

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

(Представлено д.т.н., проф. Мельничуком П.П.)

В статті проведено оцінку існуючих методів розрахунку параметрів стану поверхневого шару при обробці загартованих сталей торцевим фрезеруванням.

Вступ. На даний час спостерігається постійне підвищення вимог, щодо якості та економічної ефективності продукції машинобудівних підприємств. Відповідно підвищуються і вимоги до параметрів стану поверхневого шару, котрі в подальшому безпосередньо впливають на подальшу надійність та довговічність продукції машинобудування. Разом з тим з'являється необхідність для проведення більш точних досліджень, щодо впливу технологічних факторів на формування параметрів стану поверхневого шару. Поява нових інструментальних надтвердих матеріалів (НТМ) – композитів на основі алмазу і кубічного нітриду бору (КНБ), основними перевагами яких є можливість роботи при високих швидкостях різання, а також в умовах складного навантаження, тертя, високих температур, обумовлюють створення нових специфічних для даного матеріалу методів розрахунку параметрів стану поверхневого шару.

Мета роботи. Провести аналіз наявних методів розрахунку параметрів стану поверхневого шару для умов торцевого фрезерування загартованих сталей.

Викладення основного матеріалу. Параметри стану поверхневого шару містять: точність, геометричні, фізико-хімічні та інші характеристики, що безпосередньо впливають на експлуатаційні властивості деталей машин. Найбільше уваги в дослідженнях приділяється шорсткості, залишковим напруженням, мікротвердості та структурно-фазовому складу поверхневого шару оброблюваної деталі.

Для технологічного забезпечення оптимальної шорсткості поверхні з умовами експлуатації виробу важливо знати взаємозв'язок між критеріями шорсткості поверхні й технологічними чинниками (методами і режимами різання, геометрії, зносу і матеріалу різального інструменту, мастильно-охолоджуючих середовищ, жорсткості й вібростійкості технологічної системи (ТС) та ін.), а також між фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу.

У роботі [2] представлено розрахункова формула для визначення висоти нерівностей R_z , в якій значення подачі замінено функцією залежної від товщини зрізу a_1 . Визначення товщини зрізу a_1 залежно від технологічних і геометричних чинників процесу різання, а також від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу може бути отримано шляхом спільного рішення щодо a_1 критеріального рівняння процесу різання [2] і рівняння для визначення тангенціальної складової сили різання [3].

$$R_z = \left[\frac{0,66a_1^{0,125} c_p \theta_0 \left(4,3 \sin^{0,115} a V_0^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left(\frac{t}{m} \right)^{0,3} + \lambda_p \varepsilon \beta a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right)}{\tau_p a^{-0,43} \sin^{0,025} a V_0 \lambda t^{0,26} m^{0,49-n_0} c_0 b^{0,04} \rho_1^{n_0-0,1} (1-0,45 \sin \gamma)} \right]^{1-n_0} \frac{1}{8r}, \quad (1)$$

де t – глибина різання, мм; θ – температура в зоні різання, °С; V – швидкість різання, м/с; λ, λ_p – коефіцієнти теплопровідності оброблюваного та інструментального матеріалу, дж/м. с. град.; γ, α – передній і задній кути різця, град.; β, ε – кут загострення і кут при вершині різця, град.; ρ_1 – радіус заокруглення різальної кромки, мм; τ_p – опір оброблюваного матеріалу пластичному зсуву, МПа; a – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу, м²/с; b – сумарна довжина робочих частин різальних кромки, м; c_0, n_0 – коефіцієнти, які залежать від співвідношення радіуса різальної кромки ρ_1 і товщини зрізу a_1 ; c_p – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, дж / м³ °С.

Маючи дані про загальну глибину наклепу, розташування деформованих шарів у наклепаній області, можна більш ретельно і досконало розробити технологічний процес чистової обробки тієї чи іншої деталі, враховуючи, що зміна властивостей поверхневого шару металу може мати значний вплив на виконання наступних чистових операцій, таких, наприклад, як чистове точіння, нарізання різі, чистове фрезерування, чистове розгортання та ін.

Існують декілька способів розрахункового визначення глибини наклепу. Наприклад, у роботі [4] застосовувався рентгенівський аналіз для визначення глибини наклепу, в якому глибину наклепу можна приблизно розрахувати за формулою:

$$h = (0,25 \div 0,35)t, \tag{2}$$

де t – глибина різання, мм.

В роботі [6] отримана інша залежність для визначення глибини наклепу, виходячи з положення, що глибина наклепу в поверхневому шарі дорівнює глибині залягання пластичних деформацій:

$$h = \frac{0,205S \sin 2\varphi}{RA^{-m} B^{1,45-m-p} 0,89^n 1,25^{-p} \left(\frac{\rho_1}{a_1} \times \frac{B^{0,55}}{\sin^{0,55} \alpha \sin^{0,04} \gamma} \right)^{n-p}} \times \frac{1,65\alpha_1 \theta_{пв} E \left[RA^{-m} B^{-m-p} 0,89^n 1,25^{-p} \left(\frac{\rho_1}{a_1} \times \frac{B^{0,55}}{\sin^{0,55} \alpha \sin^{0,04} \gamma} \right)^{n-p} + \left(\frac{0,2055 \sin 2\varphi}{HB^{1,45}} \right)^{n-p} \right]}{\sigma_T RA^{-m} B^{-m-p} 0,89^n 1,25^{-p} \left(\frac{\rho_1}{a_1} \times \frac{B^{0,55}}{\sin^{0,55} \alpha \sin^{0,04} \gamma} \right)^{n-p}}, \tag{3}$$

де σ_T – межа плинності оброблюваного матеріалу, МПа; a_1 – товщина зрізу, мм; γ – передній кут різця, град; α і φ – задній кут і головний кут у плані різця, град; $\theta_{пв}$ – температура плавлення оброблюваного матеріалу; R, p, m, n – коефіцієнти, що залежать від швидкості різання і властивостей оброблюваного матеріалу.

$$B = \frac{\sqrt{a_1}}{a}, \tag{4}$$

де B – критерій подібності процесу різання, що характеризує вплив режимних умов, порівняно з впливом теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу;

B – критерій подібності процесу різання, що відображає вплив ступеня пластичних деформацій металу (припуску, що знімається), який для умов оптимального різання має вираз:

$$B = \frac{\tau_p}{0,215 \cdot c_p \cdot \theta_{пв}}. \tag{5}$$

Для випадку вільного різання існує залежність для визначення глибини зміцнення поверхневого шару деталі при механічній обробці [7]:

$$h = \frac{2R(1 + \sin \eta)}{b\sigma_{0,2} [2(\pi + \beta_1) - \sin 2\eta + \sin 2(\eta + \beta_1)]}, \tag{6}$$

де R – сила різання, Н; b – ширина оброблюваного зразка, мм; β – кут зсуву; η – кут, тангенс якого дорівнює:

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{P_y}{P_z}. \tag{7}$$

Визначити залишкові напруження можливо за рахунок алгебраїчної суми напружень від дії силового, температурного факторів і від дії структурно-фазових перетворень:

$$\sigma = \sigma_{суп} + \sigma_{тем} + \sigma_{с-ф} + \sigma_{поч}. \tag{8}$$

Переважаючий вплив на формування залишкових напружень має сила тертя по передній і задній поверхнях. Між силовим впливом і залишковими напруженнями існує тісний зв'язок, знайти який можна, спираючись на теорію пружності. Для початку необхідно визначити напружено-деформований стан у поверхневому шарі деталі [7].

Напружене поле під задньою поверхнею інструмента залежить від зовнішніх сил P_N і F .

Рівнодіюча зовнішніх сил нахилена до горизонтальної осі X під кутом ϕ , який визначається різницею між кутом тертя ρ_1 і переднім кутом інструмента γ :

Провівши осі X і Y у даній системі координат. Напруження σ_T на елементарній площині з розмірами b і $ds = rd\alpha$, де b – ширина зрізу.

Пружно напружена частина зони різання показана на рисунку 2.

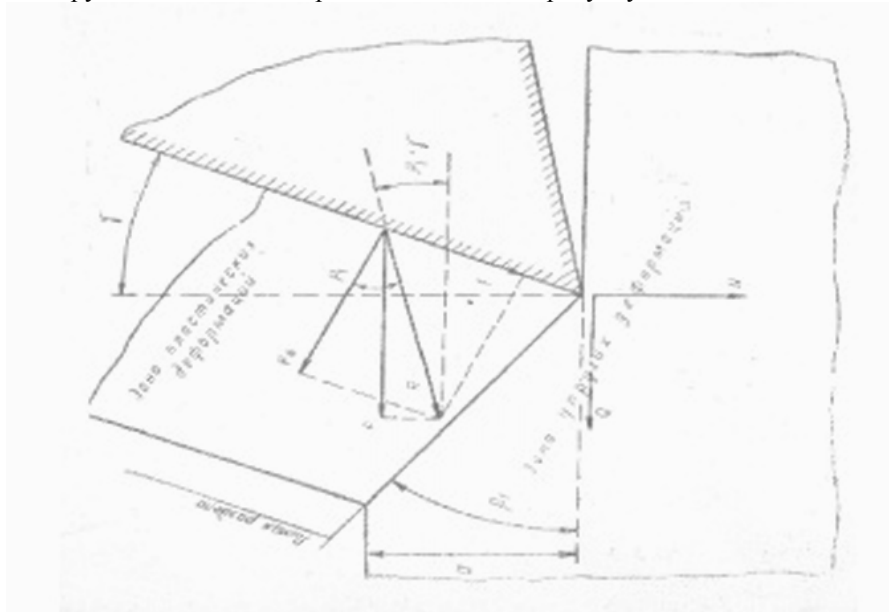


Рис. 1. Схема діючих зовнішніх сил [7]

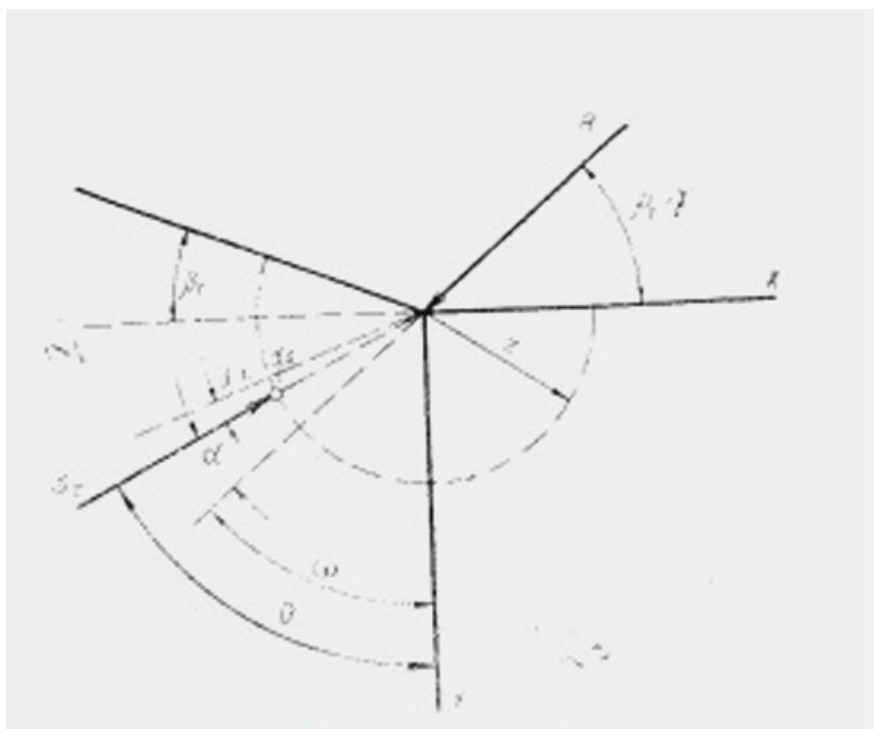


Рис. 2. Умовна схема навантаження

Тут рівнодіюча зовнішніх сил R прикладена вздовж лінії по ширині зрізу. Користуючись теорією пружності, що для будь-якої точки напівплощини радіальні напруження виражаються залежністю:

$$\sigma_r = -K \frac{\cos \alpha}{r}, \quad (9)$$

де K – постійна, α – кут між напрямком прикладеної сили і радіусом-вектором розглянутої точки (елементарної площадки); r – відстань від початку координат до елементарної площадки (точки).

Складається рівняння рівноваги і визначається з нього коефіцієнт K :

$$\int_{-\left(\frac{\pi+\beta_1-\omega}{2}\right)}^{+\left(\frac{\pi+\omega}{2}\right)} \sigma_r \cdot b \cdot ds \cdot \cos \alpha = -R. \quad (10)$$

Підставивши значення σ_r та ds і розрахувавши інтеграл, проводиться підстановка меж інтегрування (враховуючи, що $\omega - 90 - \phi - 90 - (\rho_1 - \gamma)$, а $\alpha = \theta - \omega = \theta - [90 - (\rho_1 - \gamma)]$).

$$I = \frac{1}{2}(\pi + \beta_1) - \frac{1}{4}[\sin 2(\rho_1 - \gamma) - \sin 2(\rho_1 - \gamma + \beta_1)]. \quad (11)$$

Підставивши отримане значення інтеграла I у початковий вираз, можна з нього отримати коефіцієнт K і підставити у формулу:

$$\sigma_r = -\frac{4R \cdot \sin(\theta + \rho_1 - \gamma)}{b \cdot r [2\pi + 2\beta + \sin 2(\rho_1 - \gamma + \beta_1) - \sin 2(\rho_1 - \gamma)]}. \quad (12)$$

Виключивши параметр β_1 як малозначущий, формула (12) матиме такий вигляд:

$$\sigma_r = -\frac{2R}{\pi br} \sin(\theta + \rho_1 - \gamma). \quad (13)$$

Рівнодіюча зовнішніх сил визначається за формулою:

$$R = -\frac{2P}{\pi br} [\sin \theta + \operatorname{tg}(\rho_1 - \gamma) \cos \theta]. \quad (14)$$

Звідси після ряду перетворень отримаємо:

$$\sigma_r = -\frac{2R}{\pi br} [\sin \theta + \operatorname{tg}(\rho_1 - \gamma) \cos \theta]. \quad (15)$$

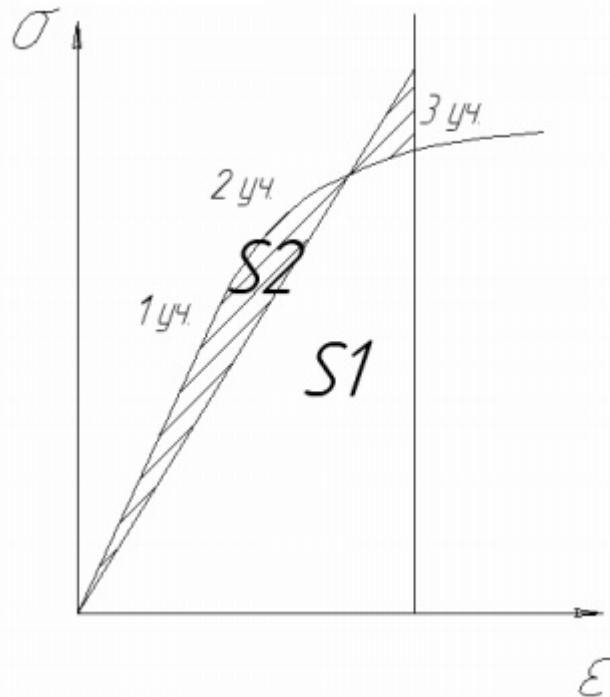


Рис. 3. Діаграма напруження–деформація

У роботі [8] пропонується розрахунковий механізм визначення залишкових напружень, заснований на таких припущеннях:

- поверхня оброблюваної заготовки в розрізі представляє собою сукупність тонких стрижнів з жорстко закріпленими кінцями;
- поверхня при переміщенні різального інструменту попеременно піддається стисненню і подальшому розтягуванню;
- визначення залишкових напружень, проводиться на основі діаграми $\sigma - \varepsilon$, для якої отримано математичний опис [9]:

При стиску залежність $\sigma - \varepsilon$ описує криву, що складається з 3-х ділянок (рис. 3):

- ділянка пружної деформації:

$$\sigma_y = E \cdot \varepsilon \text{ при } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{np}; \quad (16)$$

- ділянка малих пластичних деформацій:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_y + H (\varepsilon - \varepsilon_{np})^n \text{ при } \varepsilon_{np} < \varepsilon < \varepsilon_{0,2}; \quad (17)$$

- ділянка різкого зростання величини умовних напружень при відносно невеликому зростанні пластичної деформації:

$$\sigma = \sigma_{0,2} + (a \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{0,2}))^n \text{ при } \varepsilon_{0,2} < \varepsilon < \varepsilon_{e,cm}. \quad (18)$$

Напруження, що виникають у оброблюваній деталі, визначають за формулою [8]:

тангенційні:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P_z \cdot (\operatorname{tg} \alpha \cdot y \cdot x^2 - x^3)}{\pi \cdot b \cdot (x^2 + y^2)^2}; \quad (19)$$

нормальні:

$$\sigma_y = \frac{2 \cdot P_z \cdot (\operatorname{tg} \alpha \cdot y^3 - x \cdot y^2)}{\pi \cdot b \cdot (x^2 + y^2)}; \quad (20)$$

сумарні:

$$\sigma_x = \sigma_x + \sigma_y. \quad (21)$$

Якщо врахувати, що робота навантаження дорівнює роботі розвантаження контактної ділянки, то можна отримати величини залишкових напружень з формул:

- при стиску:

$$\sigma_{зал,см} = 2 \cdot \int_{E_{np}}^{E_{\partial,cm}} \frac{\sigma \cdot dE}{E_{\partial,cm} - E_{np}} - \sigma_{\partial,cm}; \quad (22)$$

- при розтягу:

$$\sigma_{зал,роз} = 2 \cdot \int_{E_{np}}^{E_{\partial,роз}} \frac{\sigma \cdot dE}{E_{\partial,роз} - E_{np}} - \sigma_{\partial,роз}. \quad (23)$$

Сумарні залишкові напруження від дії силового фактора визначаються за формулою:

$$\sigma_{сум} = \sigma_{зал,см} + \sigma_{зал,роз}. \quad (24)$$

Утворення величини технологічних залишкових напружень у поверхневому шарі деталі від дії температурного фактора [10]:

$$\sigma = \frac{\Delta l_{\partial\partial\partial\partial}}{l} E = \frac{l(\theta_2 - \theta_1)\alpha}{l} E = (\theta_2 - \theta_1)\alpha \cdot E. \quad (25)$$

Формування залишкових напружень від дії структурно-фазових перетворень:

$$\sigma_{с-ф} = E \left(1 - \frac{\rho_{11} \cdot m_{11} + \rho_{12} \cdot m_{12} + \dots + \rho_{1i} \cdot m_{1i}}{\rho_{21} \cdot m_{21} + \rho_{22} \cdot m_{22} + \dots + \rho_{2i} \cdot m_{2i}} \right), \quad (26)$$

де E – модуль пружності; ρ_{1i} – густина фаз до фазових перетворень; ρ_{2i} – густина фаз після фазових перетворень; m_{1i} – процентний вміст фаз до фазових перетворень; m_{2i} – процентний вміст фаз після фазових перетворень.

Висновки. Огляд літератури показав, що на сьогоднішній час існує безліч методів розрахунку параметрів стану поверхневого шару. Поява нових інструментальних надтвердих матеріалів дозволяють проводити обробку важкооброблюваних загартованих сталей, при значних режимах різання, торцевим фрезеруванням. Тому в подальшому планується розробити нові методики розрахунку та дослідження параметрів стану поверхневого шару.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Мельничук П.П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : автореф. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Петро Петрович Мельничук. – К., 2002. – 36 с.
2. Силин С.С. Исследование термомеханических явлений при резании металлов методами теории подобия автореф. ... д-ра наук / С.С. Силин. – М., 1970.

3. *Силин С.С.* Применение метода подобия для определения обрабатываемости резанием современных материалов / *С.С. Силин* // Новые методы определения обрабатываемости материалов резанием и шлифованием. – Ярославль, 1957. – 214 с.
4. *Кривоухов В.А.* Качество поверхностного слоя / *В.А. Кривоухов, А.Д. Чубаров.* – М. : Машиностроение, 1970. – 180 с.
5. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин / *А.Г. Суслов.* – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
6. *Безъязычный В.Ф.* Расчётное определение параметров качества поверхностного слоя при точении / *В.Ф. Безъязычный* // Высокоэффективные методы обработки жаропрочных и титановых сплавов : межвуз. сб. ; Куйбышевский авиац. ин-т. им. С.П. Королёва. – Куйбышев : КуАИ, 1981. – 165 с.
7. *Курицын В.Н.* Определение глубины упрочнения поверхностного слоя детали при механической обработке / *В.Н. Курицын, И.Б. Кравченко* // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов. – Тр. КПТИ. – Вып. 1. – Куйбышев : КПТИ, 1978. – 162 с.
8. *Кравцов Б.А.* Силы резания, остаточные напряжения и трение при резании металлов / *Б.А. Кравцов.* – Куйбышев, 1962. – 180 с.
9. Формирование остаточных напряжений при высокоскоростной обработке с тепловым воздействием / *Т.Г. Насад, Г.А. Козлов, Д.Е. Кирюшин и др.* // материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в машиностроении». – Самара, 2002. – 42 с.
10. *Маталин А.А.* Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / *А.А. Маталин.* – М. : Машгиз, 1956 – 225 с.

СНИТКО Андрій Миколайович – аспірант кафедри технології машинобудування і конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка металів різанням;
- властивості поверхневого шару металевих конструкційних матеріалів.

Подано 13.10.2011

