

УДК 621.9.02

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ЗАЩИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

А. М. Айдарбеков¹, М. Ш. Мигранов², В. Р. Мухамадеев³

¹air_od@mail.ru, ²migmars@mail.ru, ³vener_muhamadeev@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 13 июля 2015 г.

Аннотация. Рассмотрен вопрос прогнозирования образования химических соединений в зоне резания. Исследована возможность образования оксидов и нитридов на поверхности режущего инструмента с износостойкими покрытиями.

Ключевые слова: покрытие, точение, инструмент, износ, температура резания.

ВВЕДЕНИЕ

Режущий инструмент является наиболее слабым звеном технологической системы, поэтому повышение его работоспособности остается одной из важнейших задач современного машиностроительного производства.

Использование металлорежущего инструмента с предварительно нанесенными тонкими (1–5 мкм) износостойкими покрытиями обеспечивает ряд важных преимуществ: повышение производительности обработки резанием на 20–200%, увеличение срока службы инструмента до 1,5–10 раз при обработке конструкционных сталей, до 4 раз – при резании коррозионноустойчивых и жаропрочных сталей, в 1,5–2,5 раза – при обработке титановых и никелевых сплавов. Кроме того, достигается снижение расхода сложнопрофильного инструмента вследствие уменьшения количества его переточек. Однако не всегда применение покрытий для режущего инструмента экономически обоснованно и приводит к ожидаемому эффекту.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В настоящее время аналитические расчеты параметров процесса резания проводятся с помощью большого числа эмпирических выражений, а повышение технологической эффективности достигается преимущественно экспериментальным путем. Вместе с тем некоторые наблюдаемые физические закономерности не имеют

объяснения с точки зрения механики и физики твердого тела. Также незначительное внимание уделяется определению и предварительному прогнозированию химических процессов, происходящих в зоне резания при использовании износостойких покрытий, позволяющих при определенных температурно-силовых условиях обеспечить образование вторичных структур с смазывающими и защитными свойствами на поверхности режущего инструмента. В большинстве случаев именно образование таких структур является доказательной базой для объяснения причины увеличения износостойкости режущего инструмента, уменьшения трения в зоне контакта и других факторов, благоприятно влияющих на процесс резания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Согласно [1], образованию химического соединения свидетельствует изменение энергии Гиббса, значение которой показывает возможность протекания химических реакций с образованием тех или иных соединений.

Изменение энергии Гиббса для процесса, протекающего при нормальных условиях и при постоянной температуре, определяется уравнением [2]:

$$\Delta G_{298^\circ} = \Delta H_{298^\circ} - T \cdot \Delta S_{298^\circ}, \quad (1)$$

где ΔG_{298} – изменение энергии Гиббса, кДж/моль; ΔH_{298} – изменение энтальпии,

кДж/моль; ΔG_{298} – изменение энтропии, Дж/К·моль; T – температура, °К.

В случае механической обработки ясно, что изменение энергии Гиббса, а следовательно? и какие-либо химические реакции будут протекать при достижении определенной температуры. Тогда изменение энергии Гиббса примет вид:

$$\Delta G_T = \Delta H_T - T \cdot \Delta S_T. \quad (2)$$

В свою очередь изменение энтальпии и энтропии при определенной температуре выражаются уравнениями [1]:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298^\circ} + \int_{298^\circ}^T \Delta C_p(T) dT, \quad (3)$$

$$\Delta S_T = \Delta S_{298^\circ} + \int_{298^\circ}^T \frac{\Delta C_p(T)}{T} dT. \quad (4)$$

После преобразования и интегрирования, получили:

$$\Delta G_T = \Delta G_{298^\circ} + \left[\begin{aligned} & (\alpha_0 T + \frac{\alpha_1 T^2}{2} - \alpha_{-2} T^{-1}) \Big|_{298^\circ}^T - \\ & - T \left((\alpha_0 \ln T + \alpha_1 T - \frac{\alpha_{-2} T^{-2}}{2}) \Big|_{298^\circ}^T \right) \end{aligned} \right]. \quad (5)$$

Выражение (5) показывает необходимость создания базы данных значений энергии Гиббса известных в настоящее время. В противном случае необходимы конкретные теоретические расчеты определения энергии Гиббса. Также выражение (5) сводит к тому, что основным фактором протекания реакции будет определено конкретным значением температуры в зоне резания.

Опубликовано много теоретических методов определения температуры резания. Однако лишь в теориях А. Н. Резникова и С. С. Силина эти методы изложены настолько полно, что их можно использовать для расчетов. Но и у А. Н. Резникова, и у С. С. Силина недостаточно четко определена область применения предложенных методов расчета [3]. При анализе их методов было установлено, что они могут быть использованы для расчета температуры резания, однако имеют существенные ограничения. В частности, при расчете по методу С. С. Силина необходимо следить, чтобы параметр В был не менее 0,4. При расчете температуры методом А. Н. Резникова необходимо учитывать, что этот метод применим для материалов, дающих сливную стружку [3].

Так как больший интерес представляет образование сливной стружки, кратко рассмотрим метод А. Н. Резникова:

$$a = S \sin \varphi; b = \frac{t}{\sin \varphi};$$

где a, b – параметры сечения среза, мм; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об; φ – угол инструмента в плане, град.

$$F_{T3} \approx N_{T3} \approx 0,252 \sigma_b b l_3,$$

где F_{T3} – сила трения по задней поверхности резца, кг; N_{T3} – нормальная сила по задней поверхности резца, кг; σ_b – предел прочности обрабатываемого материала, кг/мм²; l_3 – длина контакта по задней поверхности резца, мм.

$$q_0 = 6,25 \frac{P_{NO} \cos \gamma + P_{ZO} \sin \gamma V}{b l_n k'}$$

где q_0 – интенсивность теплового потока на надрезочной стороне стружки, кал/см²·с; $P_{NO}=P_N-N_3$, $P_{ZO}=P_Z-F_{T3}$ – составляющие силы резания, кг; l_n – длина контакта по передней поверхности резца, мм; V – скорость резания, м/мин; k – усадка стружки.

$$q_1 = 1,95 \sigma_b V,$$

где q_1 – тепловой поток на задней поверхности резца, кал/см²·с.

$$\sin \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{k^2 - 2k \sin \gamma + 1}},$$

где β_1 – угол сдвига, град; γ – передний угол, град.

$$q_d = 3,9 \frac{V \sin \beta_1}{abk} [P_{ZO}(k - \sin \gamma) - P_{NO} \cos \gamma],$$

где q_d – теплота деформации, кал/см²·с.

$$Pe_d = \frac{Va}{6\omega}; Pe = \frac{Vl_n}{6k\omega},$$

где Pe_d и Pe – безразмерные критерии Пекле для источников эквивалентного теплоте деформации и трения надрезочной стороны стружки соответственно, ω – коэффициент температуропроводности, см²/с.

$$b^* = \left(1 + 1,33 \frac{k \sqrt{\sin \beta_1}}{\sqrt{Pe_d}} \right)^{-1},$$

где b^* – относительное количество теплоты деформации, уходящее со стружкой.

$$\varphi' = 1,33 \cdot 10^{-2} \frac{Va^2}{\omega d},$$

где φ' – безразмерный критерий; d – диаметр изделия, мм.

$$R = \frac{Pe k^2 a^2}{l_n},$$

где R – безразмерный критерий.

$$\theta_d = 0,6 \frac{\omega k}{\lambda V} b q_d,$$

где θ_d – температура деформации, °С; λ – удельная теплопроводность детали, кал/см·с·°С.

$$\theta_{csp} = 0,195 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \sqrt{\frac{k l_n}{V}} (q_0 T_{1cp} - 1,41 q_n T_{2cp}) + (1 + c^*) \theta_d,$$

где $\theta_{\text{ср}}$ – средняя температура на контактной поверхности стружки, °С; $T_{1\text{ср}}, T_{2\text{ср}}$ – функции, используемые для расчета контактной площади стружки; q_n – тепловой поток на передней поверхности, кал/см²·с; c – коэффициент, учитывающий перенос теплоты в стружку.

$$\theta_{\text{иср}} \approx (1 + c^*)\theta_{\text{д}}T_{\text{иср}} + 0,1\frac{\sqrt{\omega}}{\lambda}\sqrt{\frac{l_1}{V}}(q_1 - 1,82q_3),$$

где $\theta_{\text{иср}}$ – средняя температура на контактной поверхности изделия, °С; $T_{\text{иср}}$ – функция, используемая для расчета температуры контактной площади; q_3 – тепловой поток на задней поверхности, кал/см²·с.

$$\eta_1 = \frac{b}{l_n}, \eta_2 = \frac{b}{l_3},$$

где η_1, η_2 – безразмерные коэффициенты.

$$N_1 = B\left(\frac{l_3}{l_n}\right)G(\eta_1); N_2 = B\left(\frac{l_n}{l_3}\right)G(\eta_2),$$

где N_1, N_2 – безразмерные функции; G – функция, зависящая от η ; $B\left(\frac{l_3}{l_n}\right); B\left(\frac{l_n}{l_3}\right)$ – безразмерные функции.

$$\theta_{\text{нср}} = \frac{q_n l_n}{\lambda_p} M_1 + \frac{q_3 l_3}{\lambda_p} M_2,$$

где $\theta_{\text{нср}}$ – среднее значение температуры на контактной площадке передней поверхности реза, °С; M_1 – функция, зависящая от угла заострения инструмента; λ_p – удельная теплопроводность реза, кал/см·с·°С.

$$\theta_{\text{зср}} = \frac{q_n l_n}{\lambda_p} N_1 + \frac{q_3 l_3}{\lambda_p} M_2,$$

где $\theta_{\text{зср}}$ – среднее значение температуры на контактной площадке задней поверхности реза, °С; M_2 – функция, зависящая от угла заострения.

$$\theta_p = \frac{\theta_{\text{нср}} l_n + \theta_{\text{зср}} l_3}{l_n + l_3},$$

где θ_p – температура резания.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей влияния на износостойкость инструментального материала с многослойными покрытиями в зависимости, во-первых, от химического состава и кристаллохимического строения, во-вторых, технологии получения этих покрытий, в-третьих, при лезвийной обработке различных материалов в широком диапазоне изменения элементов режима резания. Стойкостные и температурные испытания проводили на универсальном токарном станке нормальной жесткости 16К20, оборудованном тиристорным преобразователем для бесступенчатого регулирования частоты вращения. Для экспериментальных исследований при точении использовались заго-

товки из стали 40Х из одной партии материалов. При точении использовались заготовки диаметром 70–120 мм и длиной 300–400 мм, предварительно обточенные и зацентрованные с обеих сторон. Заготовки зажимали в самоцентрирующемся трехкулачковом патроне с изоляционными прокладками и поджимали вращающимся центром, установленным в пиноли задней бабки станка. Точение проводилось резцами со сменными четырехгранными твердосплавными пластинами ВК8 с нанесенными на них покрытиями: TiN, N+TiN, (TiCr), (AlTi)N, (TiAl)N, (TiAlCr)N. Большинство экспериментальных данных по износу и стойкости режущих инструментов получены путем непосредственного наблюдения и измерения зон износа на резце. При этом, как показали предварительные эксперименты и анализ литературных данных [4], в условиях чистового и получистового резания определяющим элементом износа инструмента является фаска износа по его задней поверхности. Анализ профиля износа задней поверхности, выполненный в исследовании [5], показал, что наименьшей изменчивостью результатов измерения износа характеризуется средний износ задней поверхности вдоль главной режущей кромки. Этот параметр при постоянных значениях переднего и заднего углов режущего клина отражает размерную износостойкость инструмента. Исходя из вышеизложенного, в качестве исследуемого параметра износа инструмента использовалась средняя ширина фаски износа задней поверхности (без учета выемок). Ширину h_3 фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью отсчетного микроскопа МИР–2М с насадкой МОВ–15 точностью отсчета до 0,002 мм. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента согласно рекомендациям [5], повторялись 4–5 раз при отклонениях не более 8%. Для расчета температуры резания по методу А. Н. Резникова и дальнейшего сравнения с экспериментальными результатами было разработано Windows-приложение в среде Delphi, которое позволило сократить временные затраты и увеличить точность результатов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе выполнения исследований были получены следующие результаты (табл. 1).

Точение проводили при подаче $s=0,11$ мм/об и глубине резания $t=0,5$ мм. На рис. 1 представлен график зависимости износа по задней поверхности от длины пути резания.

Таблица 1

BK8(без покрытия)		BK8+TiN		BK8+(Ti,Al,Cr)N	
h _з	l	h _з	l	h _з	l
0,146	1003	0,08	157	0,082	267
0,162	2196	0,112	314	0,118	801
0,175	2557	0,118	943	0,124	1068
0,194	2919	0,122	1254	0,134	1596
0,216	4354	0,126	1409	0,19	2642
0,223	5419	0,136	1564	0,22	2903
0,256	6123	0,166	2187	0,23	3160
0,276	7521	0,196	2494	0,234	3418
0,288	7867	0,268	2803	0,254	3676
0,31	8213	0,366	3110	0,27	3933
BK8+(Ti,Cr)N		BK8+(Al,Ti)N		BK8+(Ti,Al)N	
h _з	l	h _з	l	h _з	l
0,084	1103	0,126	1367	0,076	408
0,112	2196	0,144	1706	0,108	814
0,12	2557	0,16	2381	0,146	1219
0,134	2919	0,176	3387	0,154	1624
0,16	4354	0,192	3720	0,19	2026
0,19	5419	0,2	4053	0,228	2428
0,22	6123	0,236	5042	0,236	2831
0,256	7521	0,258	5369	0,25	3230
0,28	7867	0,274	6022	0,296	3629
0,292	8213	0,296	6670	0,318	4028

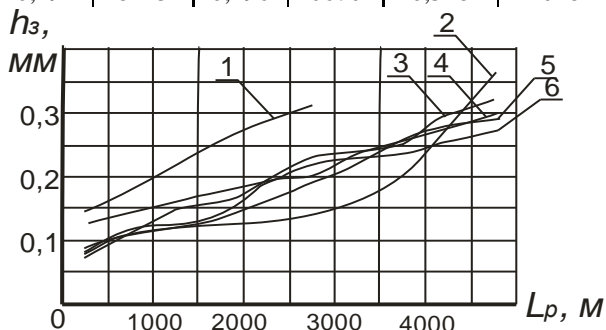


Рис. 1. Зависимость $h_z=f(L_p)$:
1-BK8; 2-BK8+TiN; 3-BK8+(Ti,Al)N; 4-BK8+(Ti,Al,Cr)N;
5-BK8+(Al,Ti)N; 6-BK8+(Ti,Cr)N

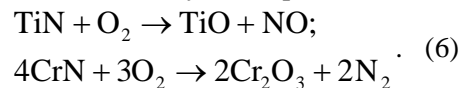
По результатам проведенных исследований выявлено:

- наиболее стойкими покрытиями из рассмотренных являются (Al,Ti)N и (Ti,Cr)N;
- износостойкость твердосплавных пластин с покрытиями при точении, в сравнении с основой, в исследуемом диапазоне режимов обработки выше в 2,5–3 раза;
- образование вторичных структур оксидных пленок благоприятно влияет на уменьшение износа режущего инструмента.

ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве примера рассмотрим возможность окисления TiN и CrN, входящих в состав

покрытий, и создание тонких поверхностных оксидных пленок в условиях эксплуатации режущего инструмента [6]. Преобразование компонентов нитрида титана и нитрида хрома можно представить в виде следующих реакций:



Термодинамическое представление этих процессов подтверждается следующим фактом. При температуре, достигающей 823K в зоне резания, развитие кислородосодержащих фаз на основе титана и хрома из нитридов сопровождается уменьшением энергии Гиббса. Термодинамическая возможность уравнений реакций окисления (6) при 823K была подсчитана на основе термодинамических данных табл. 2.

Таблица 2

Термодинамические параметры		
Соединения	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/К·моль
TiO	-173,2	24,73
TiN	1311	7,193
CrN	-123,4	52,7
Cr ₂ O ₃	-1140,6	81,2
NO	90,2	210,6

Расчетные величины изменения энергии Гиббса для уравнений реакций (6) $\Delta G_{823}^0 < 0$. Отрицательные величины свободной энергии образования (ΔG_{D}^0) для TiO и для Cr₂O₃ из нитрида титана TiN и нитрида хрома CrN свидетельствует, что оба соединения свободно преобразуются в более термодинамически устойчивые фазы в условиях атмосферы рабочей температуры окисления.

Таким образом, данный метод подтверждает возможность аналитического прогнозирования образования химических соединений в процессе резания, которые благоприятно влияют на уменьшение износа инструмента. Недостатком данного метода является сложный и громоздкий математический аппарат. Выходом из этой ситуации является создание Windows-приложений, которые приведут к уменьшению временных затрат и позволят варьировать некоторыми параметрами с целью достижения конкретных результатов.

ВЫВОДЫ

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- установлено, что определяющим фактором образования химических соединений с защит-

ными свойствами на режущем инструменте с износостойким покрытием является температура резания;

– разработано Windows-приложение в среде Delphi для расчета температуры резания с целью дальнейшего использования для расчета энергии Гиббса;

– для реакции, протекающей с увеличением энтропии, повышение температуры уменьшает энергию Гиббса (то есть благоприятствует протеканию процесса). Для реакции, протекающей с уменьшением энтропии, повышение температуры препятствует протеканию процесса. Это приводит к тому, что некоторые вещества при определенных температурах образуют соединения в виде рутила со смазывающим эффектом, а при других температурах – соединения в виде керамики, повышающие износостойкость инструмента;

– износостойкость твердосплавных пластин с покрытиями при точении, в сравнении с основой, в исследуемом диапазоне режимов обработки выше в 2,5–3 раза (рис. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шустер Л. Ш., Криони Н. К., Шолом В. Ю., Мигранов М. Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке: моногр. М.: Машиностроение, 2008. 318 с. [Shuster L.S., Krioni N.K., Sholom V.Yu., Migranov M. Sh. Coating and lubrication in moving vysokotemperaturnykh mates, and metallobrabotka. M. Mashinostroenie, 2008].

2. **Никифоров П. Н., Ганеев А. А.** Руководство к решению задач по дисциплине «Физико-химические основы литейного производства»/Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. П. Н. Никифоров, А. А. Ганеев. Уфа, 2005. 28 с. [Nikiforov P.N., Ganeyev A.A. A guide to solving problems in the discipline "Physico-chemical bases of the foundry"/USATU; Comp. Nikiforov P.N., Ganeyev A.A. Ufa, 2005].

3. **Пушных В. А., Билик В. Л.** Сравнение двух методов расчета температуры резания. // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 3. с. 102-104. [Pushnykh V.A., Bilik V.L.. Comparing the two methods of calculation of temperature of cutting // Izvestia of Tomsk Polytechnic University. 2004. V. 307. n. 3. 102-104 p.].

4. **Макаров А. Д.** Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение. 1966. 264 с. [Makarov A.D. The wear and durability of cutting tools. M. Mashinostroenie, 1966].

5. **Макаров А. Д.** Износ твердосплавного инструмента при резании жаропрочных сплавов / А.Д. Макаров, В.С. Мухин, Н.В. Воронин // Станки и инструмент. 1974. №2. С. 26–28. [Makarov A.D. Wear of carbide tools in cutting high-temperature alloys / Makarov A.D., Mukhin V.S., Voronin N.V. // Machines and Tooling. 1974. №2. p. 26-28].

6. **Мигранов М.Ш.** Повышение износостойкости инструментов на основе прогнозирования процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов. Дис. д-р техн. наук. Москва, 2007. 328 с. [Migranov M. Sh. The increase of wear resistance of tools on the basis of forecasting

of processes of adaptation of the friction surfaces when cutting metals. Thesis abstract for the degree of doctor of technical Sciences. Moscow, 2007].

ОБ АВТОРАХ

Айдарбеков Айрат Минетдинович, нач. ОВР. Дипл. инж. по машинам и технол. обр. металлов давлением (УГАТУ, 2006). Иссл. в области износостойкости штамповой оснастки.

Мигранов Марс Шарифуллович, проф. зав. каф. ОК-МиМ, дипл. инж.-мех. (1987, УАИ). Д-р техн. наук по процессам мех. и физ.-техн. обработки (защ. в РУДН, 2007). Иссл. в обл. триботехн., износостойкости режущего инструмента и повышения эффективности лезвийной обработки резанием.

Мухамадеев Венер Рифкатович, стар. препод. каф. ОКМиМ. Дипл. маг. техн. и технол. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. износостойкости режущего инструмента.

METADATA

Title: Prediction of chemical education compounds with protective properties on the tool when cutting metals.

Authors: A.M. Aidarbekov, M.Sh. Migranov, V.R. Muhamadeev.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University(USATU), Russia.

E-mail: air_od@mail.ru, migmars@mail.ru, vener_muhamadeev@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 4 (70), pp. 3-7, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The question of predicting the formation of chemical compounds in the cutting zone. Investigated the possible formation of oxides and nitrides on the surface of cutting tools with wear-resistant coatings.

Key words: Coating, turning, tool wear, cutting temperature.

About authors:

AIDARBEKOV, Airat Minnetdinovich, head of division inside regime. Chartered engineer machines and technology of pressure metal treatment (USATU, 2006). Area of research in the field of wear resistance of die tooling.

MIGRANOV, Mars Sharifullovich, professor, head of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Dipl. engineer-mechanic (UAI, 1987). Area of research in the field of tribo-logy, the wear resistance of the cutting tool and improve the efficiency of the blade machining process.

MUHAMADEEV, Vener Rifkatovich, senior lecturer of the department of bases of constructing of mechanisms and machines of USATU. Mag.-ing. (USATU, 2007). Area of research in the field of wear resistance of the cutting tool.