандартных отклонения												
среднее значение	10,37		10 <sup>6</sup> Ом												
стандартное отклонение	6,37		10 <sup>6</sup> Ом												
коэффициент вариации	0,61														
коэфф. корреляции с термоЭДС	0,10		корреляция отсутствует												
№ пластины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
термоЭДС, мВ	4,9	5,9	5,1	5,1	5,1	5,6	4,9	4,9	5,0	5,2	5,4	5,9	5,2	5,3	5,6
R*10 <sup>6</sup> , Ом	8	12	16	21	18	4	7	5	3	21	18	15	7	18	5
№ пластины	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
термоЭДС, мВ	5,9	5,2	5,4	5,4	5,3	5,4	4,9	5,1	5,1	4,9	4,9	5,1	5,0	5,9	5,0
R*10 <sup>6</sup> , Ом	3	5	8	8	15	22	3	5	5	11	8	4	21	12	3

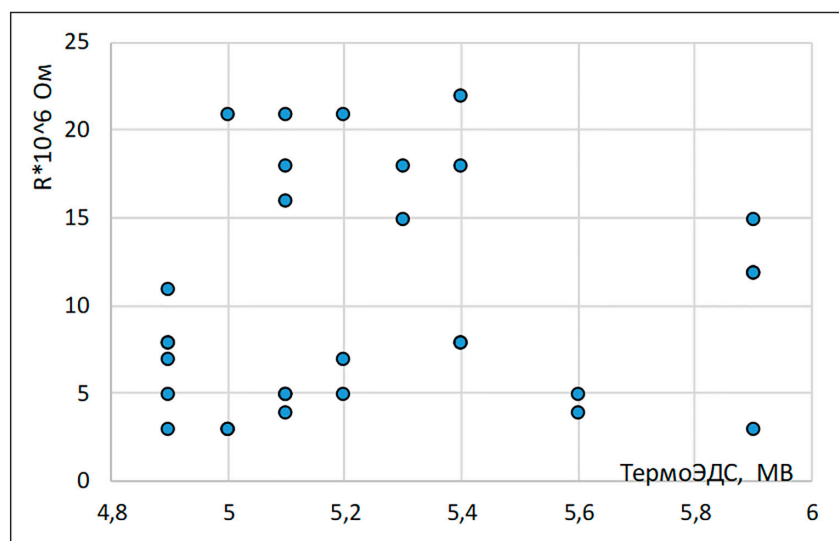


Рис. 5. Корреляционная связь между электрическим сопротивлением и термоЭДС пробного рабочего хода

Несмотря на то что оксид алюминия при высоких температурах ведет себя как токопроводящий материал, «эффективное» удельное сопротивление инструмента в целом несущественно зависит от электрофизических свойств материалов твердосплавной матрицы и материалов внешнего (TiN) и внутреннего (Ti[CN]) слоев износостойкого покрытия.

Экспериментальное исследование электрофизических свойств твердосплавного инструмента выполнено на партии из 30 твердосплавных пластин WNMG080408 PM4425. Результаты исследований представлены в таблице 3 и подтверждают предварительный вывод о неоднородности значений полного электрического сопротивления твердосплавной неперегретываемой пластины с многослойным износостойким покрытием.

Коэффициент вариации (оценка однородности данных [3, 8]) составил  $v = 0,61$ . В соответствии с известными критериями стабильности количественных оценок процессов, значение коэффициента вариации  $v \geq 0,33$  говорит о полной неоднородности изучаемого процесса. Измеренные значения сопротивления образуют статистическую выборку в диапазоне значений  $R \approx [3 \cdot 10^6 \dots 22 \cdot 10^6]$  Ом, т.е. предельные значения различаются более чем в семь раз. На рисунках 5, 6 показано графическое представление корреляционной связи полного электрического сопротивления с величиной термоЭДС. Результаты анализа говорят об отсутствии функциональной зависимости между электрофизическими свойствами твердосплавного инструмента и термоЭДС.



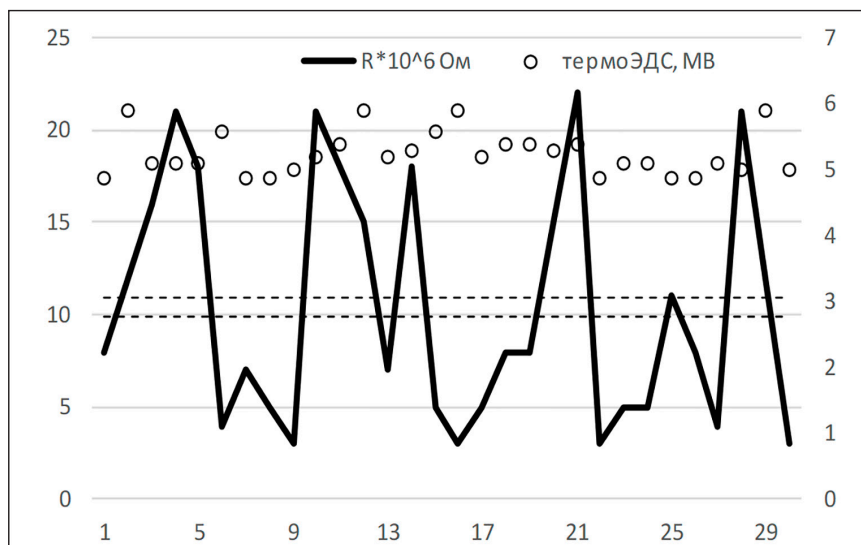


Рис. 6. Разброс значений электрического сопротивления в партии из 30 пластин серийно выпускаемого инструмента

Горизонтальными штриховыми линиями на рисунке 6 показан 10%-ный интервал величин сопротивления, определяемый погрешностью измерительного прибора.

Значение «эффективного» удельного электрического сопротивления многослойного материала определяется, преимущественно, электрофизическими свойствами слоя с максимальным электрическим сопротивлением и/или с максимальной толщиной. Учитывая, что различие в толщинах слоев твердосплавного инструмента с многослойным износостойким покрытием не превышает 1000 крат [9, 10], а различие в величине удельного сопротивления материалов может составлять до  $10^{14} \dots 10^{15}$  крат, следует заключить, что электрофизические свойства инструмента в целом определяются электрофизическими свойствами наименее электропроводного слоя (табл. 2).

### Заключение

В результате проведенных исследований сделан вывод о невозможности использования величины электрического сопротивления твердосплавного инструмента с многослойным CVD-покрытием в качестве критерия для оценки режущих свойств инструмента. Такой вывод обоснован результатами статистического анализа: электрическое сопротивление измерено на 30 предварительно тарированных по величине оценки режущей способности твердосплавных пластинах; значение коэффициента вариации для результатов исследуемой выборки составило  $v=0,61$ , что говорит о существенной неоднородности ( $v > 0,33$ ) и, следовательно, о низкой достоверности

результатов измерений; это, прежде всего, связано с существенной неоднородностью электрофизических свойств материалов, входящих в состав твердосплавного инструмента с многослойными износостойкими покрытиями. Количественная оценка корреляционной связи электрического сопротивления инструмента с известным критерием режущих свойств — термоЭДС пробного рабочего хода — составляет не более 10%, что говорит об отсутствии функциональной зависимости между электрофизическими свойствами твердосплавного инструмента и его режущей способностью (долговечностью).

Проведение прямых измерений электрического сопротивления материалов, по свойствам приближающихся к диэлектрикам ( $r_{\Sigma} \approx [10^5 \dots 10^{15}] \text{ Ом}$ ), требует специальной подготовки исследуемых образцов, сопряженной с напылением на контактные поверхности электропроводного материала и припайванием фольговых электродов. В результате твердосплавная пластина в дальнейшем не может использоваться по прямому функциональному назначению. Фактически, речь идет о «разрушающих» методах исследования. Следовательно, информация, полученная подобным образом, не может рассматриваться в качестве оперативной, реализуемой в «цеховых» условиях и непосредственно в процессе эксплуатации инструмента.

Существенное (до  $10^{11}$  крат) снижение электрического сопротивления оксида алюминия при повышении температуры до значений, характерных для процесса резания, объясняет возможность измерения сигнала

термоЭДС естественной термопары «инструмент – заготовка», значение которой рассматривается как оценка работоспособности инструмента.

#### Список литературы

1. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания и износа инструмента. Волгоград: ВолгПИ, 1988. 126 с.
2. Металлорежущий инструмент. Каталог. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/pages/tools.aspx> (дата обращения: 25.04.2024).
3. Определение рациональных условий эксплуатации твердосплавного инструмента с наноструктурированным поверхностным слоем рабочей части по критерию повышения долговечности при тчении конструкционных материалов различных групп: заключительный отчет о НИР № 101-01/2021 (26/365-21). Волгоград: ВолГТУ, ИМАШ РАН, 2021. 69 с.
4. Tikhonova Zh.S., Krainev D.V., Frolov E.M. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 1097-1105. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1\_117.
5. Плотников А.Л., Кристаль М.Г., Сергеев А.С., Тихонова Ж.С., Уварова Т.В. Устройство для измерения температуры реза естественной термопарой // Патент № 2650827 Российская Федерация, МПК G01K13/00, G01K7/02. ВолгГТУ. 2018. 7 с.
6. Плотников, А. Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе оперативной информации о свойствах инструмента и детали: дис. ... докт. тех. наук. Саратов, 2001. 314 с.
7. Самсонов Г.В. Нитриды. Киев: Наукова думка, 1969. 380 с.
8. Чигиринский Ю.Л. Обеспечение точности и качества поверхностей при многопереходной механической обработке на основе совершенствования информационных и математических средств проектирующей подсистемы САПР ТП: дис. ... докт. тех. наук. Саратов, 2014. 373 с.
9. Ингеманссон А.Р., Бондарев А.А. Определение теплопроводности твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019. Т. 21, № 3. С. 97-105.
10. Проничев Д.В., Гуревич Л.М., Трунов М.Д., Ястребов В.М. Исследование теплопроводности сваренного взрывом медно-алюминиевого композита // *Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015)*: сб. тр. VII междунар. науч.-практ. конф. (Кемерово, 23-25 сентября 2015 г.) / под ред. В.Ю. Блюменштейна. Кемерово, 2015. С. 413-417.