

УДК 621.8.04

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ И ОДНОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЯХ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ И РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Г.И. Костюк<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Н.Л. Белов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ",*

<sup>2</sup> *ПО Завод им. Малишева*

Проведено исследование характера изменения напряженного состояния при переходе от одного слоя покрытия к другому в динамическом и стационарном режимах работы деталей и режущего инструмента (РИ), выбраны сочетания слоев покрытий, работающих эффективно в условиях динамического, стационарного и смешанного действия температурных напряжений.

\* \* \*

Проведено дослідження характеру впливу напруженого стану при переході від одного шару покриття до другого у динамічному та стаціонарному режимах роботи деталей та ріжучого інструменту, вибрано сполучення шарів покриттів, працюючих ефективно в умовах динамічної, статичної та змішаної дії напружень

\* \* \*

The research of the stressed state variation nature during a transition from one layer coating to another in dynamic and stationary modes of cutting tool (CT) and of details operation is carried out and combinations of layers working efficiently in conditions of the dynamic, stationary and combined action of thermal stresses are selected.

### 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В ряде работ [1-4] показана возможность расчета температурных напряжений в переходной зоне покрытия – основной материал детали или режущего инструмента (РИ), что позволяет определить характер действий (сжимающие или растягивающие), величину напряжений и характер их распределения по глубине покрытия и детали, что важно для оценки износостойкости и ресурса детали и стойкости режущего инструмента. Все эти работы позволяют оценить напряженное состояние детали с учетом основных нагрузок, действующих на деталь и РИ, а также температурных напряжений, а в дальнейшем с учетом их суперпозиций оценить напряженное состояние детали или РИ. Все это позволяет, в конечном счете, определить влияние покрытий на работоспособность детали или РИ, но есть трудности при определении напряженного состояния многослойных покрытий, их возможности и совместимость с точки зрения величины скачка напряжений в переход-

ном слое и знака напряжений на поверхности детали (желательно иметь сжимающие напряжения).

Изложенное выше позволяет утверждать, что работа, посвященная исследованию температурных напряжений в однослойных и многослойных покрытиях и в переходных слоях, важна для решения вопроса о ресурсе детали и стойкости РИ, т.е. эта задача актуальна и своевременна.

Работы по изучению напряженного состояния многослойных и однослойных покрытий выполнялись при реализации проекта "Разработка теоретических основ создания интегрированной ионно-плазменной обработки деталей аэрокосмической техники", а также других программ ГКНТ, Министерства образования Украины, Министерства науки и технологии, Министерства образования и науки. К ним относятся такие проекты:

- Повышение надежности и эксплуатационных свойств деталей машин путем формирования поверхностных слоев с помощью комбинированных технологий.
- Технологические пути повышения эксплуатационных характеристик деталей машин путем созда-

ния поверхностных слоев с заданными свойствами и др.

Все это подтверждает актуальность предлагаемого исследования.

## 2. ВВЕДЕНИЕ

Проведено исследование характера изменения напряженного состояния при переходе от одного слоя покрытия к другому в динамическом и стационарном режимах работы деталей и режущего инструмента (РИ), выбраны сочетания слоев покрытий, работающих эффективно в условиях динамического, стационарного и смешанного действия температурных напряжений, для чего рассмотрены следующие вопросы:

1. Характер изменения напряженного состояния в зоне «покрытие - инструментальный материал», и в зоне перехода от одного покрытия к другому в нестационарном режиме резания (работа непрогретого инструмента или детали с нестационарными температурными полями, работа многолезвийного инструмента).

2. Характер изменения напряженного состояния в тех же зонах в условиях, близких к стационарному резанию (минимальные градиенты температур в теле инструмента).

3. На основе этих исследований выявили принципы выбора многослойных и однослойных покрытий для режущего инструмента и провели экспериментальную проверку этих принципов.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения влияния теплофизики и термомеханики на стойкость режущего инструмента с однослойным и многослойным покрытием рассмотрим следующие вопросы:

1. Характер изменения напряженного состояния в зоне покрытия - инструментальный материал, и в зоне перехода от одного покрытия к другому в нестационарном режиме резания (работа непрогретого инструмента с нестационарными

тепловыми полями или работа многолезвийного инструмента).

2. Характер изменения напряженного состояния в тех же зонах в режиме, близком к условиям стационарного резания (минимальные градиенты температур в теле инструмента).

3. На основе этих исследований определим принципы выбора многослойных и однослойных покрытий на детали и режущий инструмент и провели экспериментальную проверку этих принципов.

Для того, чтобы определить изменение напряжений по величине и знаку, были проведены расчеты величин отношений напряжения в первом покрытии к напряжению во втором покрытии и определен знак напряжения на первом покрытии по рассмотренной ранее модели [5]. Систематизированные результаты расчетов представлены в табл. 1.

Из таблицы видно, что можно выбрать многослойное покрытие таким образом, что величины температурных напряжений при переходе от одного покрытия к другому будут незначительно отличаться по величине (не будет высоких градиентов напряжений), а также выбрать знак напряжений в соответствии с условиями работы инструмента.

Анализ результатов, представленных в табл. 1 показывает:

- для получения работоспособного при динамических нагрузках инструмента с многослойными покрытиями необходимо выбрать сочетание: первое - второе покрытия, для которых на первое покрытие действуют сжимающие напряжения, что снизит вероятность появления усталостных трещин в покрытии;

- отличие напряжений по величине при переходе от первого покрытия ко второму не должно превышать 30%, что позволит избежать значительных по величине динамических температурных напряжений в переходной зоне от одного типа покрытия к другому, что, в свою очередь, снизит вероятность отслаивания одного покрытия по отношению ко второму;

№	Первое покрытие	Изменение динамических температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму																
		до ± 20%							от ± 20 до ± 30%									
1	TiC	WC									$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							1
2	ZrC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN					TaC	Ta <sub>2</sub> N						6
3	HfC	VC	Nb <sub>2</sub> C	TaN	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						TiC							3
4	VC	HfC	Nb <sub>2</sub> C	Ta <sub>2</sub> N	TaN	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>					$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							3
5	Nb <sub>2</sub> C	HfC	VC	Ta <sub>2</sub> N	TaN	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>					$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							2
6	NbC	ZrC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>						VC	TiN	Ta <sub>2</sub> N	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>				4
7	TaC	ZrC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN						NbC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N		4
8	Ta <sub>2</sub> C	W <sub>2</sub> C	ZrN	от NbN <sub>0,6</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	CrN	HfN					Mo <sub>2</sub> C	V <sub>2</sub> N	NbN	Cr <sub>2</sub> N				5
9	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	ZrC	NbC	TaC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN				нет							1
10	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	ZrC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN						VC	TiN	Ta <sub>2</sub> N	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>				2
11	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	ZrC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	VN					VC	TiN	Ta <sub>2</sub> N	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>				1
12	Mo <sub>2</sub> C	ZrC	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	TiN	NbN					NbC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N		8
13	W <sub>2</sub> C	Ta <sub>2</sub> C	ZrN	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	CrN	HfN					Mo <sub>2</sub> C	V <sub>2</sub> N	NbN	CrN				3
14	WC	TiC									BN	NbC	Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN			1
15	TiN	ZrC	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C													3
16	ZrN	Ta <sub>2</sub> C	W <sub>2</sub> C	TiN	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N	CrN	HfN	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	нет								4
17	VN	ZrC	NbC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>					VC	TiN	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> N				4
18	V <sub>2</sub> N	ZrC	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C	Cr <sub>2</sub> N					NbC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN				9
19	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	Ta <sub>2</sub> C	W <sub>2</sub> C	TiN	ZrN	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N	CrN	HfN	Mo <sub>2</sub> C								4
20	NbN	ZrN	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N			NbC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN				1
21	Ta <sub>2</sub> N	VC	Nb <sub>2</sub> C	NbC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	VN	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>				HfN	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	TaN					8
22	TaN	HfN	VC	Nb <sub>2</sub> C	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						TiC							4
23	Cr <sub>2</sub> N	ZrC	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN	NbN				NbC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN	V <sub>2</sub> N			3
24	CrN	Ta <sub>2</sub> C	W <sub>2</sub> C	TiN	ZrN	V <sub>2</sub> N	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	Cr <sub>2</sub> N	NbN	Mo <sub>2</sub> C								8
25	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	NbC	VC	Nb <sub>2</sub> N	VN	Ta <sub>2</sub> N	TaN				NbC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> N				10
26	HfN	Ta <sub>2</sub> C	W <sub>2</sub> C	ZrN	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	CrN					Mo <sub>2</sub> C	V <sub>2</sub> N	NbN					5
27	BN	Нет ни одного									нет							нет
28	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	HfC	TaN														4

\* Для стали все □, кроме WC ⊕

- такими принципами необхідно користуватися для другого і третього (третього і четвертого і т.д.) слоя і для наступуючих слоев;

- цю таблицю слід використовувати, коли умови роботи інструмента можна назвати прерывистими, коли час різання одним інструментом невелико і він не нагрівається на значительную глибину, або для роботи многолезвийного інструмента, для кожного лезвія якого реалізується прерывистий режим роботи.

Аналізуючи дані, приведені в таблиці, можна зробити висновок, що для відносно невеликого кількості покриттів є можливість варіювання слоев покриттів. Так, для TiC, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, WC, NbN є тільки одне покриття, що задовольняє цим критеріям; для BN немає покриттів, що відповідають цим критеріям, тоді як для покриттів ZrO, NbC, Ta<sub>2</sub>C, Mo<sub>2</sub>C, ZrN, VN, TaN, CrN, Si<sub>3</sub>N<sub>2</sub>, HN, α, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> є більше чотирьох варіантів комбінацій.

Причому динамічні (нестационарні) температурні напруження в зоні переходу від покриття до основного матеріалу (швидкохідна сталь P5M6) в основному є стискаючими (крім WC), але вони відрізняються за величиною, значно більшою ніж 30% (більше ніж в 10 разів для TiC, WC, BN).

По розглянутій моделі були проведені розрахунки величин напружень при переході від першого покриття (соприкасающегося з оброблюваним матеріалом) до другого. Для двадцяти восьми типів покриттів в табл. 2 представлені оброблені і сгрупированні результати розрахунків відношень температурних напружень в першому покритті до напруженням во втором или материале РИ.

Аналіз результатів, представлених в табл. 2, показує, що кількість комбінацій покриттів, що задовольняють відмінності напружень по абсолютній величині на 30%, значно збільши-

лось для стационарних напружень. Существенно також збільшилось кількість комбінацій покриттів, для яких в першому покритті реалізуються стискаючі напруження. Величина стационарних напружень значительного числа покриттів відрізняється на 30% і менше, а кількість покриттів, в яких напруження стискаючі, зросло значно.

Кількість покриттів, які успішно комбінуються з основним матеріалом (швидкохідна сталь Р6М5) - двадцять. Случай дії стационарних напружень більш сприятливий для многослойних покриттів, ніж для роботи однослойного покриття.

Часто неможливо конкретно визначити, в якому режимі буде працювати різальний інструмент:

- при дії стационарних температурних напружень;
- при дії нестационарних температурних напружень.

Тоді необхідно вибрати такі комбінації покриттів, які будуть задовольняти вимогам, необхідним для двох режимів роботи інструмента. Порівнявши табл. 1 і 2, отримаємо ті комбінації, які будуть працювати в будь-якому режимі, ці комбінації представлені в табл. 3.

Кількість покриттів, для яких виконуються обидва принципи, - 16, і вони мають більше двох варіантів - сім (ZrC, Nb<sub>2</sub>C, Mo<sub>2</sub>C, W<sub>2</sub>C, ZrN, VN, Ta<sub>2</sub>N.).

Видно, що для 12 покриттів не знайдено ні одного покриття, яке б комбінувалось достатньо успішно для роботи в двох режимах.

Найбільш успішними виявились покриття з карбіда цирконія, який успішно комбінується з чотирма покриттями (Nb<sub>2</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>3</sub>, VN, TaC), нітрида ванадію - тріма (Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>), нітрида тантала - тріма (Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>C<sub>2</sub>, NbO). Ряд покриттів має по два і по одному успішному комбінуванню.

#### 4. ВИВОДИ І ПЕРСПЕКТИВИ ДАЛЬНІЙШИХ ІССЛЕДОВАНИЙ

Проведено дослідження характеру зміни

Таблица 2

№	Первое покрытие	Изменение стационарных температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму									
		± 10%									
1	TiC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> C	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь				
2	ZrC	HfC	Nb <sub>2</sub> C	W <sub>2</sub> C	TiN	Mo <sub>2</sub> N					
3	HfC	ZrC	W <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> N							
4	VC	V <sub>2</sub> C	TaC	MoC	VN	Ta <sub>2</sub> N	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь			
5	V <sub>2</sub> C	VC	TaC	MoC	ZrN	VN	Ta <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N			
6	Nb <sub>2</sub> N	TiC	Cr <sub>23</sub> C <sub>7</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь	Mo <sub>2</sub> C				
7	NbC	ZrC	HfC	W <sub>2</sub> C	TiN	ZrN	Mo <sub>2</sub> N				
8	TaC	VC	V <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	VN	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
9	Ta <sub>2</sub> C	HfN	TaN	W <sub>2</sub> N							
10	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	TiC	V <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> C	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь	NbC			
11	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	TiC	VC	Nb <sub>2</sub> C	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	VN	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
12	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> C	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	Сталь							
13	Mo <sub>2</sub> C	V <sub>2</sub> C	NbC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Сталь					
14	MoC	VC	V <sub>2</sub> C	NbC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	W <sub>2</sub> C	ZrN	VN	Ta <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N
15	W <sub>2</sub> C	ZrC	HfC	NbC	MoC	ZrN	Ta <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N	Mo <sub>2</sub> N		
16	WC	нет									
17	TiN	CrN	HfC	NbC	Ta <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> N					
18	ZrN	VC	V <sub>2</sub> C	MoC	W <sub>2</sub> C	VN	Ta <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N			
19	NbN	W <sub>2</sub> N									
20	VN	VC	V <sub>2</sub> C	TaC	MoC	Ta <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N				
21	V <sub>2</sub> N	нет									
22	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	NbN	BN								
23	NbN	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	BN								
24	Ta <sub>2</sub> N	VC	V <sub>2</sub> C	MoC	W <sub>2</sub> C	Zr <sub>2</sub> N	VN	Cr <sub>2</sub> N			
25	TaN	нет									
26	Cr <sub>2</sub> N	VC	V <sub>2</sub> C	MoC	W <sub>2</sub> C	Zr <sub>2</sub> N	VN	Ta <sub>2</sub> N			
27	CrN	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>									
28	Mo <sub>2</sub> N	CrC	HfC	W <sub>2</sub> C	TiN						
29	W <sub>2</sub> N	Ta <sub>2</sub> C	HfN	Сталь							
30	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	CrN									
31	BN	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	NbN								
32	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	VC	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	VN	Сталь			

Таблица 2 (продолжение 1)

№	Первое покрытие	Изменение стационарных температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму								
		от ± 10 до ± 20%								
1	TiC	VC	Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	VN						
2	ZrC	V <sub>2</sub> C	MoC	ZrN	Ta <sub>2</sub> N	CrN				
3	HfC	V <sub>2</sub> C	Ta <sub>2</sub> C	MoC	ZrN	Ta <sub>2</sub> N	TaN	Cr <sub>2</sub> N		
4	VC	TiC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	W <sub>2</sub> C	ZrN			
5	V <sub>2</sub> C	TiC	NbC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	W <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> N	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
6	Nb <sub>2</sub> N	VC	TaC	Cr <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	VN					
7	NbC	VC	V <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> C	MoC	VN	Ta <sub>2</sub> N	CrN		
8	TaC	TiC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C	MoC	ZrN	TaN	CrN	Сталь
9	Ta <sub>2</sub> C	нет								
10	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	VC	TaC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	VN					
11	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> C	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	MoC	Сталь				
12	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	TiC	V <sub>2</sub> C	NbC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	NbN	BN	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
13	Mo <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	NbN	BN	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
14	MoC	TiC	TaC	Mo <sub>2</sub> N	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
15	W <sub>2</sub> C	VC	V <sub>2</sub> C	TaC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> N	TiN	VN		
16	WC	нет								
17	TiN	MoC	W <sub>2</sub> C	ZrN	Cr <sub>2</sub> N	W <sub>2</sub> N				
18	ZrN	TiC	NbC	TaC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> N	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
19	NbN	нет								
20		TiC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>		ZrN	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь	
21	V <sub>2</sub> N	нет								
22	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C							
23	NbN	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C							
24	Ta <sub>2</sub> N	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiC	NbC	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> N	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
25	TaN	V <sub>2</sub> N								
26	Cr <sub>2</sub> N	TiN	NbC	TaC	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> C	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	BN	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> N
27	CrN	нет								
28	Mo <sub>2</sub> N	VC	V <sub>2</sub> C	MoC	ZrN	VN	Ta <sub>2</sub> N	TaN	Cr <sub>2</sub> N	
29	W <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N								
30	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	нет								
31	BN	нет								
32	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C							

Таблица 2 (продолжение 2)

№	Первое покрытие	Изменение стационарных температурных напряжений при переходе от первого покрытия ко второму							Число разреженных сочетаний	Сочетания с быстрорежущей сталью	
		от ± 20 до ± 30%									
1	TiC	V <sub>2</sub> C	MoC	NbN	TaN	BN			5	-	
2	ZrC	VC	TaC	Ta <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	VN			6	-	
3	HfC	VC	TaC	HfN	VN	W <sub>2</sub> N			9	-	
4	VC	ZrC	HfC	NbC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> N		12	I	
5	V <sub>2</sub> C	ZrC	HfC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN	Сталь	13	III	
6	Nb <sub>2</sub> N	V <sub>2</sub> C	MoC	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	NbN	Ta <sub>2</sub> N	BN		11	I	
7	NbC	TaC	Ta <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	TaN	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			5	-	
8	TaC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	W <sub>2</sub> C	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>					14	II	
9	Ta <sub>2</sub> C	ZrC	HfC	Mo <sub>2</sub> N					1	-	
10	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	V <sub>2</sub> C	MoC	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	NbN	Ta <sub>2</sub> N	BN		4	I	
11	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	W <sub>2</sub> C	ZrNa	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	NbN	BN			7	II	
12	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						4	I	
13	Mo <sub>2</sub> C	нет							8	I	
14	MoC	ZrN	HfC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN	Сталь	23	III	
15	W <sub>2</sub> C	TiC	Nb <sub>2</sub> C	Ta <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сталь		14	III	
16	WC	нет							Нет	Нет	
17	TiN	VC	V <sub>2</sub> C	TaC	HfN	VN	Ta <sub>2</sub> N		2	-	
18	ZrN	ZrC	HfC	Nb <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN	Сталь	9	III	
19	NbN	ZrC	HfC	W <sub>2</sub> C	TiN	Mo <sub>2</sub> N			4	-	
20	VN	ZrC	HfC	NbC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> N			7	II	
21	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N							1	-	
22	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Сталь						4	III	
23	NbN	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Сталь						3	III	
24	Ta <sub>2</sub> N	ZrC	HfC	V <sub>2</sub> C	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN	Сталь	16	III	
25	TaN	нет							Нет	-	
26	Cr <sub>2</sub> N	ZrC	HfC		Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Mo <sub>2</sub> C	TiN	Сталь	3	III	
27	CrN	нет							1	-	
28	Mo <sub>2</sub> N	TaC	Ta <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				12		
29	W <sub>2</sub> N	ZrC	HfC	TiN	CrN	Mo <sub>2</sub> N			7	I	
30	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	нет							Нет		
31	BN	N <sub>2</sub> C	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C	Сталь				5	III	
32	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> C	MoC	ZrN	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	Ta <sub>2</sub> N	NbN	Cr <sub>2</sub> N	BN	9	I

Таблица 3

№	Материал I покрытия	Покрытия, сочетающиеся для нестационарных и стационарных напряжений				Число сочетаний
1	TiC	нет				нет
2	ZrC	Hf <sub>2</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	VN	TaC	4
3	HfC	нет				Нет
4	VC	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				1
5	Nb <sub>2</sub> C	V C	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			2
6	NbC	нет				Нет
7	TaC	TiN				1
8	Ta <sub>2</sub> C	нет				Нет
9	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>				1
10	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>				1
11	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	нет				Нет
12	Mo <sub>2</sub> C	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>			2
13	W <sub>2</sub> C	Ta <sub>2</sub> C	Mo <sub>2</sub> C			2
14	WC	нет				Нет
15	TiN	нет				Нет
16	ZrN	TiN	V <sub>2</sub> C	Cr <sub>2</sub> N		3
17	HfN	W <sub>2</sub> C				1
18	VN	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>		3
19	V <sub>2</sub> N	Cr <sub>2</sub> N				1
20	от NbN <sub>0,9</sub> до NbN <sub>1,0</sub>	нет				Нет
21	NbN	Mo <sub>2</sub> C				1
22	Ta <sub>2</sub> N	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	NbC		3
23	TaN	нет				Нет
24	Cr <sub>2</sub> N	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>				1
25	CrN	нет				нет
26	Si <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	нет				нет
27	BN	нет				нет
28	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC				TiC



напряженного состояния при переходе от одного слоя покрытия к другому в динамическом и стационарном режимах работы деталей и режущего инструмента (РИ), выбраны сочетания слоев покрытий, работающих эффективно в условиях динамического, стационарного и смешанного действия температурных напряжений, для чего рассмотрены следующие вопросы:

1. Характер изменения напряженного состояния в зоне «покрытие - инструментальный материал» и в зоне перехода от одного покрытия к другому в нестационарном режиме резания (работа непрогретого инструмента или детали с нестационарными температурными полями, или работа многолезвийного инструмента).

2. Характер изменения напряженного состояния в тех же зонах в условиях, близких к стационарному резанию (минимальные градиенты температур в теле инструмента).

3. Принципы выбора многослойных и однослойных покрытий для режущего инструмента и экспериментальная проверка принципов на основе этих исследований.

В дальнейшем необходимо расширить гамму основных материалов деталей или материалов режущих инструментов, что даст возможность реализовать прогноз напряженного состояния для широкого круга основных материалов и материалов режущих инструментов (быстрорежущих сталей и твердых сплавов).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костюк Г.И., Тавалбех Х.А. Особенности конструирования эффективного режущего инструмента с многослойными покрытиями, связанные с его напряженным состоянием // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». К., 2001. № 40. С. 170-184.

2. Костюк Г.И., Мамлюк О.В., Шпаковский И.В. Тепловое и напряженное состояние инструмента с покрытием и упрочненным слоем при плазменно-механической обработке металлических композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2000. Вып. 17. С.180-185.

3. Костюк Г.И., Воляк Е.А., Костюк Е.Г. Влияние напряженного состояния в износостойких покрытиях и в зоне покрытие-деталь (РИ) на долговечность работы деталей и режущего инструмента // Авиационно-космическая техника и технология. Труды XI междунар. конф. «Новые технологии в машиностроении», Харьков - Рыбачье, 2002. С. 17.

4. Костюк Г.И., Син Юаньдун, Антонова О.О. Научные основы выбора многослойных и однослойных покрытий в деталях авиационной техники на основе исследования характера напряженного состояния // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2001. Вып. 24. С.159-169.

5. Костюк Г.И., Костюк Е.Г., Синь Юань Дун. Теплофизические и термомеханические аспекты механической обработки и стойкость режущего инструмента с одно- и многослойным покрытием и упрочненным слоем: Материалы II междунар. конф. «Прогрессивная техника и технология», 2001.

*Поступила в редакцию 24.03.03*

**Рецензенты:** д-р техн. наук, профессор Федорович О.Е., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; канд. техн. наук Полищук С.М., ООО «Энергоатом Харьков проект», г. Харьков.