

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.891+669.017:539.43

Термодинамические процессы в зоне контакта заточного круга с обрабатываемой поверхностью инструмента

В.И. Бутенко, Р.Г. Кадач, С.И. Буймистренко, С.А. Покусаев

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

В современном машиностроительном производстве достаточно большое количество металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов подвергаются различным способам заточки и переточки. Стойкость таких инструментов во многом зависит от термодинамических процессов, протекающих в зоне контакта заточного круга с обрабатываемой поверхностью инструмента. Решение проблемы повышения стойкости металлорежущих инструментов во многом зависит от обеспечения в инструментальном материале термодинамического состояния наименьшей скорости прироста энтропии при минимальной плотности её накопления и локализации термодинамических процессов в поверхностном слое затачиваемого инструмента. Целью статьи являлось аналитическое исследование производства и изменения энтропии термодинамической системы «инструмент – заточной круг».

Ключевые слова: инструмент, заточной круг, поверхностный слой, контакт, термодинамическая система, энтропия

Для цитирования. Бутенко В.И., Кадач Р.Г., Буймистренко С.И., Покусаев С.А. Термодинамические процессы в зоне контакта заточного круга с обрабатываемой поверхностью инструмента. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(3):70–75.

Thermodynamic Processes in the Contact Zone of the Grinding Wheel and Machining Area of a Tool

Viktor I. Butenko, Roman G. Kadach, Sergei I. Buimistrenko, Sergei A. Pokusaev

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract.

In modern mechanical engineering production, quite many metal-cutting tools made of high-speed steels and hard alloys undergo various kind of sharpening and regrinding. The durability of such tools much depends on the thermodynamic processes taking place in the contact zone of the grinding wheel and machining area of a tool. The solution of the problem of increasing durability of the metal-cutting tools to large extent depends on ability to ensure in the tool material the thermodynamic state of the lowest rate of entropy increment with minimum density of its accumulation and thermodynamic processes localization in the surface layer of the tool sharpened. The article aimed at conducting the analytical study on entropy production and entropy change in the thermodynamic system “tool – grinding wheel”.

Keywords: tool, grinding wheel, surface layer, contact, thermodynamic system, entropy

For Citation. Butenko VI, Kadach RG, Buimistrenko SI, Pokusaev SA. Thermodynamic Processes in the Contact Zone of the Grinding Wheel and Machining Area of a Tool. *Young Researcher of Don*. 2025;10(3):70–75.

Введение. В работах [1–3] показано, что основные процессы при контактном взаимодействии металлорежущего инструмента (например, абразивного или алмазного круга) с обрабатываемым материалом концентрируются в его поверхностном слое. Поэтому трибосистему «инструмент – заточной круг» можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, в которой происходят процессы структуризации инструментального материала с образованием в контактном поверхностном слое тонкоплёночных структур различного состава [1–3].

Наличие в зоне контакта заточного круга с инструментальным материалом таких структур необходимо для рассеяния энергии при её переходе из зоны контакта в инструментальный материал, который должен происходить с наименьшей скоростью прироста энтропии [1], что обеспечит наивысшую стойкость затачиваемого инструмента и будет влиять на показатели процесса резания металлов.

Основная часть. Как следует из работы [2], образующиеся тонкоплёночные структуры выполняют защитные функции, ограничивая распространение образующегося в зоне контакта тепла и снижая интенсивность взаимодействия абразивного материала с инструментальным, поэтому их роль во взаимодействии абразивного зерна с затачиваемой поверхностью инструмента соответствует принципу Ле-Шателье [1, 3]. При этом состав образующихся на затачиваемых поверхностях инструментов структур во многом зависит от принятого способа заточки инструментов [4]. Из работ [5, 6] следует, что изменение энтропии любой термодинамической системы dS определяется как:

$$dS = dS_e + dS_i, \quad (1)$$

где dS_e — изменение энтропии, вызванное обменом системы энергией и веществом с внешней средой; dS_i — изменение энтропии, вызванное необратимыми процессами внутри системы.

В стационарном состоянии термодинамической системы изменение энтропии dS во времени τ равно нулю, т.е.

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{dS_e}{d\tau} + \frac{dS_i}{d\tau}. \quad (2)$$

При этом должно соблюдаться следующее соотношение [1]:

$$\text{если } \frac{dS_i}{d\tau} > 0, \text{ то } \frac{dS_e}{d\tau} < 0. \quad (3)$$

Представляет практический интерес решение задачи по разработке и выбору способа заточки металлорежущего инструмента, при котором в термодинамической системе «инструмент — заточный круг» создаются условия устойчивости производства энтропии с наименьшей скоростью её прироста. Для решения поставленной задачи были приняты следующие допущения и ограничения:

1. В структурах, образующихся на затачиваемых поверхностях инструмента, в качестве основных термодинамических потоков проходят поток тепла, поток вещества и поток физико-химических превращений.
2. Поток дополнительных внешних воздействий на зону контактного взаимодействия заточного круга с поверхностью инструмента (например, подогрев или охлаждение) не учитывается.
3. Термодинамическая система представлена в виде инструментального материала (тела) и источников энергии, не обладающих массой и начальной энтропией.
4. Производство энтропии осуществляется только заточным кругом, рассматриваемым как индентор.
5. В зоне контактного взаимодействия заточного круга и инструментального материала рассматриваются средний коэффициент трения f_{mp} и средняя температура θ .
6. Не рассматриваются условия потери устойчивости термодинамической системы и возможного взаимодействия различных процессов друг с другом в зоне контакта заточного круга с инструментальным материалом.
7. Температурные флуктуации, возникающие на затачиваемых поверхностях инструмента, в рассматриваемой термодинамической системе «инструмент — заточный круг» не учитываются.

Пусть в структурах поверхностного слоя инструментального материала, находящегося в контакте с абразивными зёрнами заточного круга, протекают только два термодинамических потока: поток тепла и поток вещества. Если предположить, что за время взаимодействия заточного круга с обрабатываемой поверхностью инструмента не успевают произойти обмен теплом системы, состоящей из источника тепла (зоны обработки) и тела (инструментального материала), со средой, то поток энтропии $dS_e/d\tau$ в уравнении (2) будет связан с интенсивностью снятия с затачиваемой поверхности инструмента потоком вещества m_e , который, в свою очередь, обусловлен режущей способностью абразивного зерна и градиентом концентрации вещества в материале поверхностного слоя. По мере снятия с затачиваемой поверхности инструмента материала в виде стружки будет иметь место постоянное наличие потока вещества, так как с каждым проходом заточного круга будет появляться градиент его концентрации по толщине поверхностного слоя затачиваемой поверхности инструмента. В этом случае производство некоторой частной энтропии поверхностного слоя в стационарной термодинамической системе «инструмент — заточный круг» $dS_0/d\tau$ (без учёта взаимосвязи между собой потоков тепла, вещества и физико-химических превращений в поверхностном слое инструментального материала) будет равно:

$$\frac{dS_0}{d\tau} = \frac{dS_q}{d\tau} + \frac{dS_m}{d\tau}, \quad (4)$$

где $dS_q/d\tau$ — часть производства энтропии, связанная с тепловым потоком; $dS_m/d\tau$ — часть производства энтропии, связанная с потоком вещества.

Составляющая производства энтропии $dS_q/d\tau$ может быть определена по формуле:

$$\frac{dS_q}{d\tau} = J_q \cdot X_q, \quad (5)$$

где J_q — поток тепла, возникающий в зоне контакта заточного круга с обрабатываемой поверхностью инструмента; по закону переноса теплоты Био-Фурье:

$$J_q = -\lambda \cdot \text{grad}\theta; \quad (6)$$

(здесь λ — коэффициент теплопроводности инструментального материала); $X_q = \text{grad}\theta/\theta^2$ — термодинамическая сила, вызывающая поток тепла; θ — температура в зоне контакта заточного круга с обрабатываемой поверхностью инструмента.

Если принять условие о том, что некоторая часть X механической энергии, затраченной на процесс заточки инструмента, рассеивается потоком тепла, то поток тепла J_q определится по формуле [1]:

$$J_q = f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot X \text{ при } X < 1, \quad (7)$$

где f_{mp} — средний коэффициент трения между заточным кругом и обрабатываемой поверхностью инструмента; p_n — нормальное давление заточного круга на обрабатываемую поверхность инструмента; $V_{зк}$ — скорость вращения заточного круга; для чашечного заточного круга, наиболее часто используемого при заточке металлорежущих инструментов.

$$V_{зк} = \frac{\pi(d_1 + d_2) \cdot n_{зк}}{6 \cdot 10^5}, \text{ м/с,}$$

здесь d_1, d_2 — соответственно внешний и внутренний диаметры чашечного заточного круга по его рабочей поверхности в мм; $n_{зк}$ — частота вращения заточного круга в об/мин.

После подстановки выражения (7) в формулу (5) и соответствующих преобразований составляющая производства энтропии $dS_q/d\tau$ определится следующим образом:

$$\frac{dS_q}{d\tau} = \left(\frac{f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot X}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{1}{\lambda}. \quad (8)$$

Изменение энтропии потока вещества в поверхностном слое инструментального материала в процессе заточки $dS_m/d\tau$ определится по формуле:

$$\frac{dS_m}{d\tau} = J_m \cdot X_m, \quad (9)$$

где J_m — поток переноса вещества в контактной зоне термодинамической системы «инструмент – заточной круг» массой m_e , вызванный съёмом металла с затачиваемой поверхности инструмента; в соответствии с законом Фика его значение может быть определено по формуле:

$$J_m = \frac{m_e}{D \cdot \text{grad}C}, \quad (10)$$

(здесь D — коэффициент диффузии; C — концентрация вещества); X_m — термодинамическая сила, вызывающая поток вещества; определяется по формуле [1]:

$$X_m = \frac{\text{grad}C}{\theta}. \quad (11)$$

Если предположить, что только некоторая Y часть от общего производства энтропии расходуется в зоне контакта заточного круга с инструментальным материалом на формирование потока вещества, то величина J_m будет равна:

$$J_m = f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot Y \text{ при } Y < 1. \quad (12)$$

Тогда формула (9) примет вид:

$$\frac{dS_m}{d\tau} = f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot Y \cdot \frac{m_e}{D \cdot \theta}. \quad (13)$$

Подстановка формул (8) и (13) в выражение (4) и выполнение соответствующих преобразований дают следующую формулу производства энтропии поверхностного слоя в стационарной термодинамической системе «инструмент – заточной круг»:

$$\frac{dS_0}{d\tau} = \left(\frac{f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot X}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{1}{\lambda} + f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot Y \cdot \frac{m_e}{D \cdot \theta}. \quad (14)$$

В работе [7] доказывается, что если механическая энергии в зоне контакта взаимодействующих поверхностей трибосистем является единственным источником изменения производства энтропии, то термодинамическая система не теряет устойчивости и в ней не происходит структуризация материала. Для образования в термодинамической системе диссипативных структур необходимо наличие в ней более одного независимых источников

диссипации энергии. При этом источниками диссипации энергии могут быть не самопроизвольные химические реакции, инициируемые процессами, протекающими в зоне контактного взаимодействия материалов [8]. В этом случае производство энтропии поверхностного слоя инструментального материала $dS_i/d\tau$, подвергнутого воздействию заточного круга, в рассматриваемой термодинамической системе с учётом вероятностных физико-химических превращений будет равно:

$$\frac{dS_i}{d\tau} = \frac{dS_q}{d\tau} + \frac{dS_{\phi-x}}{d\tau}, \quad (15)$$

где $dS_{\phi-x}/d\tau$ — поток энтропии за счёт вероятных физико-химических превращений в поверхностном слое инструментального материала в процессе заточки, который, согласно исследованиям И. Пригожина [5, 6] равен

$$\frac{dS_{\phi-x}}{d\tau} = J_x \cdot X_x; \quad (16)$$

здесь J_x — скорость химических реакций в поверхностном слое инструментального материала; X_x — термодинамическая сила, вызывающая химические реакции в зоне контакта заточного круга с инструментом.

Скорость химических реакций J_x зависит от термодинамического состояния поверхностного слоя обрабатываемого инструментального материала и принимается равной [1]:

$$J_x = V_x \cdot f_{mp}, \quad (17)$$

где V_x — скорость химической реакции вблизи термодинамического равновесия трибосистемы.

Значение термодинамической силы X_x определяется по формуле:

$$X_x = \frac{A}{\theta}, \quad (18)$$

где A — величина, определяющая химическое сродство компонентов материала поверхностного слоя заточиваемого инструмента.

Согласно исследованиям Э.М. Гутмана [9] вблизи термодинамического равновесия трибосистемы скорость химической реакции V_x и химическое сродство компонентов A связаны соотношением:

$$V_x = K_{cb} \cdot R \cdot \theta \cdot \left(\exp \frac{A}{R \cdot \theta} - 1 \right), \quad (19)$$

где K_{cb} — коэффициент сопряжённых взаимодействий, принимаемый в зависимости от физико-механических свойств материала поверхностного слоя заточиваемого инструмента [3, 10, 11]; R — газовая постоянная; $R = 8,314$ Дж/моль К.

Если выражение $\exp (A/R \cdot \theta)$ разложить в ряд и отбросить члены второй и далее степеней малости, то получается следующая формула для определения скорости вероятных химических реакций в зоне контактного взаимодействия трибосистемы «инструмент — заточный круг»:

$$V_x \approx K_{cb} \cdot A. \quad (20)$$

Пусть некоторая часть Z механической энергии в зоне контакта расходуется на физико-механические превращения в материале поверхностного слоя инструмента, подвергнутого заточке. Тогда скорость химических реакций J_x определится по формуле:

$$J_x = f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot Z \text{ при } Z = 1 - X - Y. \quad (21)$$

Если подставить в формулу (17) значения J_x и X_x , то поток энтропии за счёт физико-химических превращений в поверхностном слое инструмента, подвергнутого заточке, составит:

$$\frac{dS_{\phi-x}}{d\tau} = f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot Z \cdot \frac{V_x}{K_{cb} \cdot \theta}. \quad (22)$$

Тогда, с учётом выражений (12), (13) и (20), формула суммарной скорости изменения энтропии в поверхностном слое инструментального материала, находящегося в контактном взаимодействии с заточным кругом $dS_\Sigma/d\tau$, будет иметь вид:

$$\frac{dS_\Sigma}{d\tau} = \left(\frac{f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot X}{\theta} \right)^2 \cdot \frac{1}{\lambda} - \left| f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot Y \cdot \frac{m_e}{D \cdot \theta} \right| \pm \left| f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot Z \cdot \frac{V_x}{K_{cb} \cdot \theta} \right|. \quad (23)$$

В формуле (23) знак перед вторым членом принят отрицательным согласно соотношению (3) между $dS_i/d\tau$ и $dS_e/d\tau$. Это объясняется тем, что из условия аддитивности скорость изменения энтропии $dS_e/d\tau$ пропорциональна интенсивности съёма материала с заточиваемой поверхности инструмента, а срезанные заточным кругом частицы удаляются из зоны обработки со своим содержанием энтропии. Знак перед третьим членом в формуле (23) может быть, как положительным, так и отрицательным в зависимости от характера физико-химических превращений в зоне контактного взаимодействия заточного круга с инструментальным материалом.

Если продифференцировать выражение (23) по скорости вращения заточного круга $V_{зк}$ (как независимой переменной, рассматриваемой трибосистемы) и приравнять результат к нулю, то получится условие устойчивости прироста энтропии в зоне взаимодействия заточного круга с инструментальным материалом:

$$\frac{2 \cdot f_{mp} \cdot p_n \cdot V_{зк} \cdot X^2}{\lambda \cdot \theta} - Y \frac{m_e}{D} \pm Z \frac{V_{зк}}{K_{св}} = 0. \quad (24)$$

Заключение. Анализ формул (14), (23) и (24) даёт основание сделать следующие выводы, определяющие практическую значимость выполненных исследований:

1. В первом приближении установлен термодинамический подход к процессам производства и изменения энтропии в трибосистеме «инструмент — заточной круг».
2. В термодинамической системе «инструмент — заточной круг» возможно формирование диссипативных тонкоплёночных структур и возникновение новых свойств зоны контактного взаимодействия заточного круга с обрабатываемым инструментальным материалом.
3. При выборе способа заточки инструмента, обеспечивающего его наивысшую стойкость, необходимо стремление к обеспечению в инструментальном материале термодинамического состояния наименьшей скорости прироста энтропии при минимальной плотности её накопления и локализации термодинамических процессов в поверхностном слое затачиваемого инструмента.

Список литературы

1. Асланян И.Р., Шустер Л.Ш. Термодинамические аспекты изнашивания покрытий с учётом условий трения. В: *Труды четвертой международной научно-технической конференции «Научоёмкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012)»*. Рыбинск, 3–5 сентября 2012 года. Рыбинск: Изд-во РГАТУ; 2012. с. 70–74.
2. Бершадский Л.И. *Структурная термодинамика трибосистем*. Киев: Знание; 1990. 29 с.
3. Рыжкин А.А. *Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке*. Монография. Ростов-на-Дону; 2019. 289 с.
4. Бутенко В.И., Кадач Р.Г. Способы эффективной заточки металлорежущих инструментов. В: *Труды международной научно-технической конференции «Научоёмкие технологии машиностроения, авиации и транспорта»*. Ростов-на-Дону, 25 января 2024 года. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2024. С. 155–164. Доступно по: <https://ntd.donstu.ru/content/2024727>.
5. Гленсдорф П., Пригожин И. *Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций*. 2-е издание. Москва: УРСС; 2003. 280 с.
6. Пригожин И., Кондепуди Д. *Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур*. Москва: Мир; 2002. 461 с.
7. Гершман И.С., Буше Н.А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах. *Трение и износ*. 1995;16(1):61–70.
8. Булгаревич С.Б. Термодинамические характеристики не самопроизвольных химических реакций, инициируемых трением. В: *Сборник трудов третьей международной конференции «Контактное взаимодействие и сухое трение»*. Москва, 2005 года. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2005. С. 60–67.
9. Гутман Э.М. *Механохимия металлов и защита от коррозии*. Москва: Металлургия; 1974. 210 с.
10. Рыжкин А.А. *Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов*. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ; 2005. 310 с.
11. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. *Резание металлов: термодинамический подход к системе взаимосвязей при резании*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2001. 447 с.

Об авторах:

Виктор Иванович Бутенко, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), butenkoviktor@yandex.ru.

Роман Геннадьевич Кадач, аспирант кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), rkad925@mail.ru

Сергей Иванович Буймистренко, магистрант кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), sergeiBuim@yandex.ru.

Сергей Алексеевич Покусаев, магистрант кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), pokusaevsa@gmail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor I. Butenko, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), butenkowiktor@yandex.ru

Roman G. Kadach, Postgraduate Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), rkad925@mail.ru.

Sergei I. Buimistrenko, Master's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), sergeiBuim@yandex.ru.

Sergei A. Pokusaev, Master's Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), pokusaevsa@gmail.ru

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.