

5. Клепиков В.В., Черепакхин А.А. Влияние метода формообразования зубьев на форму припуска под зубоотделочные операции и их точность // Научные технологии в машиностроении. 2016. №3(57). С. 35–39.

6. Современные методы обработки зубчатых колес / А.С. Калашников, Ю.А. Моргунов, П.А. Калашников. М.: Изд-во Спектр, 2012. 239 с.

REFERENCES

1. Markov A.L. *Cog-wheel Measuring (Tolerances, Methods and means of Control)*. L: Mechanical Engineering, 1977. pp. 250.

2. SARS 1643–81. *Cylindrical Gearings. Tolerances. State Standard of the USSR*.

3. Vinogradov V.M., Cherepakhin A.A. Dependence of cylindrical cog-wheels upon accuracy of their basic parts and

asseblage // *Proceedings of MSTU “MAMI”*. № 1(19). 2014. Vol. 2. pp. 157–163.

4. On reasons of accuracy decrease in banded cog-wheels / A.N. Khorov, A.A. Cherepakhin // *Proceedings of the Inter. Scientific – Pract. Conf. “Quality Management” Mechanical Engineering University*. 2013, pp. 65–71.

5. Klepikov V.V., Cherepakhin A.A. Influence of teeth shaping upon allowance form for tooth finishing and teeth accuracy // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2016. №3(57). pp. 35–39.

6. *Modern Methods of Cog-Wheel Machining* / A.S. Kalashnikov, Yu.A. Morgunov, P.A. Kalashnikov. M.: Publishing House Spectrum, 2012. pp. 239.

Рецензент д.т.н. В.В. Клепиков

УДК 621.9.015
DOI: 10.12737/20137

А.Л. Плотников, д.т.н.,
А.С. Сергеев, к.т.н.,
Ж.С. Тихонова, магистрант
(Волгоградский государственный технический университет
Россия, 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)
E-mail: plotnikov.alexander1939@yandex.ru

Особенности использования сигнала ЭДС резания в условиях автоматизированного станочного производства

Представлен комплексный подход к оценке влияния геометрических параметров режущего инструмента и технологических факторов производства на величину сигнала термоЭДС естественной термопары «инструмент – деталь». Экспериментально установлено влияние состояния износостойкого покрытия на сигнал термоЭДС.

Ключевые слова: термоЭДС; режущий инструмент; стойкость; фаска износа; режимы резания.

A.L. Plotnikov, D.Eng.,
A.S. Sergeyev, Can.Eng.,
J.S. Tikhonova, Undergraduate
(Volgograd State Technical University 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005, Russia)

Peculiarities in use of cutting- electromotive force signal under conditions of computer-aided machine manufacturing

In the paper there is considered a problem of properties heterogeneity in a terminal pair under conditions of computer-aided manufacturing. It is emphasized that this circumstance results in decrease of stability and quality of machining on the whole. The existence of tolerances for the content of chemical elements in steel is caused by a complexity in control of metallurgical processes.

It is offered to use a parameter of thermo-electromotive force of a terminal pair “tool-blank” obtained in strictly definite modes of a calibrating cut for the further definition and optimization of cutting modes for machining. Drawbacks and possible variants for their solution at the realization of a method to measure cutting-electromotive force under production conditions are emphasized. A complex approach to the assessment of the influence of cutter geometrical parameters and technological factors of production upon the value of a thermo-electromotive force signal of a natural thermocouple “tool-part” is presented. It is established experimentally the influence of the antiwear coating state upon a thermo-electromotive force signal.

Keywords: thermo-electromotive force; cutter; durability; wear flat face; cutting modes.

Технологические особенности металлургического производства предполагают наличие неизбежного разброса физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, что подтверждается наличием ГОСТ на показатели механических свойств и процентное содержание химических элементов готовой продукции инструментальных заводов и металлургических комбинатов. Как показывает практика, разброс режущих свойств твердосплавных пластин и обрабатываемости сталей может носить случайный характер и подчиняться различным законам распределения (рис. 1). При этом возникают ситуации, при которых заготовка из партии поставки, обладающая худшей обрабатываемостью (σ_{Bmax}), сочетается с твердым сплавом, обладающим низкими режущими свойствами (минимальный коэффициент износа инструмента $K_{Иmin}$). На рис. 1 – это сочетание зон 4 – 5 и, наоборот, на рис. 1, это сочетание зон 1 – 8 [1].

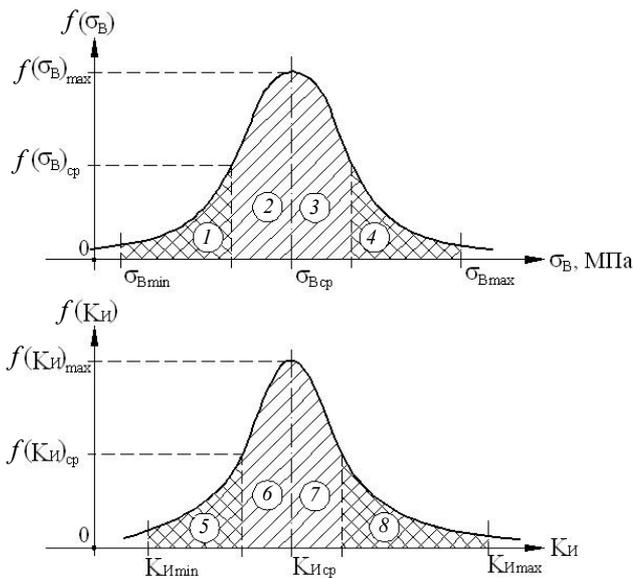


Рис. 1. Плотности распределения механических свойств обрабатываемых сталей $f(\sigma_B)$ и режущих свойств инструмента $f(K_{И})$

Но если во втором случае (сочетание зон 1 – 8) речь идет о недоиспользовании ресурса инструментального материала, то первая ситуация (сочетание зон 4 – 5) грозит простоем оборудования по причине преждевременного выхода из строя инструментальной оснастки. В.К. Старков, в своих исследованиях [2], отмечает, что колебания физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов может приводить к разбросу стойкости инструмента в четыре и более раз

при обработке на постоянных режимах резания.

Такая неоднородность свойств контактной пары в условиях автоматизированного производства приводит к снижению стабильности и качества механической обработки в целом. Наличие допусков на содержание химических элементов в сталях обусловлено сложностью управления металлургическими процессами.

На рис. 2 представлен график плотности распределения содержания углерода, по данным химического анализа партий сталь 45, представленных в работе [3]. В соответствии ГОСТ 454 –71 все партии сталь 45 соответствуют установленным нормативам и допускам по содержанию углерода С.

По данным А.П. Гуляева [4] изменение содержания углерода в стали, хотя бы на 0,1 %, может привести к 20 %-ному изменению ее прочности и твердости. Этот случай показан на рис. 2.

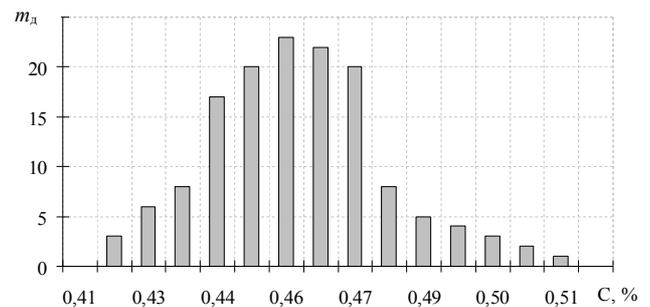


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения углерода в партии сталь 45 [4]

Сменные многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластины получили широкое распространение на основных машинных операциях, показав свою эффективность. Однако неоднородность физико-механических характеристик твердых сплавов также приводит к нестабильности их режущих свойств. Основу любого твердого сплава составляет связующая фаза. Связующая фаза представляет собой раствор вольфрама W и углерода С в кобальте Со, концентрация этого раствора зависит от условий изготовления сплава. Углерод играет немалую роль при формировании физико-механических свойств твердых сплавов.

Как отмечается в работе [3], на концентрацию вольфрама в кобальтовой фазе значительное влияние оказывает углеродная среда. Избыток углерода приводит к снижению концентрации тугоплавких металлов в кобальтовой фазе и наоборот. На растворимость

вольфрама также влияет способ охлаждения твердого сплава. Колебания состава связующей фазы твердого сплава существенно влияют на его предел прочности при изгибе σ_i . Состав связующей фазы предопределяет прочностные свойства твердого сплава, а вместе с тем и режущие свойства твердосплавного инструмента.

Технологическая особенность металлургического производства приводит к неоднородной концентрации углерода С и других элементов как в обрабатываемом, так и в инструментальном материалах, определяя их механические и теплофизические свойства. Возникает ситуация когда механические характеристики и химический состав изготавливаемых сталей и сплавов укладываются в установленные ГОСТ допуски, но, вместе с тем, различные сочетания контактных пар «инструмент – заготовка» влияют на контактно-деформационные процессы в зоне резания, определяя надежность и качество обработки.

Основы физики твердого тела позволяют найти взаимосвязь химических и физических свойств материалов с их тепловыми и термоэлектрическими свойствами.

Около 200 лет назад Т. Зеебека установил, что при наличии разности температур в двух разнородных проводниках, возникает термоэлектродвижущая сила E (термоЭДС). Физическая природа возникновения сигнала термоЭДС, характеризуется наличием объемной, фоновой и контактной составляющих.

Вольфрам растворяется в кобальте за счет механизма замещения, и его атомный радиус (1,4 Å) больше чем атомный радиус кобальта (1,25 Å). Вольфрам увеличивает период решетки кобальтовой связки. Процент растворенного вольфрама определяет период решетки связующей фазы и его повышение, обуславливает повышение работы выхода электронов из твердого сплава. Чем выше работа выхода электронов из твердого сплава, тем меньше значение термоЭДС, и наоборот.

Наличие в химическом составе карбидов других тугоплавких металлов (TiC, TaC) будет способствовать увеличению работы выхода электронов из твердого сплава, за счет такого же принципа замещения, как и в случае с вольфрамкобальтовой группой твердых сплавов. При этом соотношения карбидообразующих элементов в твердом сплаве будет также определять работу выхода электронов из твердого сплава, и она будет тем больше, чем выше концентрация карбидных составляющих в сплаве.

Таким образом, параметр термоЭДС характеризует работу выхода электронов из твердого сплава, и чем выше работа выхода, тем меньше значение термоЭДС. Работа выхода электронов напрямую зависит от состава и концентрации связующей фазы, данный параметр четко реагирует на любые изменения в соотношении карбидной и кобальтовой составляющих в твердых сплавах [3].

Установлено, что концентрация углерода в сталях напрямую влияет на ее обрабатываемость. Увеличение содержания углерода ведет к снижению теплопроводности и ухудшению обрабатываемости сталей. Углерод влияет на концентрацию твердых растворов углерода в железе, а также на концентрацию карбида железа (цементит) в сталях и определяет работу выхода электронов из стали.

Многочисленными наблюдениями отмечено, что в процессе лезвийной обработки заготовки инструментальным материалом, возникает термоэлектродвижущая сила E (термоЭДС), генерируемая естественной термопарой «инструмент – заготовка». Позднее было предложено [5, 6] в металлообработке использовать параметр термоЭДС E контактной пары «инструмент – заготовка», полученный на строго определенных режимах пробного прохода, одинаковых для всех групп обрабатываемых и инструментальных материалов, как диагностический параметр для оценки физико-механических свойств различных сочетаний контактных пар «инструмент – заготовка» для последующего назначения и оптимизации режимов резания под обработку этой же заготовки данным инструментом.

На рис. 3, в качестве примера, представлена гистограмма распределения параметра термоЭДС E , полученная экспериментальным путем в режиме пробного прохода партий твердых сплавов, при обработке на токарном станке мод. 1К62 заготовки из углеродистой стали 45 [2]. Пробный проход – это непродолжительный контакт обрабатываемой заготовки инструментом (как правило, 3...5 с) в процессе лезвийной обработки на строго фиксированных режимах резания.

При лезвийной обработке сталей выше зоны наростообразования на режимах предварительного пробного прохода ($v = 100$ м/мин, $t = 1$ мм, $S = 0,1$ мм/об) образуется устойчивая адгезионная связь, что обеспечивает стабильность сигнала по амплитуде при измерении параметра термоЭДС контактной пары «инструмент – заготовка» [2].

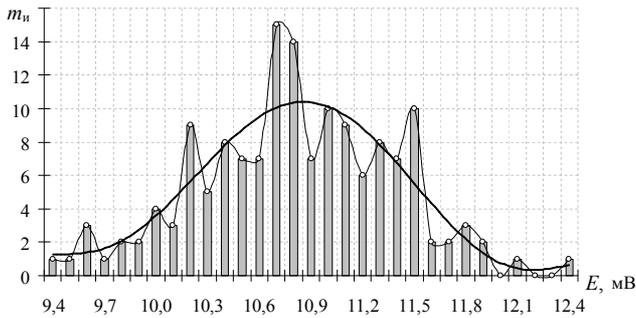


Рис. 3. Разброс значений параметра термоЭДС четырехгранных пластин партии твердого сплава Т15К6 (150 шт.) при обработке стали 45

При этом установлено [3], что значение параметра термоЭДС, следует фиксировать по пиковому значению в течении 3...5 секунд с момента врезания режущего клина инструмента в поверхностный слой обрабатываемой заготовки, что реализуется за счет применения специального аппаратного решения (например, пик-детекторов [6]).

Рис. 3 показывает эффективность использования параметра термоЭДС E для диагностики режущих свойств твердосплавного инструмента из партий поставки твердосплавного инструмента заводом изготовителем.

К недостаткам применения сигнала термоЭДС контактной пары «инструмент – заготовка» можно отнести следующие:

1. Появление паразитной термоЭДС, возникающей при нагреве контактной зоны инструмента в процессе пробного прохода. Однако исследованиями [3] установлено, что при осуществлении пробного прохода в течении времени не превышающего 5 с величина паразитной термоЭДС составляет около 4,5 % от величины полезного сигнала, что является в целом приемлемым результатом, а применение специальных технических средств (пик-детекторы) позволяют и вовсе решить указанную проблему.

2. Необходимость электроизоляции инструмента и стальной заготовки в процессе измерения сигнала термоЭДС контактной пары. Проблема изоляции инструмента (при обработке на токарных станках) или заготовки (при обработке на фрезерных станках) решается за счет применения изолирующих материалов или специальных изолирующих приспособлений, а также естественной смазки шпиндельных групп станков.

3. Зависимость переходного сопротивления от усилия поджатия контактов токосъемников, установленных на шпиндельных узлах стан-

ков. В табл. 1 приведены данные, отражающие зависимость сигнала термоЭДС E контактной пары при токарной обработке стали 45 пластинами из твердого сплава (Т15К6, ТТ7К12, Т5К10) в режиме пробного прохода от усилия F поджатия контактов токосъемников. Из табл. 1 видно, что оптимальным является сила поджатия контактов $F = 15$ Н, обеспечивающего стабильное значение сигнала термоЭДС E .

Следует отметить, что такая зависимость присутствует, однако последние образцы приборостроительной техники позволяют достаточно легко решить данную проблему.

В общем случае характер температурных процессов, происходящих в зоне резания, определяется технологическими режимами обработки, геометрией режущего инструмента (задний угол резца α ; главный угол в плане ϕ ; вспомогательный угол в плане ϕ_1 ; передний угол резца γ , радиус при вершине резца r), влиянием СОТС и физико-механическими свойствами заготовки и инструмента.

Площадь сечения срезаемого слоя определяет соотношение сил резания в зоне контактного взаимодействия, а, следовательно, и температур в зоне резания. Изменение температуры в зоне резания, определяет характер изменения объемной составляющей термоЭДС естественной термодомы «инструмент – заготовка» в процессе пробного прохода.

1. Влияние силы F поджатия контактов токосъемников на величину сигнала термоЭДС E при обработке соответствующим твердосплавным инструментом

Сила прижима контакта F , Н	Величина термоЭДС контактной пары E , мВ		
	сплав Т15К6	сплав ТТ7К12	сплав Т5К10
5,0	9,2	11,0	12,9
10,0	9,4	11,3	13,4
15,0	9,7	11,4	13,4
20,0	9,7	11,3	13,4
25,0	9,7	11,4	13,4

На рис. 4 представлены геометрические параметры режущего инструмента.

Следует отметить, что на интенсивность тепловыделения в большей степени влияет передний угол инструмента и радиус при вершине резца, а также величина фаски износа по задней грани инструмента. Влияние же главного ϕ и вспомогательного ϕ_1 углов впла-

не в условиях чистовой и получистовой обработки считается незначительным [2].

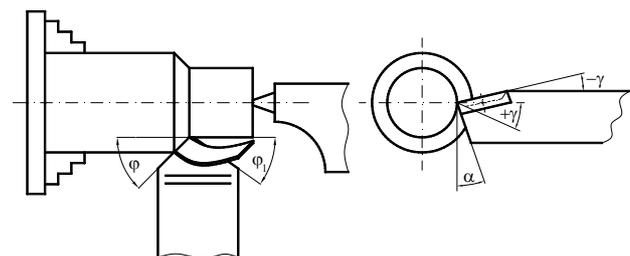


Рис. 4. Геометрические параметры режущего инструмента

В табл. 2 показано влияние изменения главного ϕ и вспомогательного ϕ_1 углов в плане на показатель термоЭДС E контактной пары «инструмент – заготовка» в условиях пробного прохода на токарной операции. В качестве инструмента применялась пятигранная твердосплавная пластина по ГОСТ 19065–80 марки ТТ7К12 с геометрическими показателями углов: $\phi = 60^\circ$, $\phi_1 = 12^\circ$, $\gamma = -4^\circ$, радиус при вершине резца: $r = 0,5$ мм. Точению подвергалась заготовка из стали 45.

Как видно, из табл. 2, изменение углов в плане оказывает незначительное влияние на параметр термоЭДС пробного прохода E .

2. Влияние углов в плане на параметр термоЭДС и показатели шероховатости при токарной обработке

Углы в плане		ТермоЭДС	Шероховатость поверхности	Углы в плане		ТермоЭДС	Шероховатость поверхности
$\phi,^\circ$	$\phi_1,^\circ$	$E, мВ$	$Ra, мкм$	$\phi,^\circ$	$\phi_1,^\circ$	$E, мВ$	$Ra, мкм$
48	12	12,0	3,1	67	24	12,0	3,7
52	12	12,1	3,4	67	20	12,1	3,6
56	12	12,2	3,5	67	16	12,1	3,4
60	12	12,0	3,4	67	12	12,0	3,4
64	12	12,1	3,4	67	8	12,1	3,3
68	12	12,2	3,5	67	4	12,2	3,3
72	12	12,7	3,5	67	1	12,4	3,1

Передний угол в большей степени оказывает влияние на показатель термоЭДС пробного прохода E . В табл. 3 приведены показатели термоЭДС пробного прохода контактных пар твердого сплава различной марки с обрабатываемой заготовкой (сталь 40Х) при изменении переднего угла в диапазоне $\gamma = -7 \dots +13^\circ$.

3. Влияние переднего угла на параметр термоЭДС и показатели шероховатости при токарной обработке

Марка режущей пластины	Передний угол $\gamma,^\circ$	ТермоЭДС $E, мВ$	Параметр шероховатости $Ra, мкм$
BK8	-7	16,2	4,3
	+13	15,5	3,8
T5K10	-7	19,2	4,4
	+13	18,3	3,9
T15K6	-7	13,2	3,8
	+13	12,6	3,4
TT7K12	-7	12,9	3,6
	+13	11,7	3,3

Изменение переднего угла γ каждой твердосплавной пластины достигалось за счет ее переворота на 180° в оправке токарного резца (рис. 5). Экспериментальные исследования показали, что в условиях пробного прохода

изменение переднего угла γ инструмента в диапазоне 20° может привести к изменению параметра термоЭДС более чем на 1 мВ и изменению показателя шероховатости до 12 %.

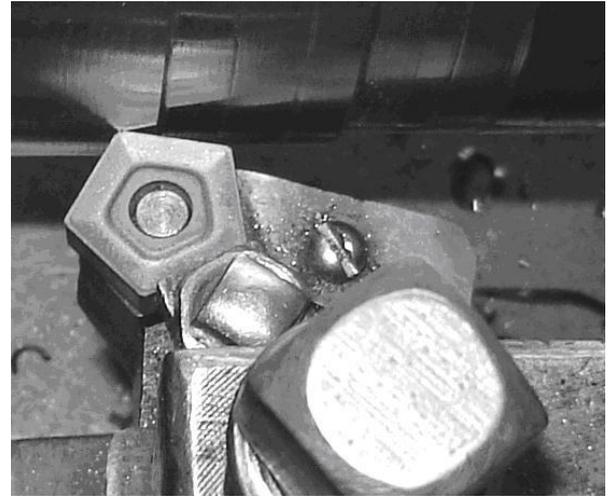
На рис. 6 показано влияние фаски износа

твердосплавной пластины по задней грани h_3 на параметр термоЭДС контактной пары «инструмент – заготовка» при обработке стали

40Х пятигранной твердосплавной пластиной ТТ7К12.



$\gamma = -7^\circ$



$\gamma = +13^\circ$

Рис. 5. Изменение переднего угла твердосплавной пластины марки Т15К6

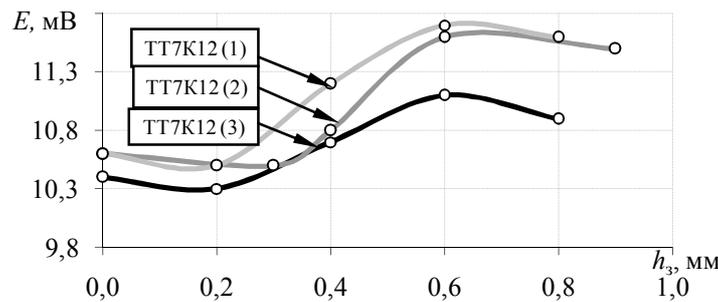


Рис. 6. Влияние фаски износа на параметр термоЭДС

Из рис. 6 видно, что при изменении фаски износа инструмента в диапазоне $h_3 = 0 \dots 0,4$ мм, параметр термоЭДС изменяется незначительно, однако с увеличением фаски износа ($h_3 > 0,4$ мм) термоЭДС увеличивается. Данный эффект связан с увеличением объемной составляющей $\alpha_{об}$ сигнала термоЭДС при увеличении контактной площади инструмента с заготовкой за счет изменения температуры в зоне контактного взаимодействия.

Увеличение радиуса при вершине резца r также способствует увеличению сигнала термоЭДС. Эксперименты показали, что увеличение радиуса при вершине резца на 1 мм (с 1 до 2 мм) при обработке стали 45 твердым сплавом Т15К6 приводит к увеличению параметра термоЭДС на 1,1 мВ.

Определенное влияние на параметр термоЭДС пробного прохода при обработке твердосплавным инструментом оказывает применение защитных износостойких покрытий. В

табл. 4 представлены значения параметра термоЭДС E и шероховатости поверхности Ra при обработке стали 45 на токарной операции в режиме пробного прохода твердосплавными пластинами с износостойкими покрытиями и без покрытий.

4. Показатели термоЭДС E и параметра шероховатости Ra на пробном проходе при точении

Показатели	Марка твердого сплава					
	ТН20	Т15К6	Т5К10	ВК8	GC4225	NC3030
	покрытие					
	TiN	TiN	TiN	TiN	TiCN	TiCN
E , мВ	5,3	10,1	12,4	14,6	11,9	13,7
Ra , мкм	2,3	3,1	3,3	3,3	3,1	3,7
	без покрытия					
E , мВ	6,2	11,2	13,6	15,3	11,2	13,1
Ra , мкм	2,5	3,4	3,7	3,9	3,4	3,6

В первую очередь измерялся сигнал термоЭДС пластины с покрытием, а затем данная пластина подвергалась обработке на универсально-заточном станке мод. 3В642 с целью удаления покрытия на режущей части пластины, после чего этой же пластиной производилась повторная обработка в режиме пробного прохода с фиксированием сигнала термоЭДС E твердосплавной пластины без покрытия.

Выводы

1. Анализ причин неоднородности физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов показал, что в связи с особенностями металлургического производства обрабатываемого и инструментального материалов существует разброс их механических свойств и его необходимо учитывать при проектировании технологического процесса.

2. Использование в качестве диагностического параметра сигнала естественной термопары «инструмент – заготовка» позволяет получать оперативную информацию о фазовом составе, а также о теплофизических свойствах контактной пары в режиме пробного прохода.

3. Информативная способность сигнала термоЭДС может быть использована для разработки математического и программного обеспечения при решении задач оценки состояния инструментального обеспечения и управления качеством лезвийной обработки сталей в условиях автоматизированного производства.

4. Показана возможность применения сигнала термоЭДС для оценки механических и теплофизических свойств контактной пары «инструмент – заготовка» при использовании твердосплавного инструмента с износостойким защитным покрытием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Повышение** надёжности управления шероховатостью обработанной поверхности деталей в САПР ТП токарных и фрезерных операций: монография / А.Л. Плотников, А.С. Сергеев, Н.Г. Зайцева; науч. ред. А.П. Бабичев; ВолгГТУ, Волгоград; Ирбит; Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2015. 162 с.

2. **Старков В.К.** Физика и оптимизация резания материалов: учебник. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.

3. **Епифанов Г.И.** Физика твердого тела: учеб. пособие. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1977. 288 с.

4. **Гуляев А.П.** Металловедение: учебник. 5-е изд. перераб. М.: Металлургия, 1977. 648 с.

5. **А.с. № 1009609 СССР**, МПК В23 В1 / 00. Способ определения режущих свойств твердосплавных инструментов / А. Л. Плотников, Е.В. Дудкин, М.Е. Дудкин. Волгоградский политехнический институт. 1983, Бюл. №13.

6. **Пат. 2117557 РФ**, МПК В23 В25 / 06. Способ измерения величины термоЭДС естественной термопары «инструмент–деталь» / А.Л. Плотников; Волгоградский государственный технический университет. 1998.

REFERENCES

1. *Reliability Increase in Roughness Control of Machined Surfaces of Parts in CAD TP of Turning and Milling*: Monograph / A.L. Plotnikov, A.S. Sergeyev, N.G. Zatseva; scientific ed. A.P. Babichev; VolgaSTU, Volgograd; Irbit; Toliyatti: "ONIKS", 2015. pp. 162.

2. Starkov V.K. *Physics and Optimization of Material Cutting*: Textbook. M.: Mechanical Engineering, 2009. pp. 640.

3. Yepifanov G.I. *Solid-State Physics*: Manual. 2d Ed. revised and supplemented M.: Higher School, 1977. pp. 288.

4. Gulyayev A.P. *Metal Science*: Textbook. 5th ed. revised. M.: Metallurgy, 1977. pp. 648.

5. A.C. № 1009609 USSR, IPC B23 B1 / 00. *Method for Cutting Properties Definition in Hard-Alloy Tools* / A. L. Plotnikov, E.V. Dudkin, M.E. Dudkin. Volgograd Polytechnic Institute. 1983, Bull. №13.

6. Pat. 2117557 RF, IPC B23 B25 / 06. *Method for Measuring of Thermo-Electromotive Force Value in Natural Thermocouple "Tool-Steel"* / A.L. Plotnikov; Volgograd State Technical University. 1998.

Рецензент д.т.н. Д.И. Петрешин

