

ence Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2017. – No.10 (76). – pp. 9-17.

6. Nosenko, V.A. Corundum surface morphology after titanium alloy micro-scratching / Nosenko V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V. et al. // *Mechanical Engineering: network electronic scientific journal*. – 2014. – Vol.2. – No.3. – pp. 66-71.

7. Xinxin Xi. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasives wheels: tool surface topology effect on grinding force and ground surface quality / Xinxin Xi, Tianyu Yu, Wenfeng Ding, Jihua Xu // *Precision Engineering*. – 2018. – Vol. 53. – Pp. 134-145.

8. Reference Book of Technologist / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: *Innovation Mechanical Engineering*. – 2019. – pp. 800.

9. Nosenko, V.A. Abrasive tool updating on bakelite tie // *Problems of Mechanical Engineering and Machinery Reliability*. – 2004. – No.3. – pp. 85-90.

10. Nosenko S.V. The Effect of the Operating Speed and Wheel Characteristics on the Surface Quality at Creep-Feed Grinding Titanium Alloys / S.V. Nosenko, V.A. Nosenko, A.A. Koryazhkin // *Solid State Phenomena*. – 2018. – T. 284 SSP. – Pp. 369-374.

11. Nosenko V.A. Morphology and Chemical Composition of Silicon Carbide Surfaces Interacting with Iron, Cobalt and Nickel in Microscratching / V.A. Nosenko, A.V. Fetisov, V.Y. Puzyrkova // *Solid State Phenomena*. – 2018. – T. 284 SSP. – Pp. 363-368.

12. Nosenko, V.A., Belukhin, R.A., Fetisov, A.V., Morozova, L.K. Test complex based on NC precision profile-grinding machine CHEVALIER SMART-B 1224 III model // *Bulletin of Volgograd State Technical University*. – 2016. – No.5 (184). – pp. 35-39.

Рецензент д.т.н. С.М. Братан

УДК 621.7

DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-28-35

А.Р. Ингеманссон, к.т.н.

(«Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»
400071, г. Волгоград, пр. Ленина, б/н),

А.А. Бондарев, к.т.н.

(«Волгоградский государственный технический университет» 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28)
E-mail: aleing@yandex.ru

Расчетная методика определения теплопроводности современных твердосплавных инструментов с многослойными покрытиями

Предложен подход к решению актуальной научно-практической задачи определения теплофизических свойств современных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями с целью разработки надежных математических моделей для технологической подготовки производства и управления выходными параметрами процесса резания. На основе проведенного анализа и расчетов получены значения коэффициентов теплопроводности для режущих инструментов с многослойными покрытиями, наиболее широко применяемых в производственной практике.

Ключевые слова: твердосплавный инструмент; многослойные покрытия; теплопроводность; математические модели; цифровые производственные системы.

A.R. Ingemansson, Can.Sc.Tech.

(“Federal Scientific-Production Center “Titanium-Barricades”, b/n, Lenin Avenue, Volgograd, 400071)

A.A. Bondarev, Can.Sc.Tech.

(“Volgograd State Technical University”, 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005)

Calculation method for thermal conduction definition of modern hard-alloy tools with multilayer coatings

An approach is offered to solve an urgent scientific-practical problem for the definition of thermal-physical properties of modern hard-alloy tools with wear-resistant coatings with the aim to develop reliable simulators for technological pre-production and to control output parameters of a cutting process. On the basis of the analysis carried out computations there are obtained values of heat conductivity factors for cutters with multilayer coatings used most widely in production.

Keywords: hard-alloy tool; multilayer coatings; thermal conduction; simulators; digital production systems.

Физические особенности протекания процессов стружкообразования и контактного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов в значительной степени определяют выходные параметры процесса резания, в частности качество обработанной поверхности. В свою очередь процессы стружкообразования и контактного взаимодействия зависят от теплофизических свойств контактной пары. В частности, изменение соотношения теплопроводностей обрабатываемого и инструментального материалов способствует существованию различных видов контактного взаимодействия по передней и задней поверхностям режущего инструмента [1]. Смена инструментов по параметру теплопроводности при неизменности обрабатываемого материала приводит к получению различного качества обработанной поверхности, в частности по параметру шероховатости.

Адаптивное управление процессом резания для современного автоматизированного оборудования с ЧПУ позволяет обеспечивать надежность выходных параметров обработки. Разработка математических моделей для управления процессом резания, учитывающих теплопроводность инструментального материала, является необходимым условием реализации возможностей адаптивного управления современным оборудованием в цифровых производственных системах (ЦПС) для механической обработки. Кроме этого, указанные математические модели необходимы для нужд технологического проектирования при подготовке производства.

На сегодняшний день твердые сплавы являются основным инструментальным материалом для лезвийной обработки углеродистых, легированных и коррозионностойких сталей. В литературе достаточно информации о значениях коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·К) отечественных непокрытых твердых сплавов [1]. Кроме этого, некоторые иностранные производители указывают значения коэффициента теплопроводности для некоторых непокрытых твердых сплавов в каталогах [2]. При этом основной объем современного твердосплавного инструмента выпускается с износостойкими покрытиями.

Однако на сегодняшний день отсутствует комплекс информации о теплопроводности инструментов с многослойными покрытиями для обработки различных материалов, для различных условий обработки и способов нанесения покрытия. Данная проблема является ограничивающим фактором при разра-

ботке надежных математических моделей для технологической подготовки производства и управления выходными параметрами процесса резания. В связи с этим анализ теплофизических свойств современных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями и выдача практических рекомендаций является актуальной научно-практической задачей.

В связи с указанным, в рамках исследования по разработке элементов ЦПС для механообрабатывающего производства, необходимо решение задачи, заключающейся в определении величин теплопроводности современных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями для последующего использования при построении математических моделей, связывающих режимы и условия обработки с действующими силами резания и выходным параметром обработки – шероховатостью обработанной поверхности.

Для решения указанной задачи необходимо выполнить следующие исследования. Во-первых, выполнить анализ наиболее широко применяемых в производственной практике и серийно выпускаемых многослойных износостойких покрытий на твердосплавный режущий инструмент в зависимости от способов нанесения покрытия, видов и условий операций механической обработки и обрабатываемых материалов. Во-вторых, выполнить расчет коэффициентов теплопроводности современных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями.

В первую очередь выполнено изучение и систематизация информации о химическом составе и конструкциях многослойных покрытий, исходя из способа нанесения покрытия, режимов и условий механической обработки и обрабатываемых материалов. Для анализа использовались работы отечественных и зарубежных исследователей [1, 3, 4 – 7], а также справочная информация от ведущих мировых производителей лезвийного инструмента, в т.ч. компаний Korloy (Ю. Корея) [2], Sandvik Coromant (Швеция) [8, 9], Widia (Германия) [10] и др.

В качестве основы для современных режущих пластин с износостойкими покрытиями в основном используются вольфрам-кобальтовые, вольфрам-титано-кобальтовые и вольфрам-титано-тантало-кобальтовые твердые сплавы. Процентное содержание карбидов и связки определяется условиями механической обработки, с увеличением прочности на изгиб за счет увеличения содержания кобальта для предварительных операций.

В настоящей работе, исходя из анализа данных по процентному содержанию химических соединений в описанных современных твердых сплавах [1, 5, 8, 9, 10], для последующих расчетов теплопроводности сменных многогранных пластин (СМП) с износостойкими покрытиями установлены и приняты значения теплопроводности λ твердосплавной основы в зависимости от группы обрабатываемого материала и вида обработки, которые приведены в табл. 1.

1. Теплопроводность твердосплавной основы в зависимости от группы обрабатываемого материала и вида обработки

Группа обрабатываемого материала и вид обработки по ISO	P01-P05	P10-P20	P25-P40	M05-M20	M25-M35
Теплопроводность твердосплавной основы λ , Вт/(м·К)	23	27	41	50	52

Покрытия наносятся способами физического осаждения из паровой фазы (physical vapor deposition, PVD) и химического осаждения из паровой фазы (chemical vapor deposition, CVD). Покрытия, нанесенные химическим осаждением, отличаются большей износостойкостью, при этом покрытия, нанесенные физическим осаждением, отличаются большей прочностью и меньшей толщиной, что определяет остроту режущих кромок. Это особенно важно для прецизионной и мелкоразмерной обработки.

Толщина PVD-покрытий варьируется в диапазоне 2...6 мкм, толщина CVD-покрытий – 4...20 мкм. В качестве обрабатываемых материалов рассмотрены конструкционные углеродистые и легированные стали – группа P согласно международному стандарту ISO и коррозионностойкие – группа M. В табл. 2 приведены сведения, полученные в результате анализа, информации о наиболее часто используемых структурах покрытий для групп обрабатываемых материалов, способах нанесения покрытия, условий обработки согласно ISO и соответствующих толщинах покрытий. Наиболее широко применяемыми в производственной практике и серийно выпускаемыми многослойными покрытиями являются следующие. Для CVD-покрытий комбинация: твердосплавная основа – TiCN-Al₂O₃-TiN (рис. 1, а). Для PVD-покрытий комбинация: твердосплавная основа – TiAlN-TiN (рис. 1, б).

Из табл. 2 видно, что по мере перехода от

предварительных, нагруженных операций механической обработки (вид обработки согласно ISO «35», «25») к чистовым (вид обработки «05») толщина покрытия увеличивается с целью противодействия диффузионному изнашиванию на высоких скоростях резания и, тем самым, повышению износостойкости пластины. Кроме этого, для обработки коррозионно-стойких сталей (группа M) применяются CVD-покрытия меньшей толщины, чем для обработки конструкционных углеродистых и легированных сталей (группа P).

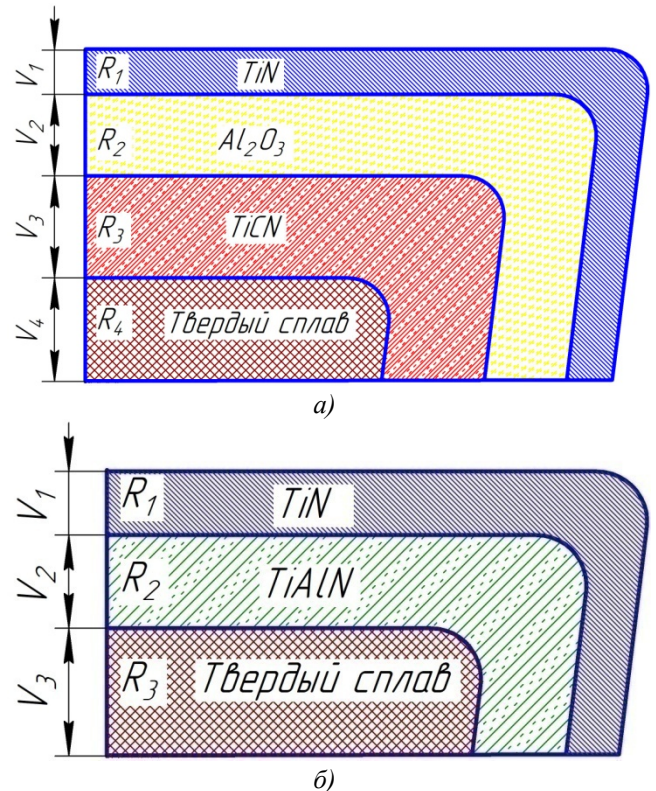


Рис. 1. Схема режущего инструмента с многослойным покрытием, нанесенным CVD-способом (а) и PVD-способом (б)

Для последующих расчетов теплопроводности инструментов с многослойными покрытиями были проанализированы сведения об объемной доле каждого слоя относительно общей толщины покрытия. Анализ показал, что для задач расчета теплопроводности инструментов с многослойными покрытиями с достаточной точностью следует принять следующие соотношения. Объемное отношение слоев для CVD-покрытий: TiCN – 50%; Al₂O₃ – 40%; TiN – 10%; для PVD-покрытий: TiAlN – 70%; TiN – 30%.

В работе [6] для задачи построения математической модели при определении длины контакта между инструментом и стружкой применено понятие, так называемой «эффектив-

ной теплопроводности режущего инструмента». Для построения модели использована схема резания, представляющая собой по сути условную схему резания. Понятие эффективной теплопроводности подразумевает под собой интегральную характеристику, учитывающую влияние теплопроводности и толщины индивидуальных слоев на общую теплопроводность многослойного износостойкого покрытия на режущем инструменте.

Авторами работы [6] применяется методика расчета теплопроводности многослойного покрытия, используемая в настоящей работе. Необходимо отметить следующее. Для учета

теплопроводности твердосплавной основы при расчете теплопроводности инструмента с многослойным покрытием использование значения полной толщины твердосплавной СМП является нецелесообразным. Это связано с тем, что несравнимо большая толщина основы, исчисляемая в миллиметрах, по сравнению с толщиной покрытия, исчисляемой в микрометрах, при расчете общей теплопроводности полностью нивелирует влияние покрытия. Данное положение находит подтверждение в работе [6]. В указанном исследовании при расчетах толщину твердосплавной основы принимали равной толщине покрытия.

2. Характеристики современных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями

Группа обрабатываемого материала по ISO	Тип покрытия	Структура покрытия	Вид обработки по ISO	Толщина покрытия, мкм	Теплопроводность покрытия λ , Вт/(м·К)
Р	CVD	TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN	05	18	30,2
			15	14	31,1
			25	12	34,3
			35	10	34,5
	PVD	TiAlN-TiN	15	4	37,1
			25	4	48,4
М	CVD	TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN	15	5,5	38,1
			25	5,5	38,6
	PVD	TiAlN-TiN	05	4	54,2
			15	4	54,2
			25	4	55,3

Авторами работы [6] были получены величины теплопроводности инструментов с несколькими основными видами многослойных покрытий. Однако, для задач построения математических моделей для технологической подготовки производства и адаптивного управления в ЦПС необходимо учитывать изменение общей толщины покрытия при смене видов обработки – от предварительной к чистовой. Определение фиксированного значения теплопроводности конкретного вида покрытия без учета изменения толщины покрытия при смене вида обработки оказывается недостаточным. При переходе к чистовой обработке толщина используемого многослойного покрытия растет, и, следовательно, изменяется теплопроводность инструмента. Поэтому в настоящей работе, с целью учета влияния вида обработки и толщины многослойного покрытия на теплофизические процессы при резании, толщина твердосплавной основы принимается фиксированной при изменении толщины многослойного покрытия и равной практически минимальной возможной толщине

многослойного покрытия, т.е. 4 мкм.

Для подтверждения вышеописанных положений, принятых в настоящей работе, были проведены следующие экспериментальные исследования. Из твердосплавных СМП с износостойкими покрытиями были изготовлены образцы для определения теплопроводности (рис. 2, рис. 3). Были использованы СМП SNMM 250924-GH из сплава NC3030, CNMM 190616-GH из сплава NC3010 (Korloy, Ю. Корея) и CNMG 250924-PR из сплава GC4235 (Sandvik Coromant, Швеция). СМП NC3030, NC3010 и GC4235 характеризуются трехслойным покрытием конструкции «твердосплавная основа – TiCN-Al₂O₃-TiN», нанесенным CVD-способом. Вырезка образцов из СМП выполнялась на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ. Была выполнена полировка алмазными пастами поверхностей, соприкасающихся с измерителем, а также смазка их термопастой «Титан» для снижения теплового сопротивления на границе контакта прибора и образца.

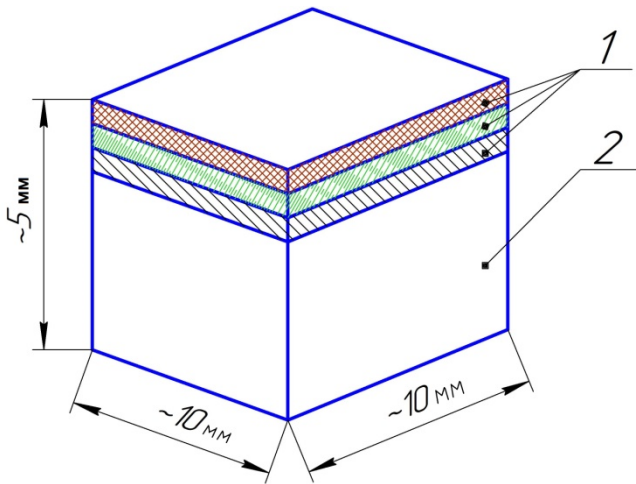


Рис. 2. Образец твердосплавной СМП с износостойким покрытием для измерения теплопроводности:
 1 – многослойное износостойкое покрытие конструкции «TiCN-Al₂O₃-TiN»; 2 – твердосплавная основа

При исследованиях использовался прибор для измерения теплопроводности мод. КИТ-02Ц, интегрированный с персональным компьютером, который позволяет с высокой точностью (3...5 %) определять коэффициент теплопроводности в диапазоне 1...400 Вт/м·К.

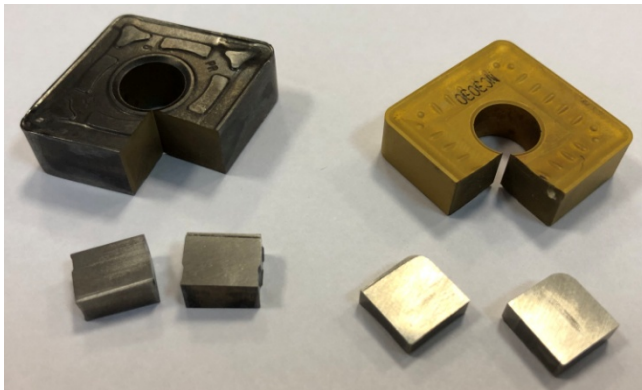


Рис. 3. Образцы для исследований с помощью растрового электронного микроскопа и измерения теплопроводности, вырезанные из твердосплавных СМП

Экспериментально были получены значения коэффициента теплопроводности λ для образцов, вырезанных из твердосплавных СМП с покрытием. Например, для сплава NC3030 значения коэффициента теплопроводности λ составило 43...45 Вт/м·К.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили принятые в настоящей работе положения. Во-первых, подтверждена недопустимость использования полной толщины твердосплавной пластины при расчете теплопроводности инструмента с покрытием. В описанных практических проверках толщины образцов составляли около 5 мм, в зависи-

мости от геометрии СМП, при толщине многослойного покрытия, измеряемой в микрометрах. В результате коэффициент теплопроводности, определенный на образце (43...45 Вт/м·К), по сути соответствует коэффициенту твердосплавной основы – 41 Вт/м·К (см. табл. 1) для вида обработки по ISO P25–P40, к которой относится использованный в примере сплав NC3030. Таким образом, роль покрытия, существенно определяющего характер температурно-деформационных процессов в зоне резания и работоспособность инструмента, нивелируется при недопустимом использовании полной толщины пластины в расчетах. Во-вторых, полученные коэффициенты теплопроводности по сути твердосплавной основы, согласуются со значениями, принятыми для расчетов, для твердосплавных основ современных СМП при различных видах обработки (см. табл. 1).

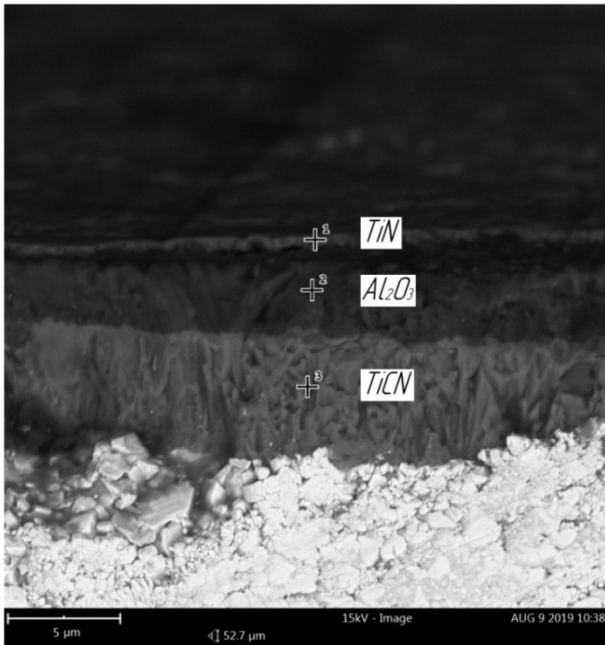
Для подтверждения принятых для расчетной методики значений характеристик твердосплавных СМП с покрытиями (см. табл. 1, 2) были проведены дополнительные экспериментальные исследования.

Для вырезанных образцов из СМП, описанных выше, были измерены толщины многослойных покрытий и определен химический состав слоев покрытий и твердосплавных основ при помощи электронного растрового микроскопа мод. Phenom ProX (Phenom-World BV, Нидерланды). Микроскоп предназначен для количественного морфологического анализа, измерений линейных размеров микрорельефа поверхности твердотельных структур и локального электронно-зондового элементного анализа.

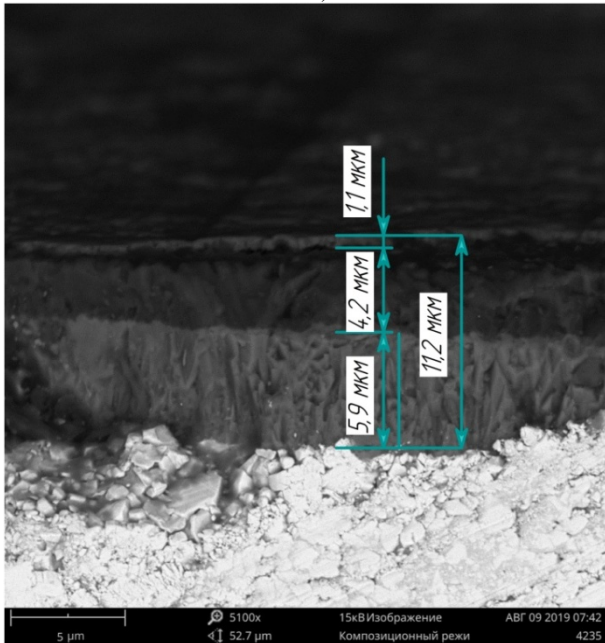
Проведенные экспериментальные исследования подтвердили корректность принятых для расчетной методики допущений.

Локальный электронно-зондовый элементный анализ химического состава слоев износостойких покрытий на фрагментах СМП из сплавов NC3030, NC3010 и GC4235 подтвердил, что многослойное покрытие представляет собой комбинацию TiCN–Al₂O₃–TiN (рис. 4). Данный аспект подтверждает принятое для расчетной методики положение о наиболее широко применяемых в производственной практике и серийно выпускаемых многослойных покрытиях (см. табл. 2).

Исследование толщин покрытий в целом, и отдельных слоев в частности (см. рис. 4) подтвердило допустимость принятых для расчетов величин объемного соотношения слоев и общей толщины покрытия (см. табл. 2).



а)



б)

Рис. 4. Фото при локальном электронно-зондовом элементном анализе химического состава слоев износостойкого покрытия (а) и измерение линейных размеров толщин слоев на фрагменте СМП из сплава GC4235 (Sandvik Coromant, Швеция) (б)

Локальный электронно-зондовый элементный анализ химического состава твердосплавных основ СМП (рис. 5) подтвердил допустимость принятых для них значений коэффициентов теплопроводности в расчетах. Например, химический состав сплавов NC3030 и GC4235 близок к отечественным аналогам Т4К8 и Т5К10 (табл. 3). В настоящей расчетной методике для СМП, в т.ч. и из сплавов NC3030 и GC4235, относящихся к виду обра-

ботки по ISO P25–P40, значение коэффициента теплопроводности λ установлено 41 Вт/м·К. При этом схожий по химическому составу сплав Т5К10 имеет близкую теплопроводность – 38 Вт/м·К [1].

3. Результаты локального электронно-зондового элементного анализа химического состава твердосплавных основ СМП

Марка твердого сплава	Обозначение и содержание элемента, %			
	W	Ti	C	Co
NC3030	90,38	3,4	1,08	5,14
GC4235	87,07	3,58	1,19	8,16

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили допустимость принятых ограничений для предложенной расчетной методики определения теплопроводности современных твердосплавных СМП с износостойкими покрытиями.



Рис. 5. Фото при локальном электронно-зондовом элементном анализе химического состава твердосплавной основы на фрагменте СМП из сплава NC3030 (Korloy, Ю. Корея)

На следующем этапе выполнен расчет значений коэффициентов теплопроводности твердосплавных инструментов с многослойными покрытиями для последующего использования при разработке математических моделей для технологической подготовки производства и управления выходными параметрами процесса резания.

Тепловое сопротивление материала R определяется зависимостью [11]:

$$R = \frac{1}{\lambda}. \quad (1)$$

Тепловое сопротивление режущего инструмента с многослойным покрытием рассчитывается согласно методике определения теплопроводности слоистых материалов [12] и выражается следующей зависимостью:

$$R_o \times V_o = (R_n \times V_n) + (R_m \times V_m) + (R_x \times V_x), \quad (2)$$

где R_o – общее тепловое сопротивление режущего инструмента с многослойным покрытием; R_n, R_m, R_x – тепловое сопротивление твердосплавной основы и каждого слоя покрытия (количество слоев покрытий, наносимых на основу, изменяется с учетом вида обработки и способа нанесения покрытия); V_o – общая толщина основы с покрытием; V_n, V_m, V_x – толщина твердосплавной основы и каждого слоя покрытия, соответственно. Значения ко-

эффициента теплопроводности основы для описанных современных твердых сплавов приведены в работе ранее. Информация о величинах коэффициентов теплопроводности химических соединений, соответствующих каждому слою покрытий, приведена в достаточном объеме в литературе [2 – 7]. Объемное соотношение, толщина основы и каждого из слоев покрытий были уже установлены в работе ранее. Следовательно, в формуле (2) остается неизвестным только искомое значение общей теплопроводности режущего инструмента с покрытием $\lambda_o \left(\lambda_o = \frac{1}{R_o} \right)$.

Приведем частный случай расчета теплопроводности для пластины с CVD-типом покрытия, структурой «твердосплавная основа – TiCN-Al₂O₃-TiN», предназначенной по группе обрабатываемости для чистой обработки, т.е. согласно ISO P05 (см. табл. 2).

Тепловое сопротивление пластины рассчитывается по формуле

$$R_o = \frac{(R_{TiCN} \times V_{TiCN}) + (R_{Al_2O_3} \times V_{Al_2O_3}) + (R_{TiN} \times V_{TiN}) + (R_{тв.спл.осн.} \times V_{тв.спл.осн.})}{V_o}$$

В связи с тем, что коэффициент теплопроводности λ является величиной обратной тепловому

сопротивлению $R \left(\lambda_o = \frac{1}{R_o} \right)$, то:

$$\lambda_o = \frac{1}{R_o} = \frac{1}{\frac{(R_{TiCN} \times V_{TiCN}) + (R_{Al_2O_3} \times V_{Al_2O_3}) + (R_{TiN} \times V_{TiN}) + (R_{тв.спл.осн.} \times V_{тв.спл.осн.})}{V_o}} = \frac{V_o}{(R_{TiCN} \times V_{TiCN}) + (R_{Al_2O_3} \times V_{Al_2O_3}) + (R_{TiN} \times V_{TiN}) + (R_{тв.спл.осн.} \times V_{тв.спл.осн.})}$$

4. Характеристики химических соединений, использованных в примере расчета

Химическое соединение	Коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К)	Тепловое сопротивление $R = 1/\lambda$	Толщина, мкм
TiCN	36,5	0,0274	9
Al ₂ O ₃	29,28	0,0342	7,2
TiN	29,28	0,0342	1,8
Твердосплавная основа	23	0,0434	4

В табл. 4 приведены объемные соотношения (толщины) и коэффициенты теплопроводности каждого из химических соединений по отдельности, использованных в примере расчета [2 – 7]. Значение теплового сопротивления каждого из слоев рассчитывается с использованием формулы (1). Общая толщина твердого сплава с многослойным покрытием

рассчитывается как сумма всех составляющих толщин расчетного образца. Значения толщин многослойных покрытий, нанесенных способом CVD, объемное соотношение слоев и толщина твердосплавной основы зафиксированы в работе ранее. Следовательно, общая расчетная толщина инструментального материала:

$$V_o = V_{TiCN} + V_{Al_2O_3} + V_{TiN} + V_{тв.спл.осн.} = 9 + 7,2 + 1,8 + 4 = 22 \text{ мкм}$$

Таким образом, все значения расчетной формулы известны, следовательно, значение

коэффициента теплопроводности для твердосплавной пластины с CVD-типом покрытия, структурой «твердосплавная основа – TiCN-Al₂O₃-TiN», предназначенной по группе обрабатываемости согласно ISO P05, будет равно:

$$\lambda_o = \frac{22}{(0,0274 \times 9) + (0,0342 \times 7,2) + (0,0342 \times 1,8) + (0,0434 \times 4)} =$$

$$= \frac{22}{(0,2466) + (0,24624) + (0,06156) + (0,1736)} = \frac{22}{0,728} = 30,2 \text{ Вт/м} \times \text{К}$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таким образом, выполнено решение промежуточной задачи при построении ЦПС для механообрабатывающего производства. Проведен анализ наиболее широко применяемых в производственной практике и серийно выпускаемых твердосплавных режущих инструментов с многослойными износостойкими покрытиями и рассчитаны значения коэффициентов теплопроводности для этих инструментов. Полученные значения предназначены для использования при построении математических моделей, связывающих режимы и условия обработки с действующими силами резания и выходным параметром обработки – шероховатостью обработанной поверхности. Разработанные на основе этих данных модели планируется использовать при технологической подготовке производства при расчете стартовых и уточненных режимов резания в зависимости от вида обработки, свойств обрабатываемого материала и применяемых инструментов, а также в ЦПС для механической обработки с целью адаптивного управления современным металлорежущим оборудованием с ЧПУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Талантов, Н.В.** Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с. ISBN 5-217-01857-7
2. **Korloy.** Metalcutting tools: Catalogue. South Korea, Korloy Publ., 2017, p.1060.
3. **Верещака, А.С., Третьяков, И.П.** Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
4. **Табakov, В.П., Чихранов, А.В.** Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с. ISBN 5-89146-710-0.
5. **Инструмент** для высокопроизводительного и экологически чистого резания / В.Н. Андреев, Г.В. Боровский, В.Г. Боровский, С.Н. Григорьев; под ред. В. А. Гречишников. – М.: Машиностроение, 2010. – 480 с. ISBN 978-5-94275-571-1.
6. **Balaji, A.K., Mohan V.S.** An «effective cutting tool thermal conductivity» based model for tool-chip contact in machining with multi-layer coated cutting tools. *Machining Science and Technology*, 2002, vol. 6, iss. 3, pp. 415-436. doi: 10.1081/MST-120016254.
7. **Ucun, I., Aslantas K.** Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,

2011, Vol. 54, iss 9-12, pp. 899-910. doi: 10.1007/s00170-010-3012-9.

8. **Sandvik Coromant.** Machining work manual: Guide, Sweden: Elanders Publ., 2010. – 803 p.

9. **Sandvik Coromant.** Technology of metal cutting: Guideline, Sweden, Elanders Publ., 2009, 359 p.

10. **Widia.** Turning tool: Catalogue. Germany, Widia Publ., 2017, 657 p.

11. **Постников, В.С.** Физика и химия твердого состояния. – М.: Металлургия, 1978. – 544 с.

12. **Исследование** теплопроводности биметаллических соединений из однородных и разнородных сталей / Л.М. Гуревич [и др.] // Изв. ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении». Вып. 3: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 11. – С. 31-35.

REFERENCES

1. Talantov, N.V. Physical Fundamentals of cutting, wear and destruction – M.: Mechanical Engineering, 1992. – pp. 240. ISBN 5-217-01857-7.
2. Korloy. Metalcutting tools: Catalogue. South Korea, Korloy Publ., 2017, p.1060.
3. Vereshchaka, A.S., Tretiyakov, I.P. *Cutters with Wear-resistant Coatings*. – M.: Mechanical Engineering, 1986. – pp. 192.
4. Tabakov, V.P., Chirkhanov, A.V. *Wear-resistant Coatings of Cutters Operated under Continuous Cutting Conditions*. – Uliyanovsk: UISTU, 2007. – pp. 255. ISBN 5-89146-710-0
5. Tools for High-performance and Ecological Cutting / V.N. Andreev, G.V. Borovsky, V.G. Borovsky, S.N. Grigoriev; under the editorship of V.A. Grechishnikov. – M.: Mechanical Engineering, 2010. – pp. 480. ISBN 978-5-94275-571-1.
6. Balaji, A.K., Mohan V.S. An «effective cutting tool thermal conductivity» based model for tool-chip contact in machining with multi-layer coated cutting tools. *Machining Science and Technology*, 2002, vol. 6, iss. 3, pp. 415-436. doi: 10.1081/MST-120016254.
7. Ucun, I., Aslantas K. Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, Vol. 54, iss 9-12, pp. 899-910. doi: 10.1007/s00170-010-3012-9
8. Sandvik Coromant. Machining work manual: Guide, Sweden: Elanders Publ., 2010. – 803 p.
9. Sandvik Coromant. Technology of metal cutting: Guideline, Sweden, Elanders Publ., 2009, 359 p.
10. Widia. Turning tool: Catalogue. Germany, Widia Publ., 2017, 657 p.
11. Postnikov, V.S. *Physics and Chemistry of Solid State*. – M.: Metallurgy, 1978. – pp. 544.
12. Investigation of heat conduction in bimetallic joints made of uniform and heterogeneous steels / L.M. Gurevich [et al.] // *Proceedings of VolgaSTU. Series “Problems of Material Science, Welding and Strength in Mechanical Engineering”*. Issue 3: Inter-College Proceedings / VolgaSTU. – Volgograd, 2009. – No.11. – pp. 31-35.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров