



УДК 621.91

DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-17

АНАЛІЗ ПЛОСКОГО ПЛАСТИЧНОГО ПЛИНУ МАТЕРІАЛУ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ОБРОБЛЮВАНOSTІ НА МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

Колодій О. С., к.т.н.

ORCID: 0000-0003-2237-6730

Сушко О. В., к.т.н.

ORCID: 0000-0002-9840-3611

*Таврійський державний агротехнологічний університет**імені Дмитра Моторного*

e-mail: aelxandr@rambler.ru

Постановка проблеми. Тенденція до все більш досконалих металорізальних верстатів та способів обробки робить все більш важливою розробку правильної теорії обробки, яка б дозволила пов'язати основні та допоміжні величини способів. В ідеалі, теорія повинна полегшити прогнозування таких факторів, як посилення різання (потужність, що витрачається), стійкість ріжучого інструменту, якість поверхні, коли відомі основні фізичні та механічні властивості деталі та інструменту, а також робочі умови (швидкість різання, подача, форма інструменту).

Така теорія була би вкрай необхідною при оцінюванні оброблюваності матеріалу, при виборі оптимальних умов різання та програмуванні металорізальних верстатів з ЧПУ [1]. У теперішній час ці проблеми вирішуються переважно емпіричним шляхом; вимірювання потребують багато часу, а отримані результати можна переносити з достатнім ступенем надійності тільки на робочі умови, подібні умовам випробувань. У роботі зроблено спробу розробки теоретичного методу для оцінювання оброблюваності металорізальних верстатів, який зможе надати результати, які застосовуються в більш широкій області умов різання.

Аналіз останніх досліджень. При дослідженні процесів різання більшість дослідників враховували відносно простий спосіб прямокутної обробки, при якому верхній шар матеріалу знімається інструментом з прямою ріжучою кромкою. Крім того, звичайно обмежуються обробкою з безперервною стружкою, яка утворюється без обривів пластичною деформацією. Наріст на кромці не враховується. Коли товщина стружки мала по відношенню до ширини стружки, тоді процес відповідає рівномірному руху з плоскою деформацією. Теорії, які базуються на цій моделі, можуть також охоплювати ті умови, які призводять до переривистого стружкоутворення та утворення наросту

на ріжучій кромці. Таку теорію з відповідним наближенням можливо розповсюдити й на обробку під кутом, коли ріжуча кромка нахилена до швидкості різання (кут нахилу $> 0^\circ$), й на велику множину практично застосовуваних способів обробки.

Одним з найбільш повних досліджень даного питання було проведено М. Е. Merchant [2], який виразив силу, яка діє у напрямку швидкості різання, у величинах міцності матеріалу на зсув, кута зрізу, кута сходу стружки та середнього кута тертя на передній грані інструменту. Інше відоме рівняння кута зрізу було складено Е. Н. Lee та Schaffer [3], які застосували теорію лінії ковзання поля для вирішування цієї проблеми, які довели, що без точної оцінки кута різання неможливо зробити передбачення щодо поведінки сили різання, температур та багато чого іншого. Найкращу узгодженість між передбаченими та експериментальними величинами для кута різання було досягнуто тим, що в рівняння кута різання були введені поняття, які показують величини, вибрані як «придатні», але їх неможливо перевірити незалежними вимірюваннями [4, 5]. Тим не менш, створити теорію різання, яка дає результати, які можливо застосувати в більш широкій області умов різання та які можливо досягти з найменшими витратами труда та часу, так і не змогли.

Формулювання мети статті. Метою роботи є розробка більш реалістичної моделі теорії зсуву поверхні для аналізу оброблюваності за допомогою використання нових методів створення пластичного плину та аналізу напружень при утворенні стружки.

Основна частина. Одним з самих значних та у більшості випадків застосовуваних методів для аналізу плоского пластичного плину є метод поля ліній ковзання [6]. У цьому методі рішення приймає форму прямокутної системи кривих (ліній ковзання), напрям яких у кожній точці пластичної зони зображують напрям максимального напруження зсуву та величин видовження зсуву (у ізотропного матеріалу ці напрямки співпадають). Для змін напруження та швидкості вздовж ліній ковзання складаються рівняння. У можливому полі ліній ковзання повинні дотримуватися всі пограничні умови для натягіння та швидкості при застосуванні цих рівнянь вздовж ліній ковзання. Якщо замість цього для аналізу застосовується теорія передбачення поля ліній ковзання, то необхідна наступна перевірка: чи має величина деформації у межах пластичної зони всюди позитивні значення та чи не перевишили пов'язані з цим розподілення напруг межу текучості на розтяг (у взятих нерухомих та пружних зонах). Описання цього методу міститься в роботах Р. Л. В. Oxley та D. A. Stephenson [6, 7].

У теорії ліній ковзання передбачається, що щільність матеріалу під час пластичної деформації залишається постійною (константний об'єм), що можливо виразити величинами розтягіння у наступному

рівнянні:

$$\dot{E}_x + \dot{E}_y + \dot{E}_z = 0, \quad (1)$$

де $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{E}_z$ – Декартові компоненти величини розтягу.

Якщо стан плоскої деформації так визначається, що x, y – типова площа ковзання та ковзання не залежить від z , тоді $E_z = 0$, та:

$$\dot{E}_x = \dot{E}_y \quad (2)$$

Це рівняння можна зобразити у вигляді кола, з якого видно, що величина розтягу вздовж ліній ковзання дорівнює нулю. Це означає, що при розгляді коротких елементів ліній ковзання, їх можна представити як жорсткі ланцюги, так як розтяг вздовж елемента повинно дорівнювати нулю. Іншими словами, дві сусідні точки в пластичній зоні розташовані на одній лінії ковзання, якщо їх відносні швидкості направлені вертикально до їх з'єднувальної лінії. Ця обставина дозволяє зобразити поля лінією ковзання на основі спостережуваних картин плину. Її можна використовувати шляхом співставлення діаграми швидкості для наступної перевірки, чи припустимо запропоноване поле ліній ковзання по відношенню до швидкості.

Зміна середньої (гідростатичної) напруги стискання вздовж ліній ковзання можна визначити на основі відомого рівняння, яке виражає рівновагу напруги по відношенню до ліній ковзання [8]:

$$\begin{aligned} p + 2k\psi &= 0 - \text{постійна вздовж I-лінії ковзання} \\ p - k\psi &= 0 - \text{постійна вздовж II-лінії ковзання} \end{aligned} \quad (3)$$

При цьому p – гідростатична напруга, яка діє перпендикулярно по відношенню до ліній ковзання; k – напруга передачі зусиль зсуву (при отриманні цих рівнянь взято, як постійна), яка діє паралельно лініям ковзання; ψ – напрям обертання проти годинникової стрілки по відношенню до нерухомої вісі.

Символи I та II використовують для відмінності двох родин ліній ковзання. Лінії ковзання I при цьому ті, на які напруга зсуву діє за напрямом годинникової стрілки.

З цих рівнянь видно, що зміна p напряму залежить від кута, біля якого коливається лінія ковзання. Якщо k не приймається постійною, тоді рівняння для рівноваги напруги по відношенню до ліній ковзання виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{\delta p}{\delta s_1} + 2k \frac{\delta \varphi}{\delta s_1} - \frac{\delta k}{\delta s_2} &= 0 - \text{вздовж однієї I-лінії ковзання} \\ \frac{\delta p}{\delta s_2} - 2k \frac{\delta \varphi}{\delta s_2} - \frac{\delta k}{\delta s_1} &= 0 - \text{вздовж однієї II-лінії ковзання} \end{aligned} \quad (4)$$

При цьому S_1 і S_2 означають відстані, які вимірюються вздовж ліній ковзання I або II. Рівняння (4) були описані спочатку Christopherson [6] в роботі про аналіз ортогонального способу обробки. Якщо k змінюється під час деформації, ці рівняння показують, що зміна p вздовж лінії ковзання залежить не тільки від кута, біля якого коливається лінія ковзання, але й від величини зміни k вздовж лінії ковзання. Звідси маємо, що безперервність швидкості, як площа АВ (рис. 1) тільки тоді мають місце, коли k – постійна, і що при дійсних співвідношеннях ця площа повинна бути замінена обмеженою пластичною зоною.

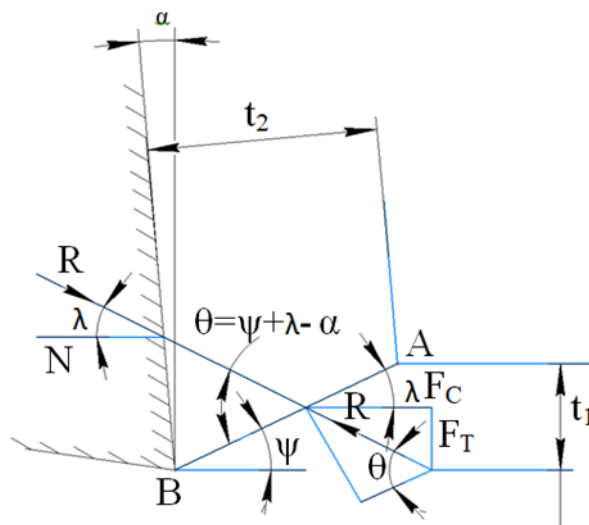


Рис. 1. Модель поверхонь зсуву

При спробі побудувати поле лінії ковзання прямо на основі експериментальної картини, Oxley і Agarіou не змогли з достатньою точністю виміряти швидкості плинущу [6-7]. Для того, щоб створити поле лінії ковзання, був розроблений метод спроб та помилок. Межі пластичної зони АВ та СВ (рис. 2) були визначені там, де був встановлений плин матеріалу, який відрізняється від основного, й, відповідно, перехід в зону стружки, яка більше не змінюється (на рисунку швидкості наведені через відстані від полюсу «Pol» до точки, що спостерігається). Було також узгоджено, що ці межі АВ і СВ будуть зображувати лінії ковзання. Система ортогональних, ілюструючих ліній ковзання кривих, внесена до пластичної зони, при цьому АВ і СВ розглядаються як лінії ковзання однієї й тієї ж родини. Швидкість матеріалу, який входить у пластичну зону, використовувалася як гранична умова, щоб з безперервності визначити швидкість по всій пластичній зоні. У прийнятій системі кривих були зроблені виправлення, щоб відповідні швидкості (траєкторії) співпали з експериментально виміряними величинами.

Щоб перевірити поле відносно напружень, використовувались рівняння (4), починаючи з А, де вільна умова поверхневої напруги відповідає $p = k$ (стискання). Швидко з'ясувалося, що поле для умов напруги не може бути правильним, якщо для обчислення p використовуються рівняння (4).

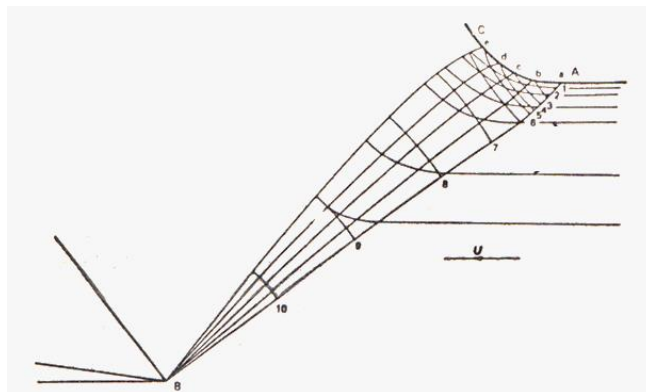


Рис. 2. Поля ліній ковзання

При точному розгляді зразу видно, що протистоящі вигини ліній ковзання АВ та СВ суперечать геометричним властивостям у відповідності з рівняннями (4). Особливо явною стає неспроможність цих рівнянь, якщо встановлений точний розподіл p вздовж АВ. При переході від А до В, зміна така, що величина p (тиск), як було показано, підвищується. При гострому інструменті результуюче зусилля різання переноситься вздовж ВА, та його напрям можна визначити з розподілу p і k вздовж АВ.

При маленькій швидкості різання припустили, що k змінюється тільки з абсолютним видовженням, причому, знехтували величиною та температурою. Для визначення k в пластичній зоні необхідно було, перш за все, обчислити розподіл видовження за допомогою кривої видовження-напруга матеріалу, яка була отримана на основі одновісного дослідження по стисканню. Щоб визначити величину видовження-напруги в комплексній системі p на основі простого дослідження по навантаженню, прийнято використовувати ефективну напругу та ефективне видовження [9]. Ефективна напруга для тривимірного напруженого стану можна виразити наступним чином:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (5)$$

при цьому $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруги. Відповідну величину для значення видовження, яка відповідає величині ефективного видовження, можна записати як:

$$\dot{\epsilon}_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2)^2 + (\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_3)^2 + (\dot{\epsilon}_3 - \dot{\epsilon}_1)^2]}, \quad (6)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – величини головного видовження.

Тепер передбачається, що для даного матеріалу ефективна напруга буде однозначною функцією ефективного видовження. При одновісному стисканні ефективна напруга стає головною напругою.

Так як видовження є рівномірно пропорційним, й головні вісі залишаються без змін, то можна інтегрувати ефективну величину видовження, та вона стає абсолютним загальним видовженням в поздовжньому напрямку. Цим можна прирівняти одновісну криву напруги-видовження до ефективної кривої – нормальна напруга-видовження.

Для ефективного абсолютного видовження дійсним буде:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\sqrt{3}} \int \tau_{max} dt, \quad (7)$$

де τ_{max} – максимальна величина видовження.

При механічній обробці неможливо обчислити цей інтеграл та виразити в величинах нормальної напруги та напруги зсуву, тому що основні напрямки змінюються під час формозміни [8]. τ_{max} можна, тим не менш, виразити в залежності від швидкості потоку наступним чином:

$$\dot{\tau}_{max} = \sqrt{\left[\left(\frac{\delta u}{\delta v} + \frac{\delta v}{\delta x}\right)^2 + 4\left(\frac{\delta u}{\delta x}\right)^2\right]}, \quad (8)$$

при цьому u и v означають швидкості в x - и y -напрямах.

Вимірюванням цих компонентів можна визначити τ_{max} та потім інтегрувати вздовж траєкторій, для того, щоб отримати ефективне абсолютне загальне видовження в поздовжньому напрямку.

Таким чином Oxley та Розенберг [6, 9] визначили розподіл k та застосували потім рівнянні (4) у фінітній диференціальній формі, щоб визначити розподіл p по всій пластичній зоні. Це показало, що зі змінюваним k протилежні вигнуті лінії ковзання АВ та СВ тепер можливі з p в точці a , незалежно від шляху його визначення [10].

Розподіл p вздовж АВ співпадає зі змінним напрямком результуючого зусилля різання. Відмінність між величинами p вздовж АВ, коли в одному випадку припускається, що k – постійне, а в іншому – змінне, відносно велика та становить величину до $3k$ [11].

В своєму аналізі дослідниками раніше не було враховано пластичного плину в стружці вздовж передньої грані інструменту, тому поле ліній ковзання не є повним.

Висновки. Вважаємо, що погане узгодження теорії поверхневого зсуву з експериментальними результатами пов'язано, в основному, з тим, що модель поверхні зсуву потребує спрощення з урахуванням пов'язаного з цим припущенням, що матеріал деформується з постійною напругою плину. Ця умова, хоча й рідко де сформульована,

присутня в усіх аналізах, які спираються на модель поверхні зсуву. Дослідження поля ліній ковзання експериментальних даних показали, що тільки з урахуванням змінної k можна отримати узгодженість між дослідженням та практикою [11]. При малих швидкостях різання можна було встановити великий вплив змінного k , внаслідок наклепу, на розподіл гідростатичних напружень, та цим – на напрямок результуючої сили різання. Хоча вплив наклепу зменшується, вплив величин видовження та температури збільшується. У наступних наших роботах ми спробуємо показати, що ці дії повинні допомогти пояснити вплив швидкості різання на процес.

Список використаних джерел:

1. Автоматичне управління процесами обробки металів різанням / О. С. Колодій та ін. Мелітополь: ТОВ Forward press, 2020. 136 с.
2. Merchant M. E. Mechanics of Metal Cutting Process. J. Applied Physics. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1707586>.
3. Lee E. H. The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining. URL: <https://www.worldcat.org/title/theory-of-plasticity-applied-to-a-problem-of-machining/oclc/49866489> (дата звернення 05.05.2020).
4. Максаров В. В. Теория и методы моделирования и управления процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке: автореферат. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. Санкт-Петербург, 2009. 22 с.
5. Тарасенко В. В., Сушко О. В. Аналіз існуючих теорій руйнування крихких матеріалів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2016. Вип.16, т. 2. С. 132-139.
6. Oxley P. L. B. Introducing Strain-Rate Dependent Work Material Properties in the Analysis of Orthogonal Cutting. Annals of the CIRP. URL: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/10812> (дата звернення 07.04.2020).
7. Stephenson David A., Agapiou John S. Metal Cutting Theory and Practice: CRC Press, 2018. 947 с. URL: <https://www.routledge.com/Metal-Cutting-Theory-and-Practice> (дата звернення 26.02.2020).
8. Sushko O. V., Kolodii O. S., Penyov O. V. Individual forecasting of technical condition of machines and development of method for determining the conditional function of distributing their residual resource. *Machinery & Energetics. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine: Journal of Rural Production Research*. . Kyiv, 2019. Vol. 10, № 4. P. 63-69.
9. Розенберг Ю. А., Тахман С. И. Силы резания и методы их определения: в 2 ч. Курган, 2005. Ч. 1. Общие положения: учеб. пособ.



128 с.

10. Филиппов А. В., Проскоков А. В. Исследование процесса стружкообразования при резании металлов методом цифровой корреляционной спекл-интерферометрии. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. Москва, 2014. № 2.

11. Grains Dynamic Strength Determination and the Optimal Combination of Components of a Diamondiferous Layer of Grinding Wheels. Modern Development Paths of Agricultural Production. Trend and Innovations / O. Sushko et al. Tavria State Agrotechnological University. Melitopol, 2019. P. 259-266.

АНАЛІЗ ПЛОСКОГО ПЛАСТИЧНОГО ПЛИНУ МАТЕРІАЛУ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ОБРОБЛЮВАНОСТІ НА МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

Колодій О. С., Сушко О. В.

Анотація

У роботі зроблено спробу створення теорії машинної обробки, за допомогою якої можна визначати напруги та температури при обробці матеріалів на підставі головних властивостей матеріалу та умов різання. Така теорія дозволяє полегшити прогнозування таких факторів, як посилення різання (потужність, що витрачається), стійкість ріжучого інструменту, якість поверхні, коли відомі основні фізичні та механічні властивості деталі та інструменту, а також робочі умови (швидкість різання, подача, форма інструменту). Розглядається шлях, як можуть бути визначені важливі допоміжні величини, стійкість різального інструменту та зусилля різання у зв'язку з геометричними умовами та швидкостями процесу. Коротко розглянута теорія поверхневого зсуву. Описані експериментальні та теоретичні дослідження стружкоутворення, результати якого стали основою для цієї роботи та вказані причини відносно поганого узгодження теорії поверхні зсуву з результатами, отриманими дослідним шляхом.

Ключові слова: металорізальні верстати, оброблюваність, теорія зсуву, стружкоутворення, режими різання, лінії ковзання.

АНАЛИЗ ПЛОСКОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИ ОЦЕНКЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

Колодий А. С., Сушко О. В.

Аннотация

В работе предпринята попытка создания теории машинной обработки, с помощью которой можно определять напряжения и температуры при обработке материалов на основании главных свойств материала и условий резания. Такая теория позволяет облегчить прогнозирование таких факторов, как усилия резания (затрачиваемая мощность), стойкость режущего инструмента, качество поверхности, когда известны основные физические и механические свойства



детали и инструмента, а также рабочие условия (скорость резания, подача, форма инструмента).

В статье рассматривается путь, как могут быть определены важные вспомогательные величины, стойкость режущего инструмента и усилия резания в связи с геометрическими условиями и скоростями процесса. Коротко рассмотрена теория поверхности сдвига. Описаны экспериментальные и теоретические исследования стружкообразования, результаты которого стали основой для этой работы, а также указаны причины относительно плохого согласования теории поверхности сдвига с результатами, полученными опытным путем.

Ключевые слова: металлорежущие станки, обрабатываемость, теория сдвига, режимы резания, линии скольжения.

ANALYSIS OF FLAT PLASTIC FLOW OF A MATERIAL WHEN EVALUATING MACHINABILITY ON METAL CUTTING MACHINES

O. Kolodii, O. Sushko

Summary

In the work an attempt was made to create a theory of machinability, with which it is possible to determine stresses and temperatures during processing of materials, based on the basic properties of the material and cutting conditions. Such a theory makes it easier to predict factors such as cutting forces (power consumption), resistance of the cutting tool, surface quality when the basic physical and mechanical properties of the part and tool are known, as well as operating conditions (cutting speed, feed, tool shape). This would be extremely necessary when evaluating the workability of materials, as well as the choice of optimal cutting conditions, and in particular when programming machines with digital controls.

The article discusses the way how important auxiliary values of the cutting process, the resistance of the cutting tool, cutting forces in connection with the geometric conditions and process speeds can be determined. The theory of shear surfaces is briefly considered. Experimental and theoretical studies of the formation of a shavings are described, the results of which have become the basis of this work. The reasons for the relatively poor agreement of the theory of surface displacement with the experimental results are indicated. It is shown that the surface displacement model needs to be simplified since the material deforms at constant flow stress.

This condition is present in all previous analyzes made by researchers based on the surface displacement model. The effect of the transmission of stress of the forces of material displacement from search on the distribution of hydrostatic stresses and the direction of the resulting cutting force is established. It has been established that the effect of hardening decreases during metal cutting, while the effect of elongation and temperature increases. Studies in the field of slip lines have shown, what only having regard to changeable tension of transmission of efforts of change it maybe to get accordance between a theory and practice for explanation of influence of speed of cutting of material on a process.

Key words: metal-cutting machine tool, workability, theory of moving of superficial layers of material, process of formation of shaving, cutting parameters, modes of treatment, slip line.