

СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ

В.А. Пушных, В.Л. Бибик

Томский политехнический университет
E-mail: bibik@yrg.kuzbass.net

Приведено сравнение двух методов расчета температуры резания по А.Н. Резникову и С.С. Силину. Показано удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений температур резания.

В настоящее время большое развитие получает производство изделий мелкими сериями для конкретных заказчиков. В этих условиях выдвигается задача определения оптимальных режимов резания при минимальных затратах времени. Однако до настоящего времени выполнено очень мало исследований по установлению единых теоретических и теоретико-экспериментальных уравнений, позволяющих достаточно быстро определить оптимальные режимы резания при широком изменении физико-механических свойств обрабатываемых и инструментальных материалов. Существующие методики определения оптимальных режимов резания основаны на данных весьма трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований.

Оптимальные режимы резания определяются по критерию износа режущего инструмента. Среди факторов, влияющих на износ режущих кромок, первостепенную роль играет температура резания. Опубликовано много теоретических методов определения температуры резания. Однако лишь в теориях А.Н. Резникова и С.С. Силина [1, 2] эти методы изложены настолько полно, что их можно использовать для практических расчетов. Но и у А.Н. Резникова, и у С.С. Силина недостаточно четко определена область применения предложенных методов расчета.

Целью данной работы является сравнение результатов расчета температуры резания по упомянутым методикам друг с другом и с экспериментально полученными данными, что позволит определить область применения данных методов.

Алгоритм расчета температуры резания по теории А.Н. Резникова выглядит следующим образом [1].

$$a = S \cdot \sin \varphi; \quad b = t / \sin \varphi,$$

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

$$F_{T3} \approx N_3 \approx 0,252 \sigma_a b l_3,$$

где F_{T3} – сила трения на задней поверхности резца, кг; N_3 – нормальная сила на задней поверхности резца, кг; σ_a – предел прочности обрабатываемого материала, кг/мм²; l_3 – длина контакта по задней поверхности резца, мм.

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

где q_0 – интенсивность теплового потока на надрезочной стороне стружки, кал/см²·с; $P_{NO} = P_N - N_3$; $P_{ZO} = P_Z - F_{m3}$ – составляющие силы резания, кг; l_n – длина контакта по передней поверхности резца, мм; V – скорость резания, м/мин; k – усадка стружки.

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

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.

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

q_d – теплота деформации, кал/см²·с.

$$Pe_d = \frac{1}{6} \frac{Va}{\omega}; \quad Pe = \frac{1}{6} \frac{V l_n}{k \omega},$$

где Pe_d и Pe – безразмерные критерии Пекле, для источников эквивалентного теплоте деформации и трения надрезочной стороны стружки соответственно; ω – коэффициент теплопроводности, 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.

$$R = Pe k^2 a^2 / l_n^2,$$

где R – безразмерный критерий.

$$\Theta_d = 0,6 \frac{\omega k}{\lambda V} b^* q_d,$$

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

$$\Theta_{ср} = 0,195 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \sqrt{\frac{kl_n}{V}} (q_0 T_{1ср} - 1,41 q_n T_{2ср}) + (1 + c^*) \Theta_d,$$

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

$$\Theta_{иср} \approx (1 + c^*) \Theta_d T_{иср} + 0,1 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} \sqrt{\frac{l_3}{V}} (q_1 - 1,82 q_3),$$

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

$$\eta_1 = b / l_n, \quad \eta_2 = b / l_3,$$

где η_1 ; η_2 – безразмерные коэффициенты.

$$N_1 = B(l_3 / l_n) G(\eta_1); \quad N_2 = B(l_n / l_3) G(\eta_2),$$

где N_1, N_2 – безразмерные функции; G – функция, зависящая от η ; $B(l_2/l_n), B(l_3/l_3)$ – безразмерные функции.

$$\Theta_{ncp} = \frac{q_n l_n}{\lambda_p} M_1 + \frac{q_3 l_3}{\lambda_p} N_2, \quad (1)$$

где Θ_{ncp} – среднее значение температуры на контактной площадке передней поверхности резца, °С; M_1 – функция, зависящая от угла заострения инструмента; λ_p – удельная теплопроводность резца, кал/см·с·°С.

$$\Theta_{зcp} = \frac{q_n l_n}{\lambda_p} N_1 + \frac{q_3 l_3}{\lambda_p} M_2, \quad (2)$$

где $\Theta_{зcp}$ – среднее значение температуры на контактной площадке задней поверхности резца, °С; M_2 – функция, зависящая от угла заострения.

$$\Theta_p = \frac{\Theta_{ncp} l_n + \Theta_{зcp} l_3}{l_n + l_3},$$

где Θ_p – температура резания.

Алгоритм расчета температуры резания по теории С.С. Силина состоит в следующем [2].

При $r > 0$

$$a_1 = SL/c', \quad b_1 = c't/L,$$

$$L = \sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')},$$

$$b'' = \frac{t}{\sin \varphi} \left[1 - a' \left(1 - \cos \varphi - \frac{\varphi}{\sin \varphi} - \frac{\arccos \sqrt{1 - b'^2}}{\sin \varphi} \right) \right],$$

$$a' = r/t, \quad b' = S/2r, \quad c' = 1 - a'(1 - \sqrt{1 - b'^2}),$$

где a_1, b_1 – параметры среза, м; b'' – суммарная длина рабочих участков режущих кромок резца, м; t – глубина резания, м; S – подача, м/об; r – радиус при вершине, м.

При $r = 0$

$$a_1 = \frac{S}{d'} \sin \arctg \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}, \quad b_1 = \frac{d't}{\sin \arctg \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}}$$

$$b'' = \frac{t}{\sin \varphi} \left[1 + \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1} (1 - d') \right], \quad d' = 1 - \frac{S}{t} \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1},$$

где φ_1 – вспомогательный угол в плане, град.

$$\operatorname{Pe} = V a_1 / \omega,$$

где V – скорость резания, м/с; ω – коэффициент температуропроводности, м²/с.

$$F = \lambda_p \beta \varepsilon / \lambda,$$

где λ_p и λ – коэффициенты теплопроводности инструментального и обрабатываемого материала, Дж/(м·с·°С); β – угол заострения резца, град; ε – угол при вершине резца, град.

$$D = d_1 / b_1,$$

где D – критерий, характеризующий геометрию сечения резца.

$$B = \frac{m \operatorname{Pe}^n}{F^k D^p (1 - \sin \gamma)^q}, \quad (3)$$

где B – величина, характеризующая степень пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя обрабатываемой детали; m, n, k, p, q – экспериментальные константы, определяемые из условий резания.

$$KP1 = \frac{FD^{0.3}(1 - \sin \gamma)^{0.25}}{\sqrt{\operatorname{Pe}}}; \quad KP2 = \frac{FD^{0.3}}{\operatorname{Pe}(1 - \sin \gamma)^{0.4}};$$

где $KP1, KP2$ – коэффициенты, зависящие от условий резания.

Температура деформации

$$\Theta_\theta = \frac{\tau_p}{c_p B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\operatorname{Pe} B}{4}},$$

где Θ_θ – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м²; c_p – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·°С); $\operatorname{erf} \sqrt{\operatorname{Pe} B/4}$ – интеграл вероятности.

Температура на передней поверхности инструмента

$$\Theta_n = \Theta_\theta (1 + 0,73 \varphi_n),$$

$$\varphi_n = \frac{0,9675 n^* \sqrt{\operatorname{Pe} B}}{\operatorname{erf} \sqrt{\operatorname{Pe} B/4}} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}},$$

где $n^* = 1/(1 + b_0)$.

$$b_0 = \frac{0,25 FD^{0.3} \sqrt{\cos \gamma + B \sin \gamma}}{\sqrt{\operatorname{Pe} B^{0.3} [\cos + \sin - B(\cos - \sin)^{0.2}]}}.$$

Температура на задней поверхности резца

$$\Theta_s = 0,5 \Theta_\theta \left(1 + \frac{1,035 n_1 \cos \alpha}{\operatorname{erf} \sqrt{\operatorname{Pe} B/4}} u + \frac{1}{u} \right).$$

$$u = \sqrt{\operatorname{Pe} E} B^{1,25} / \sin^{0,25} \alpha,$$

где α – задний угол резца, град; $E = \rho_1 / a_1$; ρ_1 – радиус скругления режущей кромки, м; $n_1 = 1/(1 + b'_1)$.

$$b'_1 = \frac{0,24 FD^{0.3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{\operatorname{Pe} E^{0,2} B^{0,1}}}.$$

Средняя температура резания

$$\Theta_p = \frac{\Theta_n l_n + \Theta_s l_3}{l_n + l_3}.$$

Для расчета температуры резания на основании приведенных алгоритмов разработаны Windows-приложения в среде программирования Delphi.

В табл. 1 представлено сравнение экспериментальных данных [1] с расчетом температур по методикам [1, 2]. Обрабатываемый материал – ШХ15, режущий материал – Т14К8, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 12^\circ$, $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, $t = 4,1$ мм, $S = 0,5$ мм/об.

Температура, рассчитанная по теории [2], близка к экспериментальным данным только при высоких скоростях ($V \geq 1$ м/с). Это можно объяснить тем, что в алгоритме расчета заложена упрощенная формула для расчета параметра B (3), применяющаяся в случае $B \geq 0,4$. Общая формула для расчета параметра B очень сложна. При малых скоростях резания (в зоне наростообразования) значение $B < 0,4$, следовательно в алгоритме заложена ошибка, которая отражается на результатах расчета температуры резания.

Из табл. 1 видно, что температура, рассчитанная по теории А.Н. Резникова, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В табл. 2 представлено сравнение экспериментальных данных [3] с расчетными значениями температур по методу [1]. Обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ3-1, режущий материал – ВК8.

Теория [1] применима для материалов, дающих сливную стружку; титановые же сплавы дают элементную стружку. Из табл. 2 видно, что при скоростях $V \leq 0,4$ м/с расхождение между расчетной и экспериментальной температурой резания не превышает 10 %, а при $V > 0,4$ м/с погрешность увеличивается до 20 %.

Таблица 1. Результаты сравнения температуры резания с использованием методик [1, 2]

Скорость резания, м/с	Температура, °С						
	резания		на передней поверхности реза		на задней поверхности реза		
	Эксперимент	Расчет		Расчет		Расчет	
		[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]
0,17	400	368	579	377	570	227	1850
0,5	560	563	684	581	682	301	839
0,67	610	629	759	650	758	323	759
1,00	700	736	694	762	703	358	401
1,33	790	825	780	854	792	386	408
1,67	840	899	837	932	851	408	399

Таким образом, при обработке титановых сплавов при $V \leq 0,4$, когда вид стружки близок к сливной, стружку можно считать единым стержнем и для расчетов применять теорию А.Н. Резникова. При больших скоростях этот метод расчета неприемлем.

В табл. 3 представлено сравнение экспериментальных данных [4] с расчетными данными по теории [1]. При скоростях резания $V > 1$ м/с явление нароста практически отсутствует и разница между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 11 %. При меньших скоростях нарост оказывает существенное значение на процесс резания, изменяя геометрию инструмента. Поэтому при расчете температур на задней и передней

Таблица 3. Результаты сравнения температуры резания

Методика расчета	Обрабатываемый материал	Скорость резания, м/с	Усадка стружки	Радиус скругления, мкм	Передний угол, град	Температура резания, °С		
						По данным Н.Н. Зорева [4]	Расчет	
							Без учета высоты нароста	С учетом высоты нароста
[1]	Сталь 40	1,75	2,40	–	10	640	570	–
		3,33	2,05	–	10	790	731	–
		0,16	1,90	–	10	220	289	283
		0,42	1,75	–	10	280	271	273
		0,16	1,90	–	18	220	302	308
		0,42	1,75	–	23	280	556	327
[2]	Сталь 40	2,00	2,30	–	10	850	631	–
		1,75	–	15	10	640	564	–
		3,33	–	15	10	790	560	–
		0,16	–	15	10	220	231	227
		0,42	–	15	10	280	378	336
		0,16	–	40	18	220	216	212
[2]	35ХЗМН	0,42	–	167	23	280	312	312
		2,00	–	15	10	850	910	–

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
2. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

поверхностях инструмента Θ_3 (2) и Θ_n (1) необходимо произвести замену коэффициента теплопроводности реза на коэффициент теплопроводности материала нароста (детали). Как видно из табл. 3, при учете размеров нароста ($\gamma = 18...23^\circ$) разница между экспериментальными и расчетными значениями по теории [1] уменьшается до 15 %.

Таблица 2. Результаты сравнения температуры резания (расчет по [1])

Скорость резания, м/с	Подача, мм/об.					
	0,145		0,265		0,370	
	Температура резания, °С					
Эксперимент	Расчет		Эксперимент	Расчет		
	Эксперимент	Расчет		Эксперимент	Расчет	
0,83	412	354	450	418	500	427
0,16	520	497	600	581	660	633
0,25	600	631	700	710	750	756
0,33	666	731	750	817	825	890
0,42	730	835	820	925	888	991
0,50	780	911	864	1005	930	1102

В табл. 3 представлено сравнение экспериментальных данных [4] с расчетными данными по теории С.С. Силина. При скоростях резания $V = 1,75$ и $V = 3,33$ м/с наблюдается расхождение между расчетом и экспериментом, поскольку эти данные не попали в исследуемый диапазон ($B < 0,4$).

Таким образом, оба метода могут быть использованы для расчета температуры резания, однако они имеют существенные ограничения. В частности, при расчете по методу С.С. Силина необходимо следить за тем, чтобы параметр B был не менее 0,4. При расчете температуры по методу А.Н. Резникова необходимо учитывать, что эта теория применима для материалов, дающих сливную стружку.