

УДК 621.91-533.6

К вопросу о коэффициенте распределения теплового потока в зоне деформации при резании

Ф. А. Висторопская, А. А. Рыжкин, С. А. Моисеенко

(Донской государственный технический университет)

Получена уточнённая формула для определения доли тепла от деформации в плоскости сдвига, поступающего в стружку; полученные результаты расчёта коэффициента распределения теплового потока для случая точения сплавом ВК8 жаропрочной стали 12Х18Н10Т удовлетворительно согласуются с литературными данными.

Ключевые слова: тепловой поток, напряжения сдвига, коэффициент распределения тепловых потоков.

Введение. Тенденции развития современного машиностроения направлены на интенсификацию процессов механической обработки. Сокращение машинного времени при резании как резерва обеспечения максимальной производительности операции предполагает использование станков с ЧПУ и ГПС. Применяемые форсированные режимы резания для твердосплавного инструмента обуславливают высокие температуры, которые в принципе не должны превышать температуры тепло-, коррозионной стойкости и диффузионного взаимодействия. В этой связи возникает проблема априорной оценки уровня температур в зоне резания с учётом возможно большего количества факторов процесса резания. В настоящее время известно сравнительно большое количество аналитических температурных зависимостей, составляющих базу тепловой динамики трения [1–4].

Определение коэффициента распределения тепловых потоков при резании. Проблема тепловой динамики трения и резания в итоге сводится к расчётной оценке температур на контакте или её распределении в трущихся телах. Эта задача решается методом источников или методом баланса. Метод баланса основан на решении контактных тепловых задач для каждого элемента пары трения при граничных условиях I–IV рода, и определения долей тепла в каждом из них, т. е. находится коэффициент распределения теплового потока.

Этот классический метод был эффективно использован при расчёте температурных полей при изнашивании и инструментальных режущих материалов [4].

В условиях контактного взаимодействия при резании материалов на тепловое состояние режущего инструмента, кроме тепла от трения по передней $Q_{пл}$ и задней $Q_{зп}$ поверхностям, влияет ещё и тепло, выделяемое в зоне деформации Q_{ϕ} (рис. 1, плоскость ОА). Потоки $Q_{пл}$ и $Q_{зп}$ аналитически определяются без проблем, так как касательные напряжения $\tau_{пл}$ и $\tau_{зп}$ находятся по известным из механики резания зависимостям [2] [6], включающим предел прочности на разрыв обрабатываемого материала σ_s .

Для оценки напряжений в плоскости сдвига ОА τ_{ϕ} предложены различные зависимости полуэмпирического вида, согласно которым значения τ_{ϕ} для различных обрабатываемых материалов колеблются в значительных пределах: для точения стали 45 сплавом Т15К6 $\tau_{\phi} = (318...1593) \cdot 10^6 \text{ Па}$; для сплава ВК8 при обработке стали 12Х18Н10Т — $\tau_{\phi} = (115...1398) \cdot 10^6 \text{ Па}$, и титанового сплава ВТ3-1 — $\tau_{\phi} = (128... 1834) \cdot 10^6 \text{ Па}$.

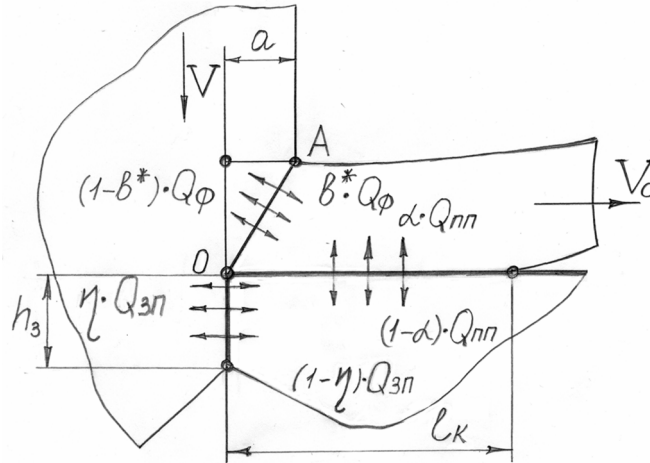


Рис. 1. Схема распределения тепловых потоков в зоне контакта при резании

Поэтому величину τ_ϕ можно рассчитать для конкретных условий резания косвенным путём. Согласно известному уравнению теплового баланса в зоне резания [2, 3, 8]:

$$Q_\phi = Q - (Q_{nn} + Q_{zn}), \quad (1)$$

где: Q — общее количество тепла, выделенное в зоне резания, Q_{nn} — теплота трения по передней поверхности, Q_{zn} — теплота трения по задней поверхности.

Но $Q = P_z \cdot V$, $Q_{nn} = \tau_{nn} \cdot l_k \cdot b \cdot V_c$, $V_c = V/k_a$, $Q_{zn} = \tau_{zn} \cdot h_3 \cdot b \cdot V$, а теплота в зоне деформации Q_ϕ (формула 1) равна:

$$Q_\phi = \tau_\phi \cdot V_\phi \cdot \frac{a \cdot b}{\sin \phi}, \quad (2)$$

где τ_ϕ — касательное напряжение сдвига, V_ϕ — скорость сдвига, b — ширина среза, ϕ — угол сдвига.

Из (1) и (2) имеем:

$$\tau_\phi = \frac{P_z \cdot V - [(\tau_{nn} \cdot l_k \cdot b \cdot V_c) + \tau_{zn} \cdot h_3 \cdot b \cdot V]}{V_\phi \cdot \frac{a \cdot b}{\sin \phi}} = \frac{P_z \cdot V - [(\tau_{nn} \cdot l_k \cdot b \cdot V/k_a) + \tau_{zn} \cdot h_3 \cdot b \cdot V]}{V_\phi \cdot \frac{a \cdot b}{\sin \phi}}, \quad (3)$$

где P_z — тангенциальная составляющая силы резания, V — скорость резания, V_c — скорость движения стружки, k_a — коэффициент утолщения стружки, l_k — длина контакта по передней поверхности, h_3 — износ по задней поверхности, τ_{nn} — касательное напряжение по передней поверхности, τ_{zn} — касательное напряжение по задней поверхности.

Так как $V_\phi = \frac{V \cdot \cos \phi}{\cos(\phi - \gamma)}$, то:

$$\begin{aligned} \tau_\phi &= \frac{\{P_z - [(\tau_{nn} \cdot l_k \cdot b / k_a) + \tau_{zn} \cdot h_3 \cdot b]\} \cdot \sin \phi \cdot \cos(\phi - \gamma)}{\cos \phi \cdot a \cdot b} = \\ &= \frac{\{P_z - [(\tau_{nn} \cdot l_k \cdot b / k_a) + \tau_{zn} \cdot h_3 \cdot b]\} \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \cos(\phi - \gamma)}{a \cdot b} \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) следует, что для каждого режима экспериментально надо определить главную составляющую силу резания P_z , коэффициент утолщения стружки k_a ; остальные параметры рассчитываются по известным формулам механики процесса резания [5—7].

При расчёте температур на передней и задней поверхностях, учитываем и доли тепла в зоне деформации, часть которой уходит со стружкой $Q_{\phi c} = B^* \cdot Q_{\phi}$, а другая часть попадает в инструмент

$$Q_{\phi и} = (1 - B^*) \cdot Q_{\phi},$$

где B^* — коэффициент распределения тепловых потоков.

В наших расчётах использовалась известная зависимость А. Н. Резникова [2], и наша оценка $T_{пн}$ и $T_{зн}$ показала заниженные значения коэффициента $B^*(0,49)$ и повышенный уровень $(1 - B^*)(0,51)$.

Исходные посылки для оценки B^* нами не рассматривались, а априори принималась формула А. Н. Резникова. Проследим ход его рассуждений. Принимая зону деформации за плоский источник, Резников А. Н. находит среднюю температуру в этом источнике [2, с. 265]:

$$T_{cp} = \frac{4}{3} \cdot q_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{a_2 \cdot l}}{\lambda_2 \cdot \sqrt{\pi \cdot V}} = \frac{4}{3} \cdot q_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{a_2 \cdot a / \sin \phi}}{\lambda_2 \cdot \sqrt{\pi \cdot V}}, \quad (5)$$

где $P_e = \frac{V \cdot l}{a_2}$ — параметр Пекле.

Автор [2] приравняет температуры от деформации в плоскости ОА (рис.1) к температуре в стружке, с учётом коэффициентов распределения тепловых потоков B^* и $(1 - B^*)$ и получает:

$$T_{cp} = \frac{B^* \cdot q_{\phi} \cdot a_2}{\lambda_2 \cdot V_c} = \frac{B^* \cdot q_{\phi} \cdot a_2 \cdot k_a}{\lambda_2 \cdot V} \quad (6)$$

$$T_{\phi} = (1 - B^*) \frac{4}{3} \cdot q_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\lambda_2 \cdot \sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}}$$

$$T_{cp} = T_{\phi}$$

$$\frac{B^* \cdot q_{\phi} \cdot a_2 \cdot k_a}{\lambda_2 \cdot V} = (1 - B^*) \frac{4}{3} \cdot q_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\lambda_2 \cdot \sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}} \quad (7)$$

Решив равенство (7) относительно B^* , получили:

$$\begin{aligned} \frac{B^* \cdot q_{\phi} \cdot a_2 \cdot k_a}{\lambda_2 \cdot V} &= 1,33 \cdot (1 - B^*) \cdot q_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\lambda_2 \cdot \sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}}; \\ \frac{B^* \cdot a_2 \cdot k_a}{V} &= \frac{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}} - B^* \cdot \frac{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}}; \\ B^* \cdot \left(\frac{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}} + \frac{a_2 \cdot k_a}{V} \right) &= \frac{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}}; \\ B^* \cdot \left(\frac{V \cdot 1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi} + \sqrt{\pi \cdot V} \cdot a_2 \cdot k_a \cdot \sqrt{\sin \phi}}{V \cdot \sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}} \right) &= \frac{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{\sqrt{\pi \cdot V} \cdot \sqrt{\sin \phi}}; \end{aligned}$$

$$B^* = \frac{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi} + \sqrt{\pi \cdot a_2 \cdot k_a \cdot (\sqrt{V} / V) \cdot \sqrt{\sin \phi}}};$$

$$B^* = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\pi \cdot a_2 \cdot k_a \cdot (\sqrt{V} / V) \cdot \sqrt{\sin \phi}}{1,33 \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}}$$

Или тогда коэффициент распределения теплового потока:

$$B^* = \frac{1}{1 + 1,33 \cdot \frac{\sqrt{V \cdot a_2 \cdot k_a \cdot \sqrt{\sin \phi}}{V \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}}, \quad (8)$$

где a_2 — коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, ϕ — главный угол в плане, S — подача.

В отличие от формулы А. Н. Резникова зависимость (8) содержит, кроме скорости резания, величину подачи S и главный угол в плане резца ϕ .

Пример. Определим коэффициент распределения тепла деформации B^* при точении резцом из ВК8 жаропрочной стали 12Х18Н10Т: $t = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $S = 0,14 \cdot 10^{-3}$ м/об, $\gamma = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $a_2 = 5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda_2 = 22,6 \cdot 10^6$ Вт/м·град, $C_2 \rho_2 = 4,51 \cdot 10^6$ Дж/м³·град. Скорости резания — $V = 0,68$; 1,07 и 2,14 м/с; коэффициенты укорочения стружки соответственно скоростям — $k_a = 1,85$; 1,53 и 1,55.

Угол сдвига определяется по зависимости [6]:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma}{k_a - \sin \gamma}$$

Для $V = 0,68$ м/с имеем:

$$B^* = \frac{1}{1 + 1,33 \cdot \frac{\sqrt{V \cdot a_2 \cdot k_a \cdot \sqrt{\sin \phi}}{V \cdot \sqrt{a_2 \cdot S \cdot \sin \phi}}} = \frac{1}{1 + 1,33 \cdot \frac{\sqrt{0,68 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,85 \cdot \sqrt{0,54}}{0,68 \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot 0,71}}} = 0,68$$

В таблице 1 приведены значения B^* и для других скоростей резания; кроме величин B^* приводятся также температуры по передней поверхности, распределённые по формулам для оценки температур трения, полученные интегральным методом [9].

Таблица 1

Расчётные значения параметра B^* и температуры на передней поверхности при обработке стали 12Х18Н10Т сплавом ВК8 ($t = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; $S = 0,14 \cdot 10^{-3}$ м/об)

Пара	Параметры		Температура $T_{пр}$, °C		
	V , м/с	B^*	от деформации	от трения	$\sum T$
ВК8-12Х18Н10Т	0,68	0,68	199	275	474
	1,07	0,74	318	358	676
	2,14	0,83	326	540	866

Как видно из таблицы 1, с увеличением скорости резания доля тепла, поступающего из зоны деформации в стружку, возрастает и для наших условий резания превышает 0,8, что соответствует физике процесса резания. По порядку величины значения B^* соответствуют данным А. Н. Резникова [2, с. 98], полученным для аналогичных условий резания; в работе [8] величину

этого коэффициента рекомендуется принимать равной 0,9 для скорости $V = 100$ м/мин и 0,95 для $V = 300$ м/мин.

Выводы.

1. Полученные расчётные значения коэффициентов распределения тепла деформации по уточнённой формуле позволяют эффективно использовать их для нахождения температур на контактных площадках инструмента и в зоне резания.

2. Расчётные значения полученных коэффициентов находятся в пределах известных из литературных данных.

Библиографический список

1 Чичинадзе, А. В. Расчёт, испытание и подбор фрикционных пар / А. В. Чичинадзе, А. Г. Гинзбург. — Москва: Наука, 1979. — 267 с.

2. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. — Москва: Машиностроение, 1968. — 288 с.

3. Белоусов, А. И. Тепловые явления и обрабатываемость резанием авиационных материалов / А. И. Белоусов, П. И. Бобрик, Рахман-Заде-Аз и др. — Москва: Машиностроение, 1966. — 179 с.

4. Рыжкин, А. А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов: учеб. Пособие / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2005. — 311 с.

5. Зорев, Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. — Москва: Машгиз, 1956. — 368 с.

6. Обработка материалов лезвийным инструментом, т. 5. Под ред. С. А. Клименко. — Киев: ИСМ им. Бакуля В. Н., ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2006. — 316 с.

7. Розенберг, А. М. Элементы теории процесса резания металлов / А. М. Розенберг, А. Н. Ерёмин. — Москва-Свердловск: Машгиз, 1956. — 319 с.

8. Пучкин, В. Н. Влияние температуры при обработке труднообрабатываемых сталей режущей керамикой / В. Н. Пучкин, В. Г. Солоненко, Л. А. Солоненко, Т. В. Кононенко // СТН. — 2010. — № 5. — С. 24—27.

9. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием / А. А. Рыжкин. — Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 1995. — 256 с.

Материал поступил в редакцию 08.09.2012.

References

1 Chichinadze, A. V. Raschyot, ispy`tanie i podbor frikcionny`x par / A. V. Chichinadze, A. G. Ginzburg. — Moskva: Nauka, 1979. — 267 s. — In Russian.

2. Reznikov, A. N. Teplofizika rezaniya / A. N. Reznikov. — Moskva: Mashinostroenie, 1968. — 288 s. — In Russian.

3. Belousov, A. I. Teplovy`e yavleniya i obrabaty`vaemost` rezaniem aviacionny`x materialov / A. I. Belousov, P. I. Bobrik, Raxman-Zade-Az i dr. — Moskva: Mashinostroenie, 1966. — 179 s. — In Russian.

4. Ry`zhkin, A. A. Teplofizicheskie processy` pri iznashivanii instrumental`ny`x rezhushhix materialov: ucheb. Posobie / A. A. Ry`zhkin. — Rostov-na-Donu: Izdatel`skij centr DGTU, 2005. — 311 s. — In Russian.

5. Zorev, N. N. Voprosy` mexaniki processa rezaniya metallov / N. N. Zorev. — Moskva: Mashgiz, 1956. — 368 s. — In Russian.

6. Obrabotka materialov lezvijnym instrumentom, t. 5. Pod red. S. A. Klimenko. — Kiev: ISM im. Bakulya V. N., IPCz ALKON NANU, 2006. — 316 s. — In Russian.

7. Rozenberg, A. M. E`lementy` teorii processa rezaniya metallov / A. M. Rozenberg, A. N. Eryomin. — Moskva-Sverdlovsk: Mashgiz, 1956. — 319 s. — In Russian.

8. Puchkin, V. N. Vliyanie temperatury` pri obrabotke trudnoobrabaty`vaemy`x stalej rezhushhej keramikoj / V. N. Puchkin, V. G. Solonenko, L. A. Solonenko, T. V. Kononenko // STIN. — 2010. — № 5. — S. 24—27. — In Russian.

9. Ry`zhkin, A. A. Obrabotka materialov rezaniem / A. A. Ry`zhkin. — Rostov-na-Donu: Izdatel`skij centr DGTU, 1995. — 256 s. — In Russian.

ON HEAT-SHARING RATIO IN DEFORMATION ZONE UNDER CUTTING

F. A. Vistoropskaya, A. A. Ryzhkin, S. A. Moiseyenko

(Don State Technical University)

The specified formula for determining the heat ratio due to the deformation in the shear plane entering chippings is got. The obtained results of the heat-sharing ratio calculation for the case of machining 12X18H10T heat-resistant steel by BK8 alloy are in satisfactory agreements with the literature data.

Keywords: heat flux, shear stresses, heat-sharing ratio.