

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.9.025.7

М. Ш. МИГРАНОВ, Л. Ш. ШУСТЕР

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
АДАПТАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ
ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

На основе термодинамики неравновесных процессов разработана модель, позволяющая прогнозировать износостойкость и другие триботехнические параметры тяжело нагруженных высокотемпературных сопряжений. *Трибосистема; вторичные структуры; приспособляемость; адаптация; энтропия; диссипация энергии; термодинамическая сила; несамопроизвольные химические реакции*

ВВЕДЕНИЕ

Механизм износа режущего инструмента весьма сложен. По существующим представлениям в зависимости от условий резания инструмент может подвергаться адгезионному, абразивному, диффузионному, химическому, окислительному и другим видам износа [1–3]. В процессе резания вследствие изнашивания инструмента происходит непрерывное изменение пространственной формы контактных поверхностей. Это, в свою очередь, даже при обработке без применения СОТС и износостойких покрытий с постоянными значениями элементов режима резания может привести к изменению распределения напряжений и температур в зоне фактического контакта и в целом оказать существенное влияние на интенсивность изнашивания режущего инструмента. Таким образом, изнашивание контакта и распределение удельных нагрузок и температур являются взаимообусловленными процессами, что необходимо учитывать при разработке аналитических зависимостей для расчета интенсивности износа при использовании тех или иных методов интенсификации процесса лезвийной обработки резанием [4].

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Одним из основных источников тепла и факторов формирования приповерхностных слоев при резании является трение. Так как оно происходит при высокой температуре в условиях ювенильности контакта и наличия пластических деформаций, то в адгезионных процес-

сах доминирует адгезионная (молекулярная) составляющая [1, 2]. Поскольку при трении происходит превращение энергии, то естественно рассматривать его с помощью термодинамики. Износ рассмотрен в этой работе с привлечением основного понятия термодинамики необратимых процессов – производства энтропии. Анализ состояния, далекого от равновесия, проведен с привлечением понятий о накопленной энергии, энтропии состояния системы, производства энтропии. Если подводимая к системе энергия не успевает рассеиваться равномерно, в скользящих телах ожидается появление и рост неоднородных структур, влияющих на состояние контактирующих поверхностей. При этом энтропия может уменьшаться, и система будет сдвигаться в неравновесное состояние. Результатом подвода энергии, по мнению В. Е. Клямеcki, может быть образование сравнительно упорядоченных, т. е. диссипативных структур. Необходимым условием этого является превышение потока отрицательной энтропии над производством энтропии, т. е. уменьшение энтропии тела. Другими словами, когда система исчерпывает возможности диссипирования подводимой энергии, она либо разрушается, либо в ней проходят неравновесные фазовые переходы. В образующихся структурах создаются условия для появления кооперативных процессов, позволяющих значительно увеличить способность диссипации энергии. При трении кооперативные эффекты могут привести к образованию упорядоченных диссипативных структур в приповерхностных областях, например, дислокационных фрагментов или слоистых структур [5, 6]. В [7] рассмотрена возможность образования диссипативных

структур в системе трения при взаимодействии термических и механических процессов.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При обработке материалов резанием лезвийными инструментами имеются 3 основных источника производства энтропии вторичных структур (ВС) при трении: стружки о переднюю поверхность инструмента, поверхности резания о заднюю поверхность и обработанной поверхности о вспомогательную заднюю поверхность. Может существовать еще дополнительный, самостоятельный источник: применение СОТС, внутреннее охлаждение инструмента, подогрев обрабатываемого материала и т. п.

Независимыми переменными основных источников производства энтропии (при заданной геометрии режущей части инструмента) являются элементы режима резания и, в первую очередь, скорость резания. Скорость резания может изменить соотношение между термодинамическими потоками теплоты, вещества и физико-химических превращений и тем самым привести к адаптации.

При трении снижение энтропии тела может происходить не только в результате износа, т. е. потери вещества, но и в результате превращений, происходящих в поверхностных слоях. При образовании вторичных структур возможно повышение или понижение энтропии вторичных структур по сравнению с энтропией веществ, вступающих во взаимодействие (материалы контртел, составляющие смазки, атмосферы и т. д.).

В начальный момент образования вторичных структур изменение энтропии трущегося тела (ΔS) будет состоять из следующих составляющих:

$$\Delta S = \Delta S_I + \Delta S_i + \Delta S_2 + \Delta S_3 - |\Delta S_4|, \quad (1)$$

где ΔS_I – поток энтропии без учета массообмена, ΔS_i – производство энтропии без учета превращений в поверхностных слоях, ΔS_2 – изменение энтропии за счет присоединения веществ со своей энтропией, ΔS_3 – изменение энтропии за счет превращений в поверхностных слоях, ΔS_4 – изменение энтропии, связанное с изнашиванием, т. е. с отводом вещества.

В данном исследовании при разработке принципов рационального выбора и применения износостойких инструментальных материалов рассмотрена трибосистема «инструмент–обрабатываемый материал», во вторичных структурах которой проходят следующие основные термодинамические потоки: поток тепла, поток вещества, поток физико-химических превраще-

ний и поток дополнительных воздействий (применение СОЖ, нестационарность режимов резания и т. п.). Представлена эта система в виде трущегося тела и источников энергии в зоне трения. Принято, что источники энергии не имеют массы, и поэтому не обладают энтропией. Рассмотрено производство энтропии одного из контактирующих тел – режущего инструмента – при резании металлов.

Вначале предполагается, что в ВС трущихся поверхностей инструмента проходят только два термодинамических потока: поток тепла и поток вещества. Полагаем, что за время взаимодействия не успевает пройти обмен теплом системы, состоящей из трущегося тела и источника тепла

(зоны трения), со средой и поток энтропии $\frac{d_e S}{dt}$

связан только с изнашиванием. Принимаем, что в стационарном состоянии величина интенсивности изнашивания режущего инструмента связана с потоком вещества m_e , который обуславливается градиентом концентрации вещества. И только при износе (удалении насыщенных слоев) возможно продолжение потока вещества, так как снова появляется градиент его концентрации. Тогда производство энтропии ВС в рассматриваемой системе (без учета взаимосвязи потоков между собой) равно:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(f_m p_r V X)^2}{\lambda T^2} + f_m p_r V Y \frac{m_e}{DT}, \quad (2)$$

где f_m – коэффициент трения; p_r – удельная нормальная нагрузка; V – скорость скольжения (резания); X – некоторая часть механической энергии трения, которая рассеивается в виде тепла; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура, Y – некоторая часть общего производства энтропии при трении, которая расходуется на формирование потока вещества; D – коэффициент диффузии; m_e – поток вещества.

Согласно универсальному критерию И. Пригожина [6], при эволюции термодинамической системы часть изменения производства энтропии, связанная с изменением термодинамических сил, будет отрицательной. Однозначно невозможно утверждать, какой знак будет у части изменения производства энтропии, связанной с изменением термодинамических потоков. Однако известно, что если производство энтропии системы уменьшается при изменении термодинамических потоков и сил, то производство энтропии достигает минимума в стационарном состоянии и далее не меняется. На основании этой теоремы предполагается, что в стационарном состоянии производство энтро-

пии в трибосистеме может не меняться в некоторых пределах изменения параметров трения. Подобную устойчивость трибосистема может приобрести только после потери термодинамической устойчивости и образования диссипативных структур.

В целом, согласно исследованиям [5, 6] условие устойчивости производства энтропии в стационарном состоянии можем записать в следующем виде:

$$\frac{2f_m P_r V X}{\lambda_{cp} T} - \left| Y \frac{m_e}{D_{cp}} \right| = 0. \quad (3)$$

Знак перед вторым членом принят отрицательным из условия (3). Это связано с тем, что из условия аддитивности он пропорционален интенсивности изнашивания материала трущегося тела, а частицы износа удаляются из трибосистемы со своим содержанием энтропии.

Из выражения (3) после уточнения составляющих получено, что линейная интенсивность изнашивания J_h равна:

$$J_h = \frac{2Xk}{Y} \cdot \frac{\tau_{mn} D_{cp}}{\lambda_{cp} T_p}. \quad (4)$$

В выражении (4) введены средние значения теплопроводности λ_{cp} и коэффициента диффузии D_{cp} во вторичных структурах в предположении независимости их от скорости резания; τ_{mn} – прочность адгезионных связей на срез в условиях скользящего контакта; ρ – плотность вещества изношенных частиц; k – коэффициент пропорциональности между массой изношенных частиц и потоком энтропии.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из выражения (4) видно, что интенсивность изнашивания инструментов по задней поверхности в значительной мере определяется температурными зависимостями $\tau_{mn}(T)$. Формула (4) является аналитическим выражением интенсивности изнашивания режущих инструментов, которое получено из условия устойчивости стационарного состояния с минимальным производством энтропии на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемый материал».

Из выражения (4) следует, что в условиях, когда влияние физико-химических превращений в ВС фрикционного контакта является несущественным, то его можно не принимать во внимание. Тогда

$$C = \frac{J_h T}{\tau_{mn}} = \frac{2Xk}{Y} \cdot \frac{D_{cp}}{\lambda_{cp} \rho}. \quad (5)$$

Согласно (5), величина C не должна изменяться с повышением температуры T , так как правая часть выражения представляет собой соотношение величин, принятых как постоянные.

В табл. 1–3 представлены результаты экспериментальных исследований и значения величины C , вычисленные по этим результатам, в зависимости от температуры резания, изменяющейся за счет изменения скорости резания. Из таблиц видно, что для каждого состояния трибосистемы «инструмент–обрабатываемый материал» повышение температуры T в исследованном диапазоне до некоторой величины, названной как характерная $T_{хар}$, практически не изменяет величину C . Эта температура в работе А. Д. Макарова названа оптимальной температурой резания, так как при этой температуре интенсивность изнашивания режущего инструмента минимальна. Это свидетельствует, во-первых, о том, что до температур $T_{хар}$ физико-химические превращения на фрикционном контакте не могут играть определяющей роли в формировании потока вещества и изнашивании инструмента (возможно, в связи с тем, что именно до этих температур рассматриваемые превращения практически отсутствуют); во-вторых, соответствие интенсивности изнашивания режущих инструментов (по меньшей мере до температур $T_{хар}$) выражению (4) показывает, что состояние ВС на фрикционном контакте «инструмент–обрабатываемый материал» может рассматриваться как стационарное с минимальным производством энтропии, устойчивое по отношению к изменению скорости (температуры) резания; в-третьих, при температурах $T_{хар}$ и выше, очевидно, устанавливаются новые связи между элементами системы (поток вещества и температурой), которые можно объяснить появлением новой структуры, способствующей упорядочению системы.

Таблица 1

Точение сплава ХН70ВМТЮБ резцом ВК6М; скорость резания $V = 15–65$ м/мин; глубина $t = 0,5$ мм; подача $S = 0,08$ мм/об

Температура резания T , К	τ_{mn} , МПа	$J_h \cdot 10^7$	$C \cdot 10^7$
873	620	1,1	1,55
923	540	0,9	1,54
973	500	0,8	1,55
1073	380	2	5,6
1173	220	4	21,3

Такие результаты получены для существенных различных условий резания металлов: точение и фрезерование; твердосплавные и быстро-

режущие инструментальные материалы; жаропрочные сплавы и конструкционные стали как обрабатываемые материалы.

Таблица 2

Фрезерование стали 30ХГСА (HRC, 35...38) однозубой торцевой фрезой Т15К6; скорость резания $V = 40-120$ м/мин; глубина $t = 0,5$ мм; подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/об

Температура резания T , К	τ_{nm} , МПа	$J_h \cdot 10^5$	$C \cdot 10^5$
923	600	1,0	1,54
993	350	0,53	1,51
1023	300	0,45	1,53
1053	280	1,0	3,76
1093	210	1,32	6,9

Таблица 3

Точение сплава ХН70ВМТЮБ резцом Р18Ф2К8М; скорость резания $V = 3-10$ м/мин; глубина $t = 0,5$ мм; подача $S = 0,12$ мм/об

Температура резания T , К	τ_{nm} , МПа	$J_h \cdot 10^7$	$C \cdot 10^7$
593	780	1,1	0,84
693	740	0,9	0,84
763	640	0,7	0,83
783	620	1,8	2,27
813	600	4,8	6,5

Для возможности прохождения адаптации и образования диссипативных структур необходимо более одного независимого источника диссипации энергии. Диссипативными структурами могут быть несамопроизвольные химические реакции, инициируемые трением. Следовательно, при температурах резания $T_{хар}$ и выше на фрикционном контакте могут появиться новые источники диссипации энергии – несамопроизвольные химические реакции с отрицательным производством энтропии, инициируемые трением. Следует, однако, иметь в виду, что в данной работе представлено первое приближение термодинамического подхода к оценке изнашивания инструмента, без рассмотрения условий потери устойчивости и возможных взаимодействий различных процессов друг с другом.

ВЫВОДЫ

Показано, что оптимальная температура резания металлов, обеспечивающая минимальное изнашивание режущих инструментов, в значительной степени связана с протеканием на поверхностях трения неравновесных процессов образования вторичных структур и уменьшением производства энтропии (по И. Пригожину). Полученные результаты могут послужить ос-

новой для разработки новых принципов выбора и применения инструментальных материалов и износостойких покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров, А. Д.** Оптимизация процессов резания металлов / А. Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
2. **Шустер, Л. Ш.** Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л. Ш. Шустер. М.: Машиностроение, 1988. 96 с.
3. **Бершадский, Л. И.** Структурная термодинамика трибосистем / Л. И. Бершадский. Киев: Знание, 1990. 253 с.
4. **Мигранов, М. Ш.** Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении / М. Ш. Мигранов, Л. Ш. Шустер. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
5. **Иванова, В. С.** Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации / В. С. Иванова, Н. А. Буше, И. С. Гершман // Трение и износ. 1997. Т. 18, № 1. С. 74–79.
6. **Пригожин, И.** Современная термодинамика / И. Пригожин, Д. Кондипуди. М.: Мир, 2002. 461 с.
7. **Шустер, Л. Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л. Ш. Шустер, Н. К. Криони, В. Ю. Шолом, М. Ш. Мигранов. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.

ОБ АВТОРАХ



Мигранов Марс Шарифулович, проф. каф. ОКМиМ. Дипл. инж.-мех. (1987, УАИ). Д-р техн. наук по процессам мех. и физ.-техн. обработки (РУДН, 2007). Иссл. в обл. износостойкости режущ. инстр. и повышения эффективности лезвийн. обр. резанием.



Шустер Лева Шмульевич, проф. каф. ОКМиМ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1962). Д-р техн. наук по трению и износу в машинах (РГУНиГ им. И. М. Губкина, 1989). Иссл. в обл. высокотемп. трибологии.