

О.А. Степчин

РОЗРАХУНОК РУЙНУВАННЯ ПРОХІДНОГО РІЗЦЯ ВІДРИВОМ ПЛАСТИНКИ

(Представлено доктором технічних наук, професором Грабаром І.Г.)

Моделюється процес руйнації прохідного різця відривом пластинки по припою внаслідок деформації опори. Робиться спроба обчислити температуру зони з'єднання під час різання та врахувати її вплив на міцність інструмента.

Сучасний твердосплавний напайний різальний інструмент являє собою конструкцію, яка складається з кількох зв'язаних між собою елементів з різними властивостями. Ця конструкція працює в екстремальних умовах, що супроводять процес зняття стружки. Робоча частина інструмента, в нашому випадку токарного різця, зазнає різних видів впливу: механічні навантаження від складових сили різання P_z , P_x , P_y ; теплові навантаження внаслідок інтенсивного виділення тепла під час деформування та відділення шару металу; вібрації та удари. В умовах чорнової обробки сталей, чавунів та міцних сплавів, в залежності від того, де скоріше виникає критичний стан напруження, пластинка може сколотись по всій товщині або відірватись від державки. При цьому значну роль у загальній міцності ріжучої частини різця відіграє зона з'єднання пластинки та державки.

Відомі дослідження та розрахунки міцності опорної зони прохідного різця провадилися більше двадцяти років назад. Вони мають недоліки, пов'язані з розрахунками за емпіричними даними, недостатнім врахуванням властивостей різання як теплофізичного процесу, відсутністю комп'ютерних досліджень та моделювання.

У цій праці робиться спроба усунути перераховані недоліки, підійшовши до вирішення проблеми на сучасному рівні.

Силова розрахункова схема, що пропонується, – похідна від розрахункової схеми відомої методики обчислення механізму руйнування робочої частини твердосплавного різця у зв'язку з деформацією припою та державки [12]. При цьому різець подається як плита на пружно-пластичній основі. Розрахунок ведеться на засадах теорії контактної жорсткості. Припускається, що відрив пластинки відбувається за критичної пружно-пластичної деформації опори під дією складової сили різання P_z . Приймається, що деформація пластинки мала в порівнянні з її переміщенням у результаті обертуті навколо осі OO_1 . Повороту пластинки протидіють моменти сил опору стисненню на ділянці AOO_1 та розтягуванню на ділянці OO_1BCD (рис. 1). Опір сил зрізу на ділянці припою по задній поверхні пластинки не враховується з причини неможливості точного встановлення властивостей вертикального паяного шва та їх впливу на міцність різця. Залишковими напруженнями в зоні з'єднання зневажають.

Запропонована розрахункова схема відрізняється від відомої раніше тим, що відстань до згодної осі обертуті пластинки знаходиться розрахунковим методом (комп'ютерним перебором), а не експериментальним, рівнодіюча сили різання P_z розміщується по середині ширини шару, що знімається, а не в вершині різця. Крім цього є можливість встановити вплив геометрії різця на міцність опорної зони.

Визначивши моменти опору питомих сил, складаємо рівняння рівноваги ріжучої пластинки, що навантажена силою P_z :

$$P_z \cdot l_1 \cdot \cos \gamma = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{y_i \cdot d_i} \cdot l_i \right) + \sum_{k=1}^m \left(\frac{\sigma_k}{y_k \cdot d_k} \cdot l_k \right). \quad (1)$$

Положення осі OO_1 знаходиться перебором відстані l_1 від деякої малої величини (приймається $1/5$ довжини пластинки) до l_2 з малим інтервалом варіювання. Питомі сили опору стисненню q зміняться від q_{max} у точці А до 0 по осі OO_1 . Напруження відриву σ_b припою змінюються від σ_{max} у точці С до 0 по осі OO_1 .

Переміщення пластинки при зміні об'єму частини державки, яка підлягає стисненню:

$$y = h_d \cdot \frac{q_{max}}{6 \cdot E_d} \cdot (1 - 2 \cdot \mu_d), \quad (2)$$

де q_{max} – найбільші напруження стиснення в опорній зоні;

h_d – висота державки під пластинкою;

$E_d; \mu_d$ – модуль пружності та коефіцієнт Пуасона матеріалу державки.

З іншого боку, критичне переміщення y_{kr} може бути орієнтовно встановлене згідно з теорією контактної жорсткості [12]:

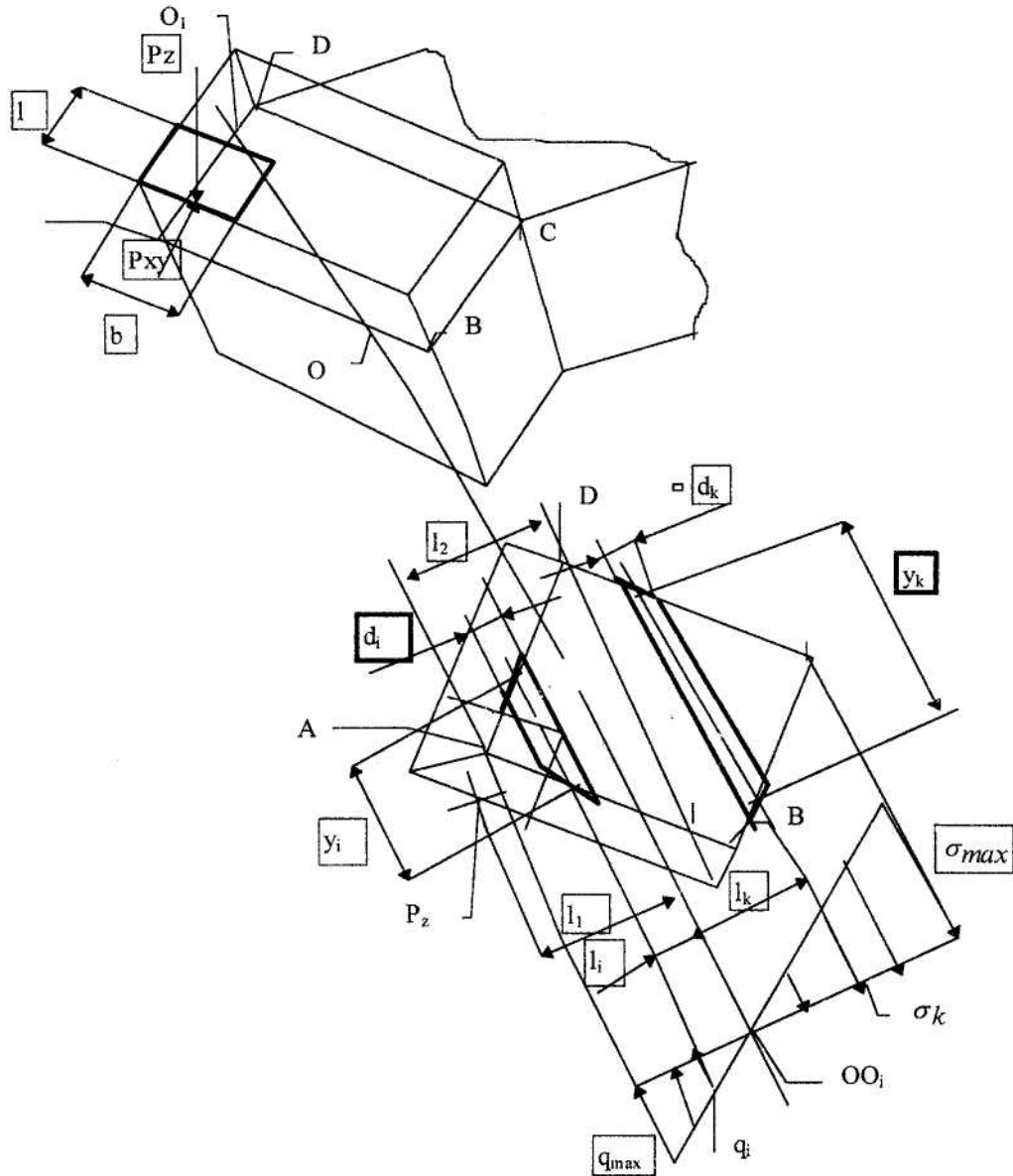


Рис. 1. Силова розрахункова схема

$$y_{kr} = 99 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_{t.pr}^2 \cdot \frac{k_1^2}{\sum k}, \tag{3}$$

де $\sigma_{t.pr}$ – приведена межа текучості матеріалу державки та припою:

$$\sigma_{t.pr} = \frac{2 \cdot \sigma_{t,d} \cdot \sigma_{t,p}}{\sigma_{t,d} + \sigma_{t,p}}; \tag{4}$$

k_1 – пружна стала пластинки твердого сплаву та припою з державкою:

$$k_1 = \frac{1 - \mu_{pr}^2}{E_{pr}} + \frac{1 - \mu^2}{E}; \tag{5}$$

$$\sum k = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_d}; \tag{6}$$

$\sigma_{t,d}, \sigma_{t,p}$ – межа текучості державки та припою;

μ_{pr}, E_{pr} – приведені коефіцієнт Пуасона і модуль пружності державки та припою розраховуються так, як і $\sigma_{t,pr}$;

μ, E – коефіцієнт Пуасона і модуль пружності твердого сплаву;

R, R_d – радіуси кривизни відповідно опорної поверхні пластинки та гнізда державки.

Приймається, що $R = 5 \cdot 10^3$ мм, R_d дорівнює нескінченності.

Якщо дорівняти праві частини формул (2) і (3) та вирішити рівняння відносно q_{max} , то отримаємо:

$$q_{max} = \frac{99 \cdot 10^{-3} \cdot R}{h_d} \cdot k_p, \tag{7}$$

де k_p – коефіцієнт пружно-пластичних властивостей зони з'єднання.

$$k_p = \sigma_{pr}^2 \cdot \left(\frac{1 - \mu_{pr}^2}{E_{pr}} + \frac{1 - \mu^2}{E} \right) \cdot \frac{12 \cdot E_d \cdot E_p}{(1 - 2 \cdot \mu_d) \cdot (E_d + E_p)}. \tag{8}$$

Далі постає задача привести розрахунки на міцність до реальних і змінних умов різання. Для цього обчислюються наступні параметри:

- складові сили різання P_z, P_x та P_y (визначаються умовами різання та геометрією різця);
- середня температура різання (залежить від сил різання, швидкості різання, подачі, коефіцієнта усадки стружки, геометрії різця, міцносних і теплофізичних властивостей оброблюваного, та теплофізичних властивостей інструментального матеріалу);
- кількість теплоти, що під час різання сходить у тіло різця (визначається температурою різання, тепло- та температуропровідністю інструментального та оброблюваного матеріалів, геометрією різця, подачею та глибиною різання);
- температура зони з'єднання пластинки та державки різця (залежить від кількості теплоти, що сходить в тіло різця, теплопровідності та температуропровідності матеріалів пластинки, припою та державки, розмірів та геометрії різця).

Визначивши ці взаємопов'язані характеристики, є можливість врахувати ситуацію, коли силові параметри різання не збільшуються, а різець руйнується внаслідок збільшення температури у зоні з'єднання. Ріст температури при цьому веде до зниження міцносних та пружно-пластичних властивостей матеріалів припою та державки різця, що й викликає відрив пластинки.

Вирахування величин, перелічених у перших трьох пунктах, проводиться за відомими опублікованими формулами [1, 8, 9, 10]. Для віднайдення температури зони з'єднання пропонується наступна методика.

Плошадка контакту стружки з передньою поверхнею різця представляється як нерухоме пласке джерело теплоти з температурою на поверхні, яка дорівнює середній температурі різання, та інтенсивністю:

$$q_f = \frac{Q}{F}, \tag{9}$$

де Q – кількість теплоти, яка сходить у різець за одиницю часу;

F – площа контакту стружки з передньою поверхнею;

$$F = b \cdot l, \tag{10}$$

де b – ширина різання, м;

l – довжина контакту стружки з передньою поверхнею, м.

Для розрахунку температурного поля твердого необмеженого тіла, в якому діє пласке нерухоме невинно діюче джерело інтенсивністю q , існує формула [9]:

$$\theta(x, y, z, \tau) = \frac{q_f}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^l dx_u \cdot \int_{-b}^{+b} \frac{1 - \Phi \left(\frac{R}{4 \cdot \omega \cdot \tau} \cdot \frac{R}{R} \right)}{R} dz_u, \tag{11}$$

де

$$R = \sqrt{(x_u - x)^2 + y^2 + (z_u - z)^2}, \tag{12}$$

x, y, z – координати точки тіла, що розглядається;
 x_u, y_u, z_u – координати джерела теплоти;
 τ – час в секундах;
 ω – коефіцієнт температуропровідності;
 λ – коефіцієнт теплопровідності.

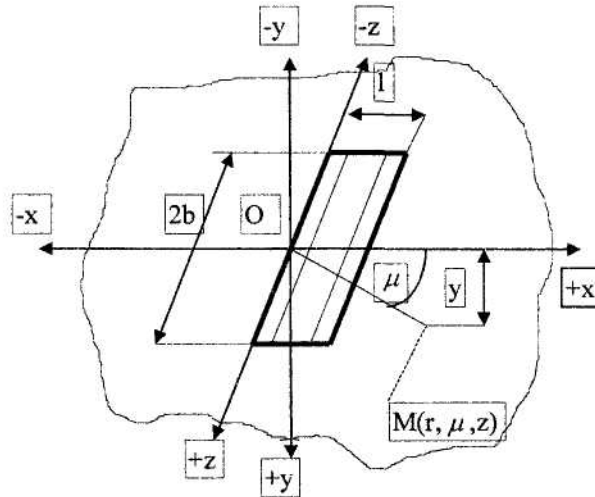


Рис. 2. Нерухоме плоске джерело теплоти в необмеженому тілі

При сталому теплообміні ($\tau \rightarrow \infty$):

$$\theta(r, \mu, z) = \frac{q_l \cdot l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot T(\rho, \mu, \eta, \zeta); \tag{13}$$

$$\rho = \frac{r}{l}; \quad \eta = \frac{b}{l}; \quad \zeta = \frac{z}{b}. \tag{14}$$

Приблизні значення функції $T(\rho, \mu, \eta, \zeta)$ розраховуються за формулами та графіками, які наведені у [9].

За аналогією з необмеженим тілом, якщо не враховувати теплообмін з навколишнім середовищем, для напівобмеженого твердого тіла є можливість скласти рівняння:

$$\theta(r, \mu, z) = \frac{q_l \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot T(\rho, \mu, \eta, \zeta). \tag{15}$$

Якщо представити ріжучу частину різця як тригранний кут, то його тіло спрощено може розглядатись як частина напівпростору, обмежена передньою та двома задніми поверхнями різця.

У тригранному куті $\angle AOB$ двогранні кути:

$$\angle B = \frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma; \tag{16}$$

$$\angle A = \frac{\pi}{2} - \alpha_1. \tag{17}$$

Плаский кут $\angle C = \angle \varepsilon$ (кут при вершині різця)

$$\angle \varepsilon = \pi - \varphi - \varphi_1. \tag{18}$$

Двогранний кут $\angle C$ та пласкі кути $\angle a$ і $\angle b$ розраховуються за допомогою рівнянь аналогії Непера сферичної геометрії:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{A-B}{2}\right) = \frac{\sin\left(\frac{a-b}{2}\right)}{\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)} \cdot \operatorname{ctg} \frac{c}{2}; \tag{19}$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{A+B}{2}\right) = \frac{\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)}{\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)} \cdot \operatorname{ctg} \frac{c}{2}; \tag{20}$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{a-b}{2}\right) = \frac{\sin\left(\frac{A-B}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A+B}{2}\right)} \cdot \operatorname{tg}\frac{c}{2}; \quad (21)$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{a+b}{2}\right) = \frac{\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)}{\cos\left(\frac{A+B}{2}\right)} \cdot \operatorname{tg}\frac{c}{2}; \quad (22)$$

та теореми синусів для тригранного кута:

$$\sin C = \frac{\sin A \cdot \sin c}{\sin a}. \quad (23)$$

Сума двограних кутів тригранного кута:

$$s = \angle A + \angle B + \angle C; \quad (24)$$

$$e = s - \pi; \quad (25)$$

де e – надлишок, який і дорівнює величині тригранного кута.

Тоді для ріжучої частини різця запишеться формула:

$$\theta(r, \mu, z) = \frac{q_f \cdot l}{e \cdot \lambda} \cdot T(\rho, \mu, \eta, \zeta). \quad (26)$$

У наведених рівняннях не враховується розсіяння тепла в навколишньому середовищі. У тому випадку, коли при різанні не застосовується СОР, то втратами тепла на теплообмін з повітрям можна зневажити.

Теплова розрахункова схема прохідного різця представлена на рис. 3.

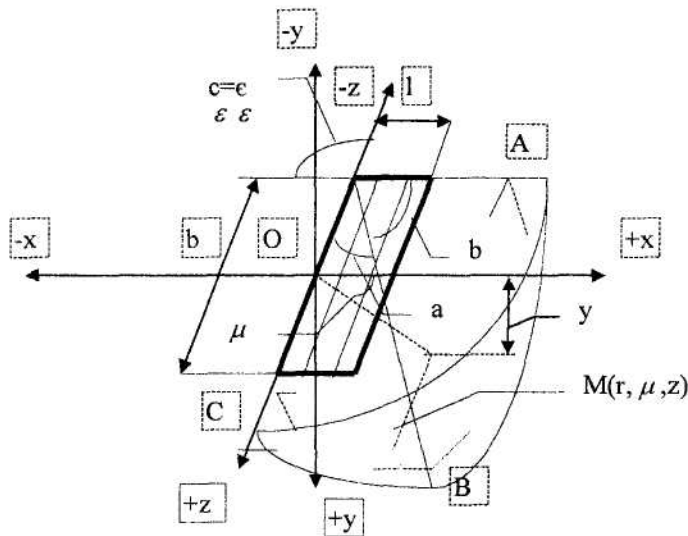


Рис. 3. Нерухоме плоске джерело теплоти на поверхні тригранного необмеженого клина

Для спрощення практичних розрахунків температура під пластинкою визначається орієнтовно, усереднено на двох умовних ділянках – ділянці зім'яття та ділянці відриву. При цьому значення ξ не враховується.

Ідеальне теплове джерело при різанні (рис. 2) має конфігурацію $2b \times l$, де $b \geq l$. Реальне теплове джерело при різанні (рис. 3) має іншу конфігурацію: $b \times l$, при цьому може бути кілька варіантів:

$$b \gg l; \quad b \geq l; \quad b < l; \quad b \ll l; \quad (27)$$

де b – ширина різання;

l – довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця.

Якщо $b \gg l$ або $b \geq l$, тоді $\eta = b/l$ (рис. 4,а).

Якщо $b \ll l$ або $b \leq l$, тоді $h = l/b$ (рис. 4,б).

У випадку, коли $b \approx l$ при розрахунках виникають досить великі похибки. Їх, у значній мірі, збільшують умовність приведення необмеженого тіла до обмеженого, не врахування втрат тепла, емпіричність розрахунку кількості тепла, яке сходить у тіло різця, та деякі інші умови.

Для зменшення похибок вводиться змінний коефіцієнт приведення k_x , який визначається наступним чином.

Очевидно, що температура під пластинкою, під зоною різання θ_h , вирахована за формулою (26) при умові, що товщина $h \rightarrow 0$ (у розрахунках приймалась $h = 0,1$ мм) повинна співпадати з середньою температурою різання θ_t . Якщо вони не співпадають, тоді:

$$\frac{\theta_h}{\theta_t} = k_x. \tag{28}$$

Після цього формула (26) буде мати вигляд:

$$\theta_h(r, \mu, z) = \frac{q \cdot l}{e \cdot \lambda \cdot k_x} T(\rho, \mu, \eta, \zeta). \tag{29}$$

Коефіцієнт k_x залежить від умов різання, тому його треба вираховувати кожен раз при зміні V, t, S, k_a та деяких інших вихідних даних.

Подана теплова розрахункова схема та методика розрахунку температур під пластинкою різця в цілому задовольняє подальшому встановленню взаємозв'язку між умовами протікання процесу різання, властивостями зони з'єднання пластинки і державки та міцністю ріжучої частини різця. У табл. 1 наведені значення температури під пластинкою прохідного різця при обробці конструкційної сталі твердим сплавом Т5К10, отримані за емпіричною формулою [12] та розрахунком за даною методикою. Менші значення температур, отриманих за експериментальною формулою, пояснюється тим, що заміри температур для виведення залежності проводились на відстані 0,5 мм від головної та допоміжної задніми поверхнями. А в даній роботі температура вираховувалась під умовним центром контакту стружки з передньою поверхнею різця.

Таблиця 1

Перетин різця, мм	Головний кут у плані, гр	Глибина різання, мм	№ п/п	Розрахункова руйнівна подача, мм/об	Швидкість різання, м/хв	Експеримент. температура, °С	Розрахункова температура, °С	№ п/п	Розрахункова руйнівна подача, мм/об	Швидкість різання, м/хв	Експеримент. температура, °С	Розрахункова температура, °С		
16/25	45	4	1	0.75	80	445	475	6	0.8	120	496	537		
		5	2	0.65		432		7			0.65		494	527
		6	3	0.55		438		8			0.6		507	538
		7	4	0.5		446		9			0.55		484	536
		8	5	0.5		454		10			0.5		499	533

Щоб виконати перелічені вище розрахунки та змоделювати процес руйнації напайного різця відділенням пластинки, необхідно окреслити масив вихідних даних: швидкість, подача та глибина різання; коефіцієнт усадки стружки; передній та задній кут, кути у плані, допоміжний задній кут, радіус заокруглення ріжучої кромки, радіус заокруглення вершини різця, фаска зносу по задній поверхні; межа міцності, коефіцієнти температуро- та теплопровідності оброблюваного матеріалу; модуль Юнга, коефіцієнт Пуасона, коефіцієнти температуро- та теплопровідності матеріалів державки, припою та пластинки різця; межа текучості матеріалів державки та припою; межа міцності на відрив матеріалу припою; радіуси кривизни опорної поверхні пластинки та державки різця; розміри пластинки та перетину державки різця.

Для прискорення практичних розрахунків за приведеною вище методикою розроблена комп'ютерна програма на мові програмування "Паскаль". Вона дозволяє отримати результати через 1-5 хвилин після вводу необхідних даних та початкових умов різання, з достатнім ступенем вірогідності оцінити загрозу відриву пластинки по припою, ймовірну руйнівну подачу та відстань від вершини різця до осі повороту пластинки при відриві.

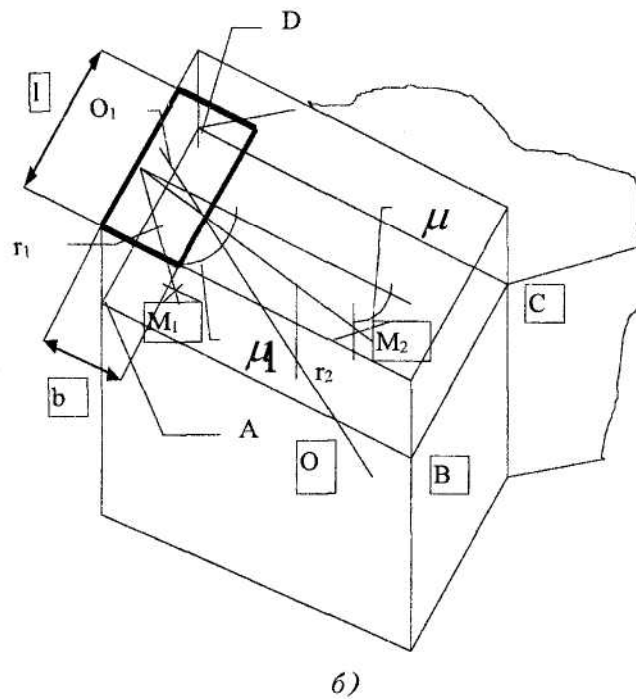
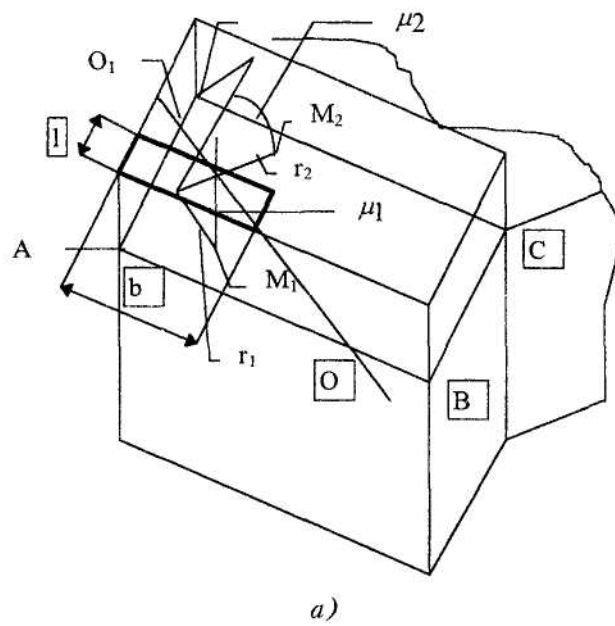


Рис. 4. Теплова розрахункова схема

У табл. 2 для порівняння наведені деякі результати розрахунків за поданою методикою та опубліковані експериментальні дані.

Таблиця 2

Перетин різця, мм	Головний кут у плані, гр	Глибина різання, мм	Руйнівна подача, мм/об	Швидкість різання, м/хв	Відношення АО1/AD	Відношення АО/AB
Експеримент [12]						
16/25	45	5-8	0.6-0.7	70-80	0.4-1	0.25-0.95
Розрахунок						
16/25	45	5	0.65	80	0.95	0.95
-/-	-/-	6	0.55	-/-	0.97	0.97
-/-	-/-	7	0.5	-/-	0.97	0.97
-/-	-/-	8	0.5	-/-	0.95	0.95

При обчисленні розрахункової руйнуючої подачі у комп'ютерній програмі враховується зниження міцносних та пружно-пластичних властивостей матеріалів зони з'єднання. Розрахунки за запропонованою методикою можливі при варіюванні головного кута у плані в межах від 30 до 89 градусів, допоміжного кута у плані – від 5 до 45 градусів.

ЛІТЕРАТУРА.

1. *Абрамов Ю.Ф.* и др. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. *Беляев Н.М.* Основы теплопередачи: Учебник. – К.:Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 343 с.
3. *Бетанели А.И.* Хрупкая прочность режущей части инструмента. Грузинский политехнический институт им. В.И. Ленина. – Тбилиси, 1969.
4. *Василюк Г.Д.* Влияние геометрических и конструктивных параметров на прочность режущей части черновых твердосплавных резцов. Диссертация. – Краматорск, 1969.
5. *Миранцов Л.М.* Влияние температуры в опорной зоне твердосплавных резцов на режимы резания. Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент // Экспресс-информация, 1978. – № 8. – С. 7–11.
6. *Остафьев В.А.* Расчёт динамической прочности режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.
7. *Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.* Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
8. *Резников А.Н.* Теплофизика процесса механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
9. *Резников А.Н.* Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 288.
10. *Силин С.С.* Метод подобия при резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
11. *Степчин О.А.* Розрахунок міцності токарних напайних відрізних різців // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту, 1997. – № 6.
12. *Хаев Г.Л.* Прочность режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.

СТЕПЧИН Олег Анатолійович – аспірант кафедри металорізальних верстатів та систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

– міцність токарних різців.