

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

621.9.025.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ С ПОЗИЦИЙ ТЕРМОДИНАМИКИ И САМООРГАНИЗАЦИИ

Канд. техн. наук, доц. М.Ш. МИГРАНОВ

Приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований изнашивания режущих инструментов и покрытий с прогнозируемой адаптацией поверхностей трения на основе термодинамики неравновесных процессов. Предложены способы повышения износостойкости режущего инструмента и производительности лезвийной обработки резанием.

Results of theoretic-experimental researches of cutting tools wear process and coverings with predicted adaptation of friction surfaces on the basis of thermodynamics of nonequilibrium processes are resulted. Ways of increase of the cutting tool wear resistance and productivity machining processing by cutting are offered.

Для совершенствования процесса резания наиболее важен режущий инструмент, так как именно он в значительной мере определяет полноту использования технических возможностей современных мехатронных систем, оснащенных высокоскоростным оборудованием с дорогостоящим микропроцессорным управлением (ЧПУ и АДСУ), а также сроки их окупаемости. Поэтому основные наши исследования были связаны с совершенствованием режущих инструментов. Как показал обзор научно-технической литературы по интенсификации лезвийной обработки, в настоящее время в машиностроении еще не нашли широкого применения инструментальные материалы и покрытия с прогнозируемой адаптацией поверхностей трения (ПАПТ), которые с учетом условий резания (управляемой переменности элементов режима резания, СОТС и др.) позволяют повысить износостойкость инструмента за счет неравновесных процессов и взаимодействия необратимых процессов при трении в процессе резания металлов. Произошло это из-за недостаточной изученности вопросов, связанных со структурно-фазовой адаптацией приповерхностных слоев на подвижном фрикционном контакте «инструмент — деталь», что затрудняет практическое использование этого явления.

Известно, что основные процессы при трении концентрируются в тонком приповерхностном слое. Представляет научный и практический интерес термодинамические аспекты состояния этого слоя и связь изнашивания с этим состоянием. В [1 — 5] показано, что любую трибосистему следует рассматривать как открытую неравновесную термодинамическую систему; в этих работах сформулирован принцип вторичной диссипативной гетерогенности, согласно которому в процессе трения происходят явления структурной приспособляемости (адаптации) контактирующих материалов, при которых все виды взаимодействия тел локализуются в тонкопленочном объекте — вторичных структурах (ВС). В соответствии с этим принципом вторичные структуры необходимы для рассеяния энергии при ее переходе из зоны трения в трущиеся тела, причем, рассеяние энергии должно происходить с наименьшей скоростью прироста энтропии. Вторичные структуры выполняют защитные функции, ограни-

чивая распространение взаимодействия внутри трущихся тел и снижая интенсивность этого взаимодействия, поэтому их появление соответствует принципу Ле Шателье [3, 5].

В данном исследовании рассмотрена трибосистема «инструмент — обрабатываемый материал», во вторичных структурах которой проходят следующие основные термодинамические потоки: поток тепла, поток вещества, поток физико-химических превращений и поток дополнительных воздействий (применение СОЖ, нестационарность режимов резания и т.п.). Изучая изменение производства энтропии одного из контактирующих тел — режущего инструмента — при резании металлов, вначале предположили, что в ВС трущихся поверхностей инструмента проходят только два термодинамических потока: поток тепла и поток вещества. Тогда изменение производства энтропии ВС со временем в рассматриваемой системе (без учета взаимосвязи потоков между собой) равно

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{dS_q}{dt} + \frac{dS_m}{dt} \quad (1)$$

где $\frac{dS_q}{dt}$ — изменение производства энтропии теплового потока,

$$\frac{dS_q}{dt} = J_q X_q, \quad (2)$$

здесь J_q — поток тепла, $X_q = (\text{grad } T)/T^2$ — термодинамическая сила, вызывающая поток тепла (T — температура), по закону переноса теплоты Био-Фурье $J_q = -\lambda \text{grad } T$ (λ — теплопроводность). После соответствующих подстановок и преобразований выражение (2) примет вид

$$\frac{dS_q}{dt} = \frac{(f_m p_r V X)^2}{\lambda T^2} \quad (3)$$

Изменение энтропии потока вещества в ВС можно представить как:

$$\frac{dS_m}{dt} = f_m p_r V Y \frac{m_c}{DT}, \quad (4)$$

где J_m — поток переноса вещества; X_m — термодинамическая сила, вызывающая поток вещества; $X_m = (\text{grad } C)/T$ (C — концентрация вещества). По закону переноса вещества Фика $J_m = m_c - D \cdot \text{grad } C$ (D — коэффициент диффузии).

После подстановки выражений (3), (4) в (1), получим

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{(f_m p_r V X)^2}{\lambda T^2} + f_m p_r V Y \frac{m_c}{DT} \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по скорости резания V (скорости скольжения) как независимой переменной рассматриваемой трибологической системы и приравнявая результат к нулю, после уточнения получим зависимость для расчета линейной интенсивности изнашивания

$$J_h = \frac{2Xk}{Y} \frac{\tau_m D_{cp}}{\lambda_{cp} T \rho}, \quad (6)$$

где k — коэффициент пропорциональности; ρ — плотность вещества изношенных частиц; λ_{cp} — среднее значение коэффициента теплопроводности; τ_m — прочность адгезионных связей на срез.

Из (6) видно, что интенсивность изнашивания инструментов по задней поверхности в значительной мере определяется температурными зависимостями $\tau_{mn}(T)$. Формула (6) является аналитическим выражением интенсивности изнашивания режущих инструментов, которое получено из условия устойчивости стационарного состояния с минимальным производством энтропии на фрикционном контакте «инструмент — обрабатываемый материал».

Известно [5]: если механическая энергия трения является единственным источником изменения производства энтропии, то термодинамическая система не теряет устойчивости. Для возможности прохождения самоорганизации необходимо более одного независимых источника диссипации энергии. Как показано в [6], ими могут быть несамопроизвольные химические реакции, инициируемые трением. Следовательно, при температурах резания $T_{хар}$ и выше на фрикционном контакте могут появляться новые источники диссипации энергии: несамопроизвольные химические реакции, инициируемые трением, с избыточным производством энтропии, часть которого может стать отрицательной величиной (в зависимости от вида происходящих химических реакций).

Тогда изменение производства энтропии ВС со временем в трибосистеме с учетом физико-химических превращений будет равно

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{dS_q}{dt} + \frac{dS_m}{dt} + \frac{dS_\phi}{dt}. \quad (7)$$

Если во вторичных структурах трибосистемы «инструмент — обрабатываемый материал» проходят в общем случае термодинамические потоки тепла, вещества, физико-химических превращений и дополнительных воздействий, то изменение производства ВС со временем, после уточнения составляющих зависимости (7), будет равно

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{(f_m p_r V X)^2}{\lambda T^2} - \left| f_m p_r V Y \frac{m_c}{DT} \right| \pm \left| f_m p_r V Z \frac{V_x}{L_{11} T} \right| + J_b X_b, \quad (8)$$

где J_b — поток дополнительных воздействий; X_b — термодинамическая сила, вызывающая поток дополнительных воздействий. Конкретизация величин J_b и X_b зависит от вида применяемых дополнительных воздействий. Это составляющая производства энтропии в общем случае не зависит от характеристик трения на фрикционном контакте.

Поэтому для прогнозируемой адаптации поверхностей трения и снижения интенсивности изнашивания необходимо применять инструментальные материалы и износостойкие покрытия, содержащие химические элементы и соединения, способные в определенных условиях вступать в химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом и с окружающей средой, создавать неравновесные вторичные структуры с отрицательным производством энтропии. Дополнительные воздействия на зону резания (применение СОЖ, нестационарность элементов режима резания и т.п.) должны способствовать этому [7].

Представленные экспериментальные результаты подтверждают возможность прохождения самоорганизации при температурах резания $T_{хар}$ и выше и образование на фрикционном контакте «инструмент — обрабатываемый материал» неравновесных диссипативных структур. Вторичные структуры представляют собой тонкие пленки на поверхности трения, которые создаются в условиях высокой деформации при температурах нагревания, вызывающих диффузию при адсорбции, а также при различных реакциях разложения и ассимиляции.

Возможность окисления TiC и BN и создание тонких поверхностных оксидных пленок в условиях эксплуатации спеченных порошковых инструментальных материалов (СПИМ) на основе быстрорежущей стали рассматривались с точки зрения термодинамики необратимых процессов при трении и изнашивании.

Преобразование компонентов карбида титана и нитрида бора можно представить в виде предполагаемых реакций:



Термодинамическое представление этих процессов подтверждается следующим фактом. При температурах, достигающих 823 К в зоне резания, развитие кислородосодержащих фаз на основе титана и B_2O_3 из карбидов и нитридов сопровождается уменьшением энергии Гиббса ΔG°_r . Расчетные величины изменения энергии Гиббса для уравнений реакций (9) и (10) $\Delta G^\circ_{823} < 0$ и составляли соответственно — 72,58 кДж/моль и — 1589,9 Дж/моль. Отрицательные величины свободной энергии образования (ΔG°_r) для TiO и B_2O_3 из карбида TiC и нитрида BN свидетельствуют о том, что оба соединения свободно преобразуются в более термодинамически устойчивые фазы в условиях атмосферы и рабочей температуры окисления.

На основе изложенного выше рассматриваются некоторые подходы воздействия на условия трения при резании металлов путем дополнительного легирования СПИМ на основе быстрорежущей стали.

Первый подход предполагает снижение уровня триботехнических характеристик благодаря уменьшению коэффициента трения при рабочих температурах. Установлено, что СПИМы на основе быстрорежущей стали, легированные карбидом титана, обладают высокой износостойкостью и их можно классифицировать как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов. В частности, к таковым можно отнести СПИМы, содержащие в качестве твердой основы карбид титана, а быстрорежущую сталь (Р6М5) — как связующее (СПИМ + 20% TiC). При помощи ОЭС и ВИМС было обнаружено, что в процессе резания карбиды титана превращаются в тонкие поверхностные пленки в виде соединения титана с кислородом. Это значительно улучшает фрикционные свойства при рабочих температурах резания (рис. 1) и повышает износостойкость режущего инструмента (рис. 2). Как показали исследования, износостойкость такого инструмента в 2—3,5 раза выше износостойкости обычных инструментов из быстрорежущей стали.

Суть второго подхода состоит в повышении экранирующего эффекта с помощью устойчивой высокопрочной вторичной структуры (простых и сложных кислородосодержащих фаз на основе титана и бора), появляющейся на поверхности инструмента, что достигается, например, с помощью дополнительной присадки 2 % BN. Дополнительная присадка 5% Al_2O_3 практически не повлияла на состав вторичных структур. Легирование осуществлялось не добавлением того или иного элемента, а добавлением соединений нужной плотности и неустойчивости при рабочих температурах, что позволило использовать соединения в относительно небольших количествах, с минимально возможным воздействием на качество объема. Применение обоих принципов позволяет значительно увеличить износостойкость инструмента (например, с помощью присадки 20 % TiCN (рис. 3)).

Дальнейшее совершенствование режущих свойств инструментов возможно за счет применения многослойных износостойких покрытий, при этом каждый слой такого

покрытия должен формироваться с учетом изменения механизма изнашивания в периоды приработочного, нормального (устойчивого) и катастрофического износа.

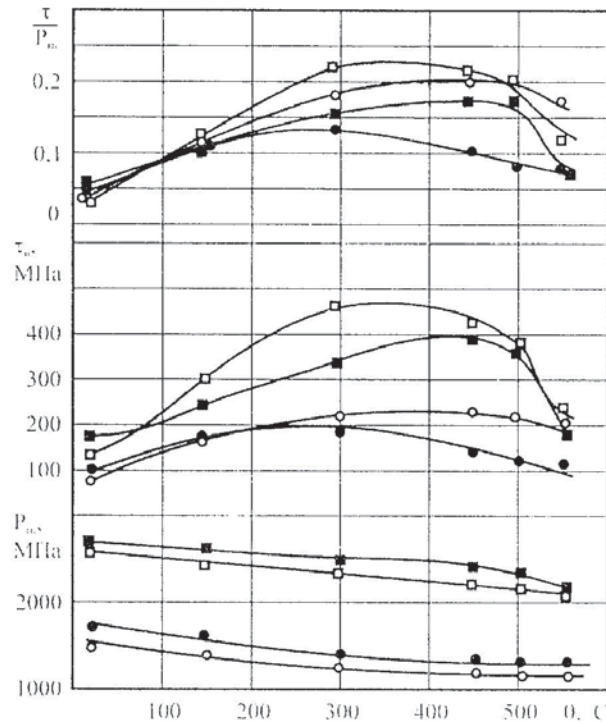


Рис. 1. Влияние температуры на триботехнические свойства материалов: ● ■ — СПИМ (P6M5 + 20% TiC); ○ ● — Сталь 45 (HB 180...200); ○ □ — P6M5; □ ■ — Сталь 45 (HRC 30..32)

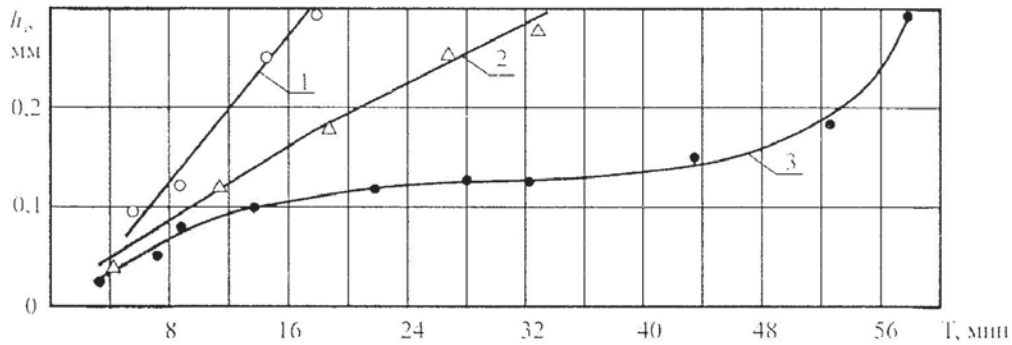


Рис. 2. Влияние времени обработки на износ режущего инструмента по задней поверхности при точении стали 45 (HB 180...200), $V = 60$ м/мин; $t = 0,5$ мм; $S = 0,2$ мм/об: 1 — P6M5; 2 — P12M3Ф2К5; 3 — СПИМ (P6M5 + 20% TiC)

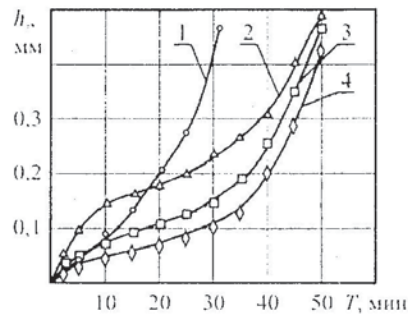


Рис. 3. Влияние времени обработки на износ по задней поверхности концевой фрезы диаметром 12 мм: 1 — СПИМ (P6M5 + 20% TiC); 2 — СПИМ (P6M5 + 20% TiC + 2% BN); 3 — СПИМ (P6M5 + 15% TiC + 5% Al₂O₃); 4 — СПИМ (P6M5 + 20% TiCN) (обрабатываемый материал сталь 40X; $V = 65$ м/мин; $S_m = 63$ мм/мин; $t = 3$ мм; $b = 10$ мм)

В целом по результатам исследований установлено, что СПИМы на основе быстрорежущей стали, дополнительно легированные карбидом титана, обладают высокой износостойкостью и могут рассматриваться как новый класс самоорганизующихся инструментальных материалов. В процессе резания наблюдается преобразование карбидной фазы в устойчивые вторичные структуры, имеющие форму соединений из титана и кислорода, что способствует значительному улучшению фрикционных свойств при рабочих температурах и приводит к повышению износостойкости режущего инструмента в 2,0—3,5 раза по сравнению с износостойкостью инструмента из обычных быстрорежущих сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бершадский Л. И. Структурная термодинамика трибосистем / Л.И. Бершадский. — Киев: Знание, 1990. — 253 с.
2. Гершман И. С., Буше Н. А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. — 1995. — Т. 16, № 1. — С. 61—70.
3. Пригожин И., Кондипуди Д. Современная термодинамика. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
4. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии. — М.: Металлургия, 1974. — 230 с.
5. Мигранов М. Ш., Шустер Л. Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. — М.: Машиностроение, 2005. — 202 с.