

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ТОКАРНЫХ РЕЗЬБОВЫХ РЕЗЦОВ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

© 2015

В.П. Табаков, доктор технических наук, профессор

Д.И. Сагитов, кандидат технических наук

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: режущий инструмент; износостойкие покрытия; резьба; тепловое состояние инструмента.

Аннотация: Процесс нарезания резьбы характеризуется более неблагоприятными факторами процесса резания, чем обычное непрерывное точение. В связи с этим актуальной задачей является минимизировать воздействие этих факторов на режущий инструмент, и, следовательно, повысить его работоспособность. Одним из путей повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение на его рабочие поверхности износостойких покрытий, поэтому важной задачей при разработке новых более эффективных составов износостойких покрытий является оценка их влияния на тепловое состояние режущего инструмента. В статье представлены результаты исследований теплового состояния резьбовых резцов с однослойными одно- и многоэлементными нитридными покрытиями TiN, TiCrN и TiCrZrN, которые были нанесены на токарные резьбовые пластины полного профиля методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой. Показано влияние схемы нарезания резьбы на контактные характеристики процесса резания. Выявлены особенности деформации стружки при профильной схеме резания, которые позволили разработать методику расчета температурных полей в режущем клине резьбового резца. Исследованиями установлено влияние схемы нарезания резьбы и износостойких покрытий на показатели теплового состояния резьбовых резцов, на распределение температурных полей в режущем клине резьбовых резцов, на его контактных площадках и на тепловой баланс процесса резьбонарезания. Показано влияние покрытий на прогреваемый объем материала режущей части инструмента. На основе проведенных исследований предложены новые износостойкие покрытия многослойной архитектуры.

Условия резания на операциях резьбонарезания характеризуются рядом особенностей, основными из которых являются большая деформация стружки из-за течения металла от двух и более режущих кромок, одновременно участвующих в процессе резания, интенсивное трение по вспомогательным задним поверхностям, высокая теплонапряженность вершин режущего инструмента [1; 2]. Данные особенности, а также физико-химические процессы, протекающие на контактных площадках, вызывают интенсивный износ режущего инструмента. С целью минимизировать воздействие этих факторов на режущий инструмент и, следовательно, повысить его работоспособность на его рабочие поверхности наносят износостойкие покрытия [3–9]. Важной задачей при разработке новых более эффективных составов износостойких покрытий является оценка их влияния на тепловое состояние режущего инструмента.

Исходя из этого, целью работы является оценка теплового состояния токарных резьбовых резцов с износостойкими покрытиями, работающих в стесненных условиях резания.

Исследовали влияние однослойных износостойких покрытий на контактные характеристики процесса ре-

зания и тепловое состояние режущего клина инструмента при нарезании метрической резьбы на заготовках из стали 30ХГСА. Использовали токарные резьбовые пластины полного профиля CoroThread™ R.166 фирмы Sandvik Coromant (Швеция) из сплава H13A. На резьбовые пластины методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой наносили однослойные одно- и многоэлементные нитридные покрытия TiN, TiCrN и TiCrZrN. Контактные характеристики процесса резания определяли по методике работы [10], тепловое состояние оценивали по методике работы [11]. Распределение температур и напряжений в режущем клине инструмента строили с помощью пакета прикладных программ ANSYS.

Принимая во внимание, что тепловое состояние режущего инструмента определяется условиями пластического деформирования в зоне стружкообразования, на первом этапе исследовали контактные характеристики процесса резьбонарезания. Результаты исследований влияния износостойких покрытий на контактные характеристики процесса нарезания резьбы представлены в табл. 1.

Процесс резьбонарезания по профильной схеме резания характеризуется тяжелыми условиями

Таблица 1. Контактные характеристики процесса резьбонарезания

Покрытие	C_p , мм	K_L	P_Z , Н	P_y , Н	q_N , МПа	q_F , МПа
Без покрытия	1,32/1,2	1,58/1,95	4070/5090	1600/2000	167/233	64/94
TiN	0,7/0,67	1,36/1,68	3550/4440	1340/1680	285/346	98/131
TiCrN	0,79/0,7	1,4/1,71	3570/4460	1360/1700	274/308	95/119
TiCrAlN	0,88/0,73	1,44/1,8	3580/4470	1380/1720	264/277	90/110
TiCrZrN	0,9/0,75	1,48/1,86	3590/4480	1380/1730	257/271	89/107

Примечание. Данные представлены для последнего прохода резьбового резца; $V=120$ м/мин; $r=3$ мм; в числителе значения параметров для генераторной, в знаменателе – для профильной схемы нарезания резьбы.

стружкообразования. Установлено, что микротвердость стружки при нарезании резьбы по профильной схеме больше по сравнению с генераторной на 10...30 % в зависимости от ширины стружки. При этом различие в величинах микротвердости стружки для профильной и генераторной схем нарезания резьбы увеличивается по мере приближения к вершине резцового резца. Данный факт подтверждает более тяжелые условия стружкообразования для профильной схемы резания.

Применение износостойких покрытий (рис. 1) ведет к уменьшению микротвердости стружки вследствие снижения силовой нагрузки на режущий клин резцового резца в результате нанесения покрытий. При этом степень изменения микротвердости вдоль ширины стружки различна в зависимости от схемы резбонарезания.

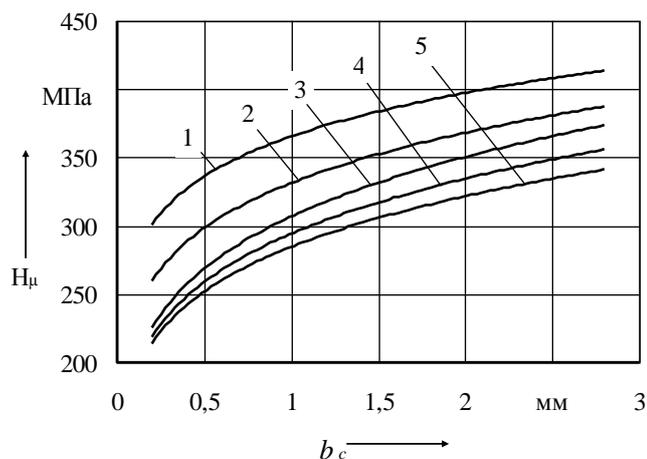


Рис. 1. Распределение микротвердости H_c стружки по ее ширине b_c при нарезании резьбы на заготовке из стали 38ХГН по профильной схеме резания: 1 – без покрытия; 2 – TiN; 3 – TiCrN; 4 – TiCrAlN; 5 – TiCrZrN; $V=120$ м/мин, $P=3$ мм

Для профильной схемы характерно меньшее снижение микротвердости у вершины резца и наибольшее – на противоположной стороне стружки. При генераторной схеме резания влияние покрытий на микротвердость по всей ширине стружки примерно одинаковое. Полученные результаты говорят о том, что в наиболее стесненных участках зоны стружкообразования покрытие в меньшей степени влияет на процесс деформации стружки. По мере удаления от вершины влияние покрытий возрастает.

Для оценки влияния покрытий на контактные характеристики процесса резания (коэффициент укорочения стружки K_L и составляющие силы резания P_z , P_y , P_x) при профильной схеме нарезания резьбы использовали специальную заготовку, позволяющую исключить из процесса резания вершину резца, где происходит «наложение потоков» стружки от двух режущих кромок. Результаты исследований (табл. 2) показали, что влияние покрытий на коэффициент укорочения стружки K_L и составляющие силы резания больше проявляется при резании, исключающем из процесса вершину резца, по сравнению с обычной профильной схемой. Снижение коэффициента укорочения стружки K_L и составляющих силы резания P_z , P_y и P_x при нанесении покрытий TiN в первом случае составило соответственно 16,5 % и 22...17 %, для обычной профильной схемы – соответственно 13,8 % и 16...12,7 %.

Рассмотренные особенности деформирования стружки при профильной схеме резания отражаются на влиянии покрытий на характеристики процесса резания. Профильная схема резания характеризуется большими значениями коэффициента укорочения стружки, сил резания и контактных нагрузок. Величина коэффициента K_L и составляющих P_z , P_y , P_x для профильной схемы резания выше по сравнению с генераторной в среднем на 25 %. Нанесение покрытий TiN снижает коэффициент укорочения стружки и составляющие силы резания на 14...16 % в зависимости от схемы резбонарезания.

Анализ полученных данных показывает, что при нарезании резьбы по профильной и генераторной схеме резания наблюдаются общие закономерности влияния покрытий на контактные характеристики процесса резания. Нанесение одноэлементных покрытий TiN уменьшает длину контакта стружки с передней поверхностью S_γ , коэффициент укорочения стружки K_L и составляющие силы резания по сравнению с инструментом без покрытия. Нанесение многоэлементных покрытий TiCrN и TiCrZrN увеличивает данные характеристики по сравнению с одноэлементным покрытием TiN. Снижение длины контакта S_γ при нанесении покрытий TiN повышает средние нормальные удельные нагрузки q_N , а нанесение многоэлементных покрытий из-за роста длины контакта S_γ вызывает их уменьшение. Влияние покрытий на средние касательные удельные нагрузки q_F аналогично: нанесение покрытий TiN их увеличивает, а использование многоэлементных покрытий – снижает по отношению к покрытию TiN.

Влияние покрытий на характеристики теплового состояния резцовых резцов представлено в табл. 3.

Таблица 2. Влияние условий резания на контактные характеристики процесса нарезания резьбы (для последнего прохода резца) на заготовке из стали 38ХГН

Покрытие	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н	K_L
Без покрытия	4330/5090	1670/2000	810/890	1,46/1,95
TiN	3400/4440	1300/1680	670/750	1,22/1,68
TiCrN	3640/4460	1390/1700	670/790	1,32/1,71
TiCrAlN	3640/4470	1400/1720	690/860	1,39/1,8

Примечание. В числителе даны значения для случая, когда вершина резца исключена из процесса резания, в знаменателе – для обычной профильной схемы; $V=120$ м/мин; $p=3$ мм.

Таблица 3. Показатели теплового состояния резбовых резцов

Покрытие	$Q_n, 10^6$ Вт	$Q_3, 10^6$ Вт	$q_n, 10^6$ Вт/м	$q_3, 10^6$ Вт/м	$T_{n\text{ ср}}, \text{C}$	$T_{3\text{ ср}}, \text{C}$
Без покрытия	49,8/70,7	-1,1/-1,2	4,8/14,5	-5,6/-17,4	674/812	361/450
TiN	34,7/60,5	-0,6/-0,7	6,4/16,9	-7,9/20,4	636/776	340/428
TiCrN	36,6/64,5	-0,7/-0,9	5,5/13,3	-5,8/-16,6	648/782	341/436
TiCrAlN	38,3/65,7	-0,7/-0,9	4,2/12,7	-5,2/-15,7	653/786	350/420
TiCrZrN	41,2/66,7	-0,7/-0,9	3,5/12,0	-4,1/-15,0	653/790	356/437

Примечание. Данные представлены для последнего прохода резбового резца; $V=120$ м/мин; $p=3$ мм; в числителе значения параметров для генераторной, в знаменателе – для профильной схемы нарезания резьбы.

Анализ данных, представленных в табл. 3, позволяет сделать заключение, что применение покрытий TiN уменьшает мощность теплового потока на передней поверхности Q_n , более высокие значения сил резания, характерные для режущего инструмента с многоэлементными покрытиями, вызывают увеличение мощности теплового потока Q_n по сравнению с покрытием TiN. Снижение длины контакта C_γ при нанесении покрытия TiN несколько увеличивает интенсивность теплового потока по передней поверхности q_n , а увеличение величины C_γ при использовании многоэлементных покрытий, несмотря на повышение мощности теплового потока, снижает интенсивности тепловых потоков на передней q_n и задней q_3 поверхности по сравнению с инструментом с покрытием TiN. Изменение мощности тепловых потоков на передней Q_n и задней Q_3 и их интенсивностей q_n и q_3 приводит к изменению контактных температур, действующих на передней и задней поверхностях. Нанесение покрытий TiN вызывает уменьшение контактных температур по передней $T_{n\text{ ср}}$ и задней $T_{3\text{ ср}}$ поверхностям, а нанесение многоэлементных покрытий по сравнению с покрытием TiN их увеличивает.

Условия процесса резания при нарезании резьбы сказываются на влиянии износостойких покрытий на характеристики теплового состояния режущего инструмента. Стесненные условия процесса резания при профильной схеме нарезания резьбы резцом без покрытия вызывают рост мощности теплового потока на передней поверхности Q_n и его интенсивности q_n соответственно на 42 % и в 3,1 раза по сравнению с такими же показателями при генераторной схеме резания. Для резцов с износостойкими покрытиями эти цифры составили 62...74 % и 2,4...3,4 раза.

Условия процесса резания при нарезании резьбы отражаются на формировании температурных полей в режущем клине инструмента. Расчет температурных полей проводили с использованием пакета прикладных программ ANSYS по разработанной методике, отличительной особенностью которой является наложение тепловых потоков вдоль режущих кромок резбового резца с учетом закона распределения микротвердости стружки. На рис. 2 в качестве примера показаны температурные поля в режущем клине резбового резца, из которого видно, что, независимо от схемы резания, наибольшее снижение температуры наблюдается при нарезании резьбы резцом с покрытием TiN. При этом изотермы температуры из-за уменьшения длины контакта стружки с передней поверхностью резца вследствие нанесения покрытия смещаются в сторону задней поверхности. Увеличение величины C_γ , характерное для многоэлементного покрытия TiCrZrN по сравнению

с покрытием TiN, наряду с повышением мощности теплового источника приводит к смещению изотерм температурных полей в режущем клине инструмента в сторону от задней поверхности и режущих кромок инструмента и вглубь инструментальной основы.

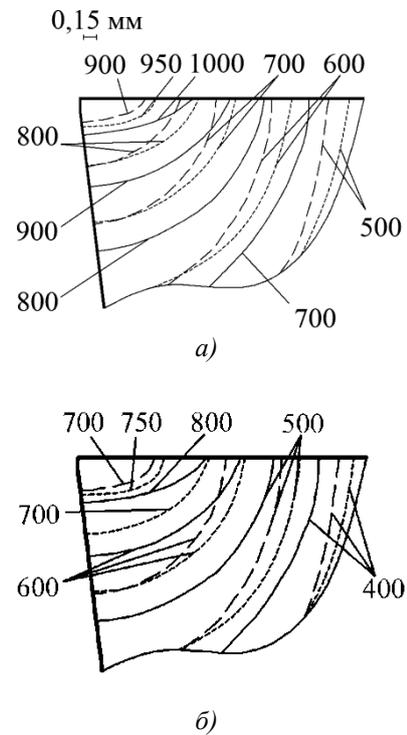


Рис. 2. Распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) в режущем клине резбового резца при нарезании резьбы в заготовках из стали 38ХГН:
а) профильная схема, б) генераторная схема;
без покрытия – сплошная линия,
TiN – длинный пунктир, TiCrZrN – короткий пунктир ($V=120$ м/мин; $p=3$ мм)

Большая площадь контакта стружки с передней поверхностью резца и меньшая скорость перемещения стружки при профильной схеме резания по сравнению с генераторной схемой резания способствует большему поступлению теплоты в инструмент и вызывает большее смещение изотерм температуры в основу инструментального материала.

В табл. 4 представлены данные теплового баланса процесса нарезания резьбы резцами с покрытиями различного состава.

Таблица 4. Тепловой баланс при нарезании резьбы резцами с различными покрытиями

Покрытие	Номер прохода	Мощность теплового потока, $Q \cdot 10^6$ Вт	Тепловой баланс P , %		
			стружка	инструмент	заготовка
<i>Профильная схема резания</i>					
Без покрытия	4	69,57	53	34	13
TiN	4	59,62	62	26	12
TiCrN	4	63,67	64	25	11
TiCrAlN	4	64,84	65	24	11
TiCrZrN	4	65,74	66	23	11
<i>Генераторная схема резания</i>					
Без покрытия	4	48,75	65	27	8
TiN	4	34,05	73	18	9
TiCrN	4	35,84	74	16	10
TiCrAlN	4	37,61	75	15	10
TiCrZrN	4	40,45	76	14	10

Большая площадь контакта стружки с передней поверхностью и меньшая скорость перемещения стружки по передней поверхности при профильной схеме резания увеличивает количество теплоты, поступающей в резец, по сравнению с генераторной схемой. Следовательно, по тепловой напряженности процесс резания при профильной схеме находится в более худших условиях по сравнению с генераторной. Так, количество тепла, поступающего в инструмент при профильной схеме резания по сравнению с генераторной схемой, больше на 37...32 % для резца без покрытия, а для резцов с покрытиями – на 53...38 % в зависимости от состава покрытия и прохода резца.

Нанесение покрытий на контактные площадки резьбовых резцов приводит к перераспределению количества теплоты, выделяющейся в зоне резания, между инструментом, стружкой и заготовкой. При нанесении покрытий доля теплоты, уходящей в стружку, увеличивается, а в резец и заготовку – снижается. Наблюдаемое перераспределение количества теплоты, поступающей в стружку, резец и заготовку, объясняется тем, что нанесение покрытий уменьшает коэффициент укорочения стружки K_L и полную длину контакта стружки с перед-

ней поверхностью S_r . Это приводит к увеличению скорости перемещения стружки относительно режущего инструмента и уменьшению площади контакта стружки с передней поверхностью. Кроме того, уменьшение интенсивности источника теплоты деформации и его размеров для резца с покрытием уменьшает подогрев стружки и увеличивает ее способность аккумулировать теплоту трения на передней поверхности, что также способствует снижению доли теплоты, уходящей в резец со стороны передней поверхности.

Доля теплоты, уходящей в инструмент при нанесении покрытий по сравнению с резцом без покрытия, снижается в 1,3–1,4 раза при профильной и в 1,5–2 раза при генераторной схемах резания.

Оценка температурных полей на контактных площадках резьбовых резцов, полученных с помощью термоиндикаторных красок Tempilstik (США), показала, что нанесение покрытий снижает количество теплоты, поступающей в режущий клин резца. Как видно из рис. 3, нанесение покрытий уменьшает объем прогреваемого материала режущей части резца. При этом больший объем прогреваемого материала режущей части имеет место для профильной схемы резания.

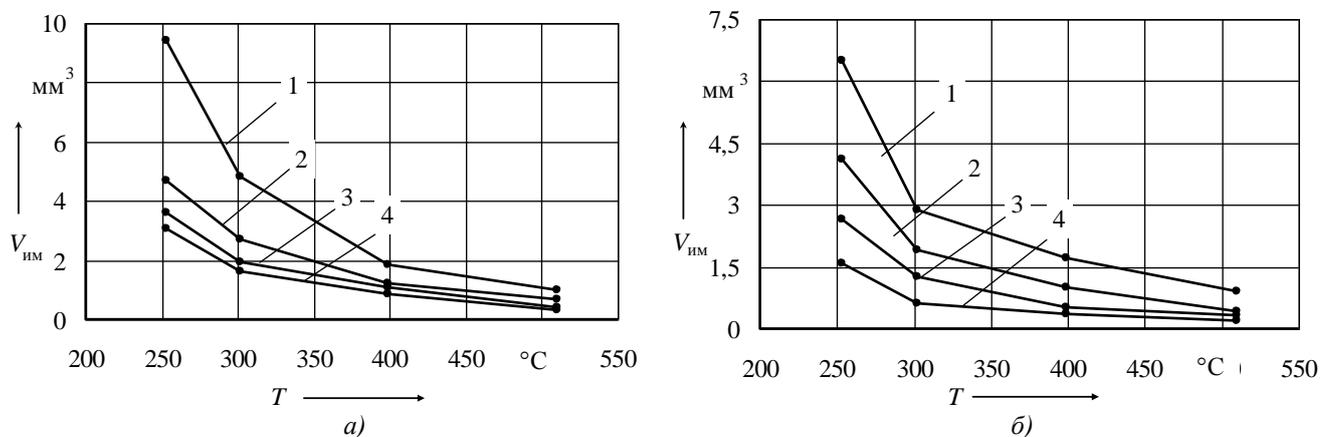


Рис. 3. Влияние покрытий на прогреваемый объем материала режущей части резца ($V_{им}$) при нарезании резьбы по профильной (а) и генераторной (б) схемам резания: 1 – без покрытия; 2 – TiN; 3 – TiCrN; 4 – TiCrZrN

Анализ результатов исследований контактных характеристик процесса резбонарезания и теплового состояния резбых резцов позволяет сделать заключение, что изменение указанных процессов при нанесении покрытий подчиняется одним и тем же закономерностям, что и при продольном точении [1]. При этом наилучшее тепловое состояние резбых резцов обеспечивают трехэлементные нитридные покрытия. Принимая это во внимание, были разработаны многослойные покрытия для токарных резбых резцов, позволившие существенно повысить их работоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резьбообразующий инструмент / В.А. Гречишников [и др.]. М.: СТАНКИН, 1999. 405 с.
2. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 415 с.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
4. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
5. Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких покрытий для применения в инструментальном производстве // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6. С. 37–42.
6. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 9–18.
7. Григорьев С.Н., Андреев А.А., Шулаев В.М. Наноструктурные износостойкие покрытия, полученные методами физического осаждения в вакууме // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 4–8.
8. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 18–32.
9. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating // Material Science Forum. 1994. Vol. 163–165. P. 527–532.
10. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
11. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки металлов. М.: Машиностроение, 1981. 286 с.

REFERENCES

1. Grechishnikov V.A. et al. *Rezboobrazuyushchiy instrument* [Tapping tool]. Moscow, STANKIN publ., 1999, 405 p.
2. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. *Deformirovanie i prochnost materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii* [Deformation and strength of materials under complex stress condition]. Kiev, Naukova dumka publ., 1976, 415 p.
3. Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokritiyami* [Efficiency of the cutting tool with anti-wear coatings]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1993, 336 p.
4. Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostoykikh ionno-plazmennikh pokritiy rezhushchego instrumenta* [Formation of anti-wear ion-plasma coatings of a cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008, 311 p.
5. Volosova M.A., Grigoriev S.N. Technological principles of deposition of wear-resistant nano for use in tool production. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2010, no. 6, pp. 37–42.
6. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Improving the efficiency of the tool by controlling the composition, structure and properties of coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2005, no. 9, pp. 9–18.
7. Grigoriev S.N., Andreev A.A., Shulaev V.M. Nanostructured durable coatings produced by physical vapor deposition in the vacuum. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2005, no. 9, pp. 4–8.
8. Vereshchaka A.S., Grigoriev S.N., Tabakov V.P. Methodological principles of creation the functional coatings of new generation for cutting tool manufacture. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2013, no. 2, pp. 18–32.
9. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating. *Material Science Forum*, 1994, vol. 163–165, pp. 527–532.
10. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1976, 278 p.
11. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki metallov* [Thermal physics processes of machining process of metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 286 p.

**ASSESSMENT OF THERMAL CONDITION OF TURNING SCREW
TOOLS WITH ANTI-WEAR COATINGS**

© 2015

V.P. Tabakov, Doctor of Engineering, Professor
D.I. Sagitov, candidate of technical sciences
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: cutting tool; anti-wear coatings; thread; thermal condition of the tool.

Abstract: The process of thread cutting is characterized by more unfavorable factors of cutting process than traditional continuous turning. In this connection, the minimization of these factors influence on cutting tool and, consequently, the improvement of its working ability, is the relevant objection. One of the ways of improvement of the cutting tool working ability is the application of wear-resistant coatings on its working surfaces; that is why the evaluation of influence of wear-resistant coatings compound on the thermal condition of the cutting tool is the important task while developing new more effective wear-resistant coatings compounds. The article gives the results of study of thermal condition of threading tool with one- and multi-elements of nitride coatings (TiN, TiCrN и TiCrZrN) which were applied on the turning thread planes of full profile by the substance condensation in vacuum using the ionic bombardment. The article shows the influence of scheme of thread cutting on the contact characteristics of the cutting process. The article provides the results of finding the contact characteristics of the screw cutting process and thermal condition of turning screw tools with different coatings. It shows the influence of tapping scheme and anti-wear coatings on temperature fields in cutting threaded wedge cutters, and heat balance of screw cutting process. Based on the results of the research, the authors suggest new durable coatings of multi-element and multilayer architecture.