

О. В. Івченко, канд. техн. наук, доцент, О. О. Залога, мол. наук. співроб.,
Р. В. Процай, студент, Д. О. Ігумнов, студент (Сумський державний університет, м. Суми, Україна)

Індентор для визначення адгезійної складової середнього коефіцієнту тертя в процесі різання

Встановлено, що на цей час існують різні методи оцінювання якості лез різальних інструментів, які ґрунтуються на різноманітних теоріях (теорія акустичної емісії, теплового стану інструменту, напружено деформованого стану (НДС) леза різального інструменту тощо). Разом з тим, більша частка цих методів ґрунтується або на моніторингу в реальному часі безпосередньо у процесі оброблення стану різальної частини, або у проведенні великої кількості натурних експериментів, що потребує значних додаткових витрат, пов'язаних із придбанням для їх проведення необхідної кількості зразків інструментів. Одним із ефективних рішень цієї проблеми є створення системи оцінювання якості різального інструменту та його відповідності заданим умовам на основі неруйнівних методів та без проведення натурних експериментів безпосередньо у процесі різання.

В роботі запропоновано неруйнівний експрес метод оцінювання якості лез різального інструмента на основі теорії фрикційної взаємодії поверхонь різального леза з поверхнями на оброблюваній заготовці та стружкою.

Метою роботи є нормалізація геометричних параметрів індентора, що буде використовуватись при оцінюванні якості лез різального інструменту, на основі побудови математичної моделі силового навантаження індентора та розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі.

В роботі запропоновано методику призначення розмірів індентору у вигляді стрижня з округленими торцевими поверхнями для проведення експериментів на дослідницькій установці на базі вертикально-фрезерного верстату 6P12.

Ключові слова: лезо різального інструменту, якість, експрес метод, індентор, геометричні параметри, математична модель, силове навантаження.

Установлено, что в настоящее время существуют различные методы оценки качества лезвий режущих инструментов, основанные на различных теориях (теория акустической эмиссии, теплового состояния инструмента, напряженно деформированного состояния (НДС) лезвия режущего инструмента и т. п.). Вместе с тем, большая часть этих методов основывается или на мониторинге в реальном времени непосредственно в процессе обработки состояния режущей части, или в проведении большого количества натурных экспериментов, что требует значительных дополнительных расходов, связанных с приобретением для их проведения необходимого количества образцов инструментов. Одним из эффективных решений этой проблемы является создание системы оценки качества режущего инструмента и его соответствия заданным условиям на основе неразрушающих методов и без проведения натурных экспериментов непосредственно в процессе резания.

В работе предложен неразрушающий экспресс метод оценки качества лезвий режущего инструмента на основе теории фрикционного взаимодействия поверхностей режущего лезвия с поверхностями на обрабатываемой заготовке и стружкой. Целью работы является нормализация геометрических параметров индентора, который будет использоваться при оценке качества лезвий режущего инструмента на основе построения математической модели силовой нагрузки индентора и решения многокритериальной оптимизационной задачи.

В работе предложена методика назначения размеров индентора в виде стержня со скругленными торцевыми поверхностями для проведения экспериментов на исследовательской установке на базе вертикально-фрезерного станка 6P12.

Ключевые слова: лезвие инструмента, качество, экспресс метод, индентор, геометрические параметры, математическая модель, силовая нагрузка.

It was found that nowadays there are different methods for evaluating the quality of the edges of cutting tools, based on different theories (the theory of acoustic emission, the thermal state of the tool, the stress strain state (SSS) of the cutting tool edge, etc.). However, most of these methods are based on monitoring and directly real-time processing state of the cutting part or in carrying out a large number of field experiments that require significant additional costs associated with the acquisition of the required number of samples of tools. One effective solution to this problem is to create a system of quality of cutting tools and matching these criteria on the basis of non-destructive methods and without full-scale experiments directly in the process of cutting.

The paper presents a non-destructive method for rapid assessment of the quality of the edges of the cutting tool that basis on the theory of frictional engagement surface of the cutting blade with the surfaces on the workpiece and chips. The aim is to normalize the geometrical parameters of the indenter to be used in assessing the quality of the edges of the cutting tool based on a mathematical model of power load of the indenter and the solution of a multi-criterial optimization problem.

We propose a method of dimensioning of the indenter in the form of a rod with a rounded end surfaces for experiments on the research facility that basis on vertical milling machine 6R 12.

Keywords: tools edges, quality, rapid method, the indenter, geometrical parameters, mathematical model, power load.

Актуальність проблеми

Обробка матеріалів різанням є одним з найбільш поширених методів формоутворення в сучасному машинобудуванні. Постійно йде вдосконалення конструкцій виробів, технологій та матеріалів. З появою нових матеріалів, а також конструкцій інструментів, виникає проблема їх раціонального використання.

Існуючі нормативні бази для призначення режимів різання, проектування інструментів і верстатів у сучасному машинобудівному виробництві є достатньо «застарілими» та консервативними, що робить їх досить часто непридатними для ефективного використання у зв'язку з постійним розширенням використання у сучасному виробництві нових матеріалів (конструкційних з особливими властивостями та інструментальних, у т. ч. з покриттями) і значно більших швидкостей обробки. Однією з особливостей сучасного машинобудівного виробництва є й те, що постійно і суттєво скорочується питома вага інструментів власного виробництва та зростає питома вага покупного. Тому в умовах значного розширення ринку різального інструменту (збільшення номенклатури, появи нових компаній виробників та дилерів) як в Україні, так і в усьому світі, постає проблема швидкого визначення з метою вибору найкращого (оптимального) інструменту з групи ідентичних інструментів, запропонованих різними постачальниками, та придатних для виконання конкретної технологічної операції. У даному випадку під ідентичними будемо розуміти інструменти, які в повній мірі відповідають заданим (потрібним) умовам оброблення, але в залежності від постачальника мають різну ціну. Таким чином, на сучасному етапі розвитку машинобудівного підприємства є актуальним розроблення методологічних принципів експрес оцінювання якості того чи іншого різального інструменту та його відповідності як заданим умовам оброблення, так і вимозі «якість/ціна», що обов'язково потребує створення відповідної нормативної документації (НД).

В роботі [1] автори запропонували для визначення якості та стійкості різального інструменту використовувати його магнітну сприйнятливості, яка базується на відповідному

впливі на властивості різальної пластини дії зовнішнього джерела енергії, вимірюванні результатів цього впливу, й визначенні за отриманими показниками якості робочого (верхнього) шару пластини та стійкості інструменту. У відповідності з запропонованою авторами методикою на різальну пластину діють магнітним полем, вимірюють її магнітну сприйнятливості й розраховують величину питомої магнітної сприйнятливості, яка, на думку авторів, пов'язана з якістю і стійкістю робочого леза інструменту. Одним із суттєвих недоліків цього методу є низька достовірність контролю показника, отриманого при виконанні вказаних процедур.

У роботі [2] автори для прогнозування та визначення стійкості різального інструменту пропонують використовувати значення амплітуди сигналу акустичної емісії. При прогнозуванні стійкості інструменту виконують різання цим інструментом заготовки з типового для цього інструменту матеріалу на найбільш ймовірних в умовах практичної експлуатації режимах обробки. У процесі різання контролюють значення амплітуди сигналу акустичної емісії та проводять її замір у точці другого екстремуму кривої. Після другого заміру різання припиняють. Тривалість випробування залежить від необхідної точності прогнозування – чим більшою є необхідна точність, тим триваліші випробування. Недоліком цього методу є необхідність проведення натурних експериментів з різання, що збільшує як часові, так і матеріальні витрати виробника, пов'язані з інструментальною підготовкою основного виробництва.

В роботі [3] автори запропонували для визначення якості різального інструменту використовувати коефіцієнт температуропровідності. В якості навантаження пропонується використання рівномірно розподіленого імпульсного нагріву. Спосіб контролю ріжучих властивостей партії твердосплавних інструментів полягає в тому, що кожен інструмент з партії піддають імпульсному нагріву, а потім вибірково піддають механічному зносу кілька інструментів з партії, за якими і визначають ріжучі властивості інструментів всієї партії. За параметр кон-

тролю приймають коефіцієнт температуропровідності кожного інструменту. Механічний знос визначають як залежність ширини фаски зносу від коефіцієнта температуропровідності, а ріжучі властивості інструментів всієї партії визначають за отриманою залежності. Недоліками цього методу є необхідність проведення натурних експериментів та можливість використання цього методу для оцінювання якості вже придбаного або виготовленого інструменту.

Таким чином, на цей час вже існують методи оцінювання якості лез різальних інструментів, які ґрунтуються на різноманітних теоріях (теорія акустичної емісії, теплового стану інструменту, напружено деформованого стану (НДС) леза різального інструменту тощо). Разом з тим, більша частка цих методів ґрунтується або на моніторингу в реальному часі безпосередньо у процесі оброблення стану різальної частини вже придбаного у якогось постачальника інструменту, або у проведенні великої кількості натурних експериментів, що потребує значних додаткових витрат, пов'язаних із придбанням для їх проведення необхідної кількості зразків інструментів. Ці витрати суттєво зростають, якщо при цьому є декілька постачальників ідентичних інструментів. Одним із ефективних рішень цієї проблеми є створення системи оцінювання якості різального інструменту та його відповідності заданим умовам на основі неруйнівних методів та без проведення натурних експериментів безпосередньо у процесі різання.

У цій роботі запропоновано неруйнівний експрес метод оцінювання якості лез різального інструмента на основі теорії фрикційної взаємодії поверхонь різального леза з поверхнями на оброблюваній заготовці та стружкою, що є актуальним та своєчасним науково-практичним завданням, вирішення якого дозволить підвищити ефективність машинобудівного комплексу України та конкурентоздатність вітчизняної машинобудівної продукції.

Метою роботи є нормалізація геометричних параметрів індентора, що буде використовуватись при оцінюванні якості лез різального інструменту, на основі побудови математичної моделі си-

лового навантаження індентора та розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі.

Теоретичні дослідження та аналіз фізики процесу

Загальні уявлення щодо механіки стружкоутворення під час різання металів можна коротко охарактеризувати схемою, наведеною на рис. 1. Відомо [4], що процес перетворення зрізаного шару в стружку в загальному випадку являє собою процес спрямованого руйнування матеріалу заготовки лезом шляхом створення напружено-деформованого стану в зрізаному шарі й заготовці, що супроводжується пружними та пластичними деформаціями, утворення тріщин і подальшого руйнування, яке в залежності від стану матеріалу за умов обробки може бути або в'язким, або крихким [5]. При цьому лезо безпосередньо контактує зі зрізаним шаром, стружкою і заготовкою, що призводить до виникнення контактних процесів на його поверхнях, а в області, розташованій біля ріжучої кромки, застійній зоні, яка за певних умов може перетворитися в наріст.

У системі різання за описаними вище процесами відбувається робота, що витрачається на деформування і руйнування матеріалу зрізаного шару під час перетворення його в стружку, та робота, головним чином пов'язана з тертям на контактних поверхнях [6, 7, 8] та ін. Відповідно до першого закону термодинаміки, вся робота сил різання A_p витрачається на збереження енергії пружної деформації ΔU (в прирізцевих шарах стружки, поверхневому шарі заготовки, контактних шарах інструменту) та виділення теплоти в системі Q [9], що приводить до процесів поширення теплоти в системі різання і підпорядковано рівнянню теплопровідності й теплового балансу [10]. Згідно з дослідженнями Г. І. Єпіфанова та П. А. Ребіндера, частка поглиненої енергії пружної деформації в процесі різання за традиційно застосовуваних швидкостях становить 3 %, а решта переходить в теплоту, яка виділяється в основному в зонах А, Б, В (рис. 2), а також на поверхнях контакту інструмента з заготовкою й стружкою.

Навіть найбільш гладкі металеві поверхні в субмікроскопічному масштабі є шорсткими

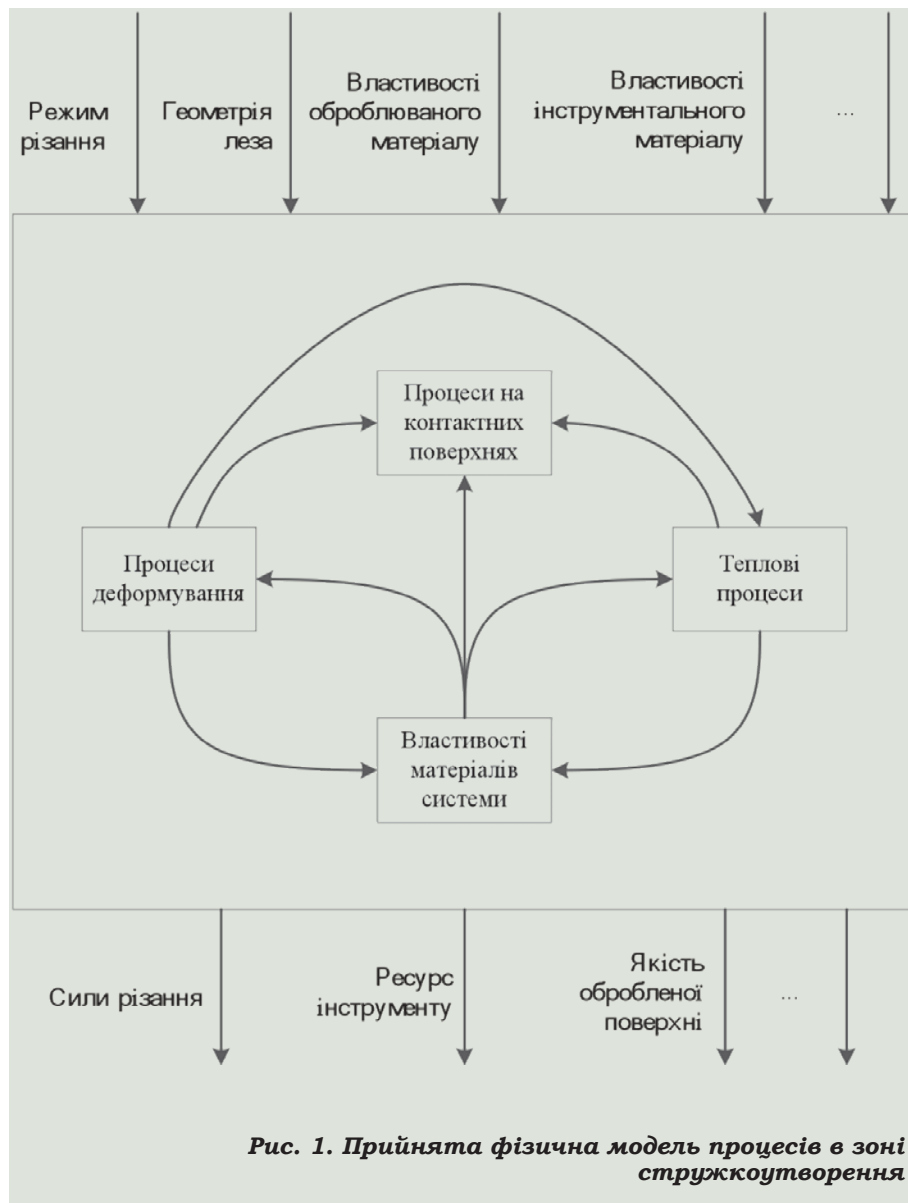


Рис. 1. Прийнята фізична модель процесів в зоні стружкоутворення

та за зіткненням контактують своїми виступаючими ділянками. На цих ділянках локальні тиски стають достатніми для забезпечення пластичної деформації. В результаті цієї пластичної деформації «оголюються» нові поверхні, метали переходять в безпосередній контакт хімічно чистими поверхнями й між ними встановлюються адгезійні зв'язки.

Авторадіофотограмми відносно нерухомих поверхонь під навантаженням, спрямованим нормально до площини розділу, показують, що в тому випадку, коли металеві поверхні притискаються один до одного, за певних умов можуть утворюватися містки зв'язків (схоплювання) (див. рис. 3), які складаються з контактуючих матеріалів (нова формація). При роз'єднанні поверхонь ці містки зв'язків можуть руйнуватися або безпосе-

редньо по новій формації, або з відділенням її з якоїсь із контактуючих поверхонь (рис. 3).

Таким чином, руйнування містків адгезійних зв'язків може супроводжуватися перенесенням з однієї поверхні на іншу металевих частин, величини яких значно більше в порівнянні з розмірами атомів. Подібні експерименти говорять про те, що в області контакту завжди утворюються адгезійні зв'язки, що розриваються при при відносному переміщенні цих поверхонь. Для виникнення адгезії («містків» міцних металевих зв'язків) необхідно, по-перше, достатнє зближення поверхонь, щоб почали діяти атомні й молекулярні сили, та, по-друге, щоб шляхом пластичної деформації була вилучена поверхнева плівка, яка складається з оксидів і зміцненого (наклепаного) металу, і в результаті цього мав

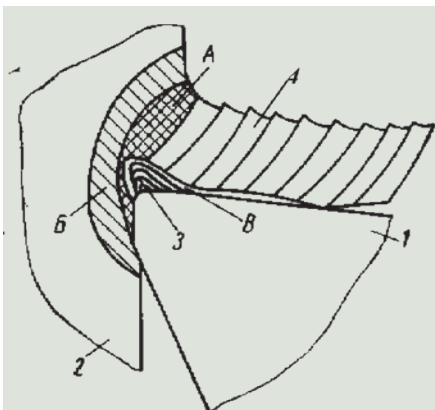


Рис. 2. Схема зони стружкоутворення при різанні матеріалів:

1 – інструмент; 2 – заготовка;
3 – наріз; 4 – стружка

місце контакт двох чистих металів, тобто без наявності будь-якого третього (твердого, рідкого або газоподібного) середовища.

Відомо, що адгезія є результатом утворення інтерметалевих

тисків і температур, характерних для процесів різання, розглянемо ті ділянки передньої поверхні, де реалізуються умови тертя спокою, тобто утворюється застійна зона. На цій ділянці можливі переміщення в застійній зоні, що характеризуються внутрішнім тертям (адгезійна складова коефіцієнта тертя), а контакт стружки, що переміщається по частині застійного шару й передній поверхні характеризується зовнішнім тертям, тобто деформаційною складовою коефіцієнта тертя. Співвідношення між цими складовими коефіцієнта тертя значною мірою визначає напружений стан системи різання, сили і температуру різання, зношування леза та ін. Разом з тим, слід зазначити, що загальноприйнятим вважається, поперше те, що частка деформаційної складової в середньому коефіцієнті тертя, як правило, незначна, не перевищує 10–15 %, і нею можна знехтувати, і, по-друге, розділити експериментальним шляхом ці складові неможливо.

вантаження; б) визначається середня дотична напруга опору ковзанню; в) за відомими параметрами R_p , t_m мікрорельєфу індентора розраховується μ_d для прийнятих умов випробувань; г) визначаються параметри τ_0 , β_0 шляхом віднімання деформаційної складової дотичного напруження та екстраполяції отриманих залежностей на нульовий тиск і їх апроксимації рівнянням за умови $T < T_k$

$$\tau_i = \tau_a + \tau_d, \quad \tau_d = \mu_d \cdot \sigma_n, \quad \tau_a = \tau_0 + (\beta_0 - k_b \cdot \max(0; T - T_k)) \cdot \sigma_{nr}, \quad (1)$$

де проводять аналогічні випробування при температурах $T = 600^\circ\text{C}$, 700°C і 800°C з однаковим тиском і розраховують константи k_b , T_k , апроксимуючи отриману залежність рівнянням типу (1).

Основними недоліками цього методу визначення адгезійної складової середнього коефіцієнту тертя є важкість виготовлення сферичного індентору (шару) з інструментального матеріалу (твердого сплаву), а також, у зв'язку з тим, що індентор виготовляється з інструментального матеріалу, неможливим є використання методу без руйнування різальної частини інструменту, а також для випадків, коли необхідно визначити фрикційні характеристики взаємодії оброблюваного матеріалу з покупним інструментом, що має покриття.

Тому запропоновано метод визначення адгезійної складової середнього коефіцієнту тертя, де індентор виконується з оброблюваного матеріалу, а контртілом є безпосередньо поверхні непереточуваної твердосплавної пластини.

Прототип пристрою, який забезпечує вимірювання моменту тертя як при нормальній (кімнатній) температурі, так і при температурах, близьких до температур різання, методом обертання сферичного індентора (з жорсткою схемою навантаження) з оброблюваного матеріалу відносно плоского контртіла з інструментального матеріалу (твердосплавної пластини) реалізовано за аналогією [12] на базі вертикально-фрезерного верстата 6Р12. Вибір базової системи для реалізації пристрою обумовлений необхідністю забезпечення високої жорсткості механізму навантаження в напрямку осі дії нормальної сили з можливістю одночасного обертання навколо цієї ж осі. Жорсткість використаного верстата становить $J_z = 55 \text{ мкН/кН}$.

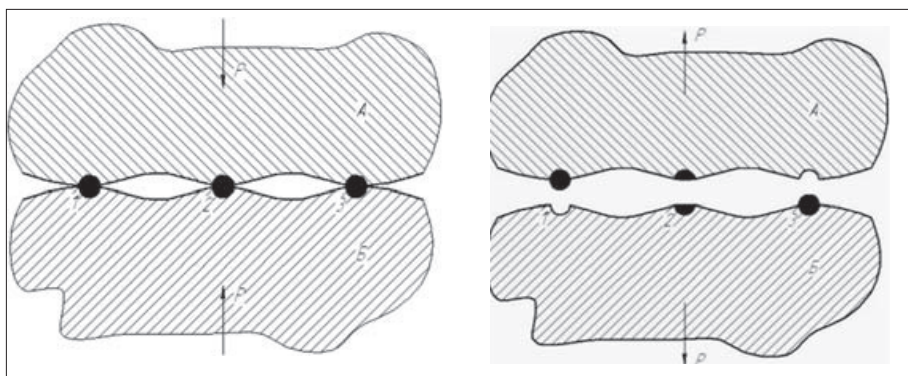


Рис. 3. Схема утворення та руйнування адгезійних містків зв'язку [11]

зв'язків між контактуючими тілами й залежить від їх здатності створювати між собою хімічні сполуки і тверді розчини. Чим більше спорідненість (за хімічним складом) контактуючих матеріалів, тим (за інших рівних умов) ймовірність адгезії вище. Очевидно, що зі збільшенням тиску і, в певних межах, температури в зоні контакту (розм'якшення) зростає як ймовірність утворення містків захоплення, так і ступінь їх утримання на контактуючих поверхнях. Для оцінювання деформаційних і адгезійних процесів, що супроводжують фрикційну взаємодію поверхонь, що переміщуються відносно один одного, в умовах високих

Вимірювання адгезійної складової коефіцієнту тертя середнього

В Сумському державному університеті в роботі [12] запропоновано алгоритм визначення адгезійної складової середнього коефіцієнта тертя R_p , t_m : а) при нормальній температурі проводяться випробування за допомогою експериментальної установки на базі вертикально фрезерного верстата, яка дозволяє реалізувати тертя сферичного індентора з інструментального матеріалу відносно зразка з оброблюваного матеріалу при різних тисках в умовах жорсткої схеми на-

Пристрій працює наступним чином. На столі верстата співвісно з віссю шпинделя встановлюється вимірювальний пристрій (динамометр), що дозволяє одночасно вимірювати нормальну до його базової площини силу і крутний момент. На базову поверхню динамометра встановлюють контртіло у вигляді пластини з інструментального матеріалу товщиною не менше 5 мм з паралельними бічними поверхнями. У цанговому патроні закріплюється оправка з конічним центральним отвором, виконаним з метою мінімізації биття, сумісно з оправкою безпосередньо на фрезерному верстаті. Індентор з оброблюваного матеріалу діаметром 6–9 мм з відполірованою сферичною торцевою поверхнею має відхилення від округлості не більш 5 мкм. Торець заздалегідь знежирюється спиртом і оброблюється активованим вугіллям. Поверхня контртіла (пластини), оброблюється аналогічним способом. Базування індентора здійснюється по конічній поверхні центрального отвору. Гільза шпинделя нерухомо встановлюється в бабці шпинделя. Навантаження здійснюють відповідним переміщенням консолі верстата вздовж осі z . Сила навантаження контролюється динамометром. Вимірювання обертового моменту тертя здійснюється при частоті обертання шпинделя 31,5 об/хв, яка виключає розігрівання контактних поверхонь.

Розрахункова модель для визначення геометричних параметрів індентору

Проведений аналіз технологічності конструкції індентора показує, що, для отримання необхідних результатів, найбільш зручним для використання та економічно вигідним для виготовлення є індентор циліндричної форми із оброблюваного матеріалу.

Для визначення геометричних параметрів індентора запропоновано використовувати три параметри – довжина, діаметр та радіус округлення торця (робочої поверхні).

Аналіз схеми навантаження індентора (рис. 4) показує, що для визначення зазначених параметрів необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\begin{cases} d \geq d_{кр}, - \text{допустимі навантаження} \\ l \leq l_{кр} - \text{формула Ейлера} \\ r \leq r_{кр} - \text{діаметр відбитку} \end{cases} \quad (2)$$

де d – діаметр індентора; l – довжина індентора; r – радіус округлення торця індентора.

Головними обмежувачими факторами для визначення геометричних параметрів індентора є: стійкість, яка обмежує довжину індентора; міцність, яка впливає на його діаметр; твердість оброблюваного матеріалу, що зумовлює розміри плями контакту. Важливим є те, що при сталому процесі $T = T_{тер}$.

Визначення довжини індентора (стрижня)

Для вирішення задачі стійкості стрижня необхідно розглянути вплив умов його закріплення його торців на величину критичної сили, що легко зробити шляхом порівняння виду зігнутої осі стрижня при різних випадках закріплення з формою зігнутої осі при шарнірному закріпленні обох кінців стрижня (рис. 5).

Стійкість деформованого тіла у вигляді стрижня залежить від величин його діаметру, довжини та прикладеного до нього навантаження [13]. Навантажен-

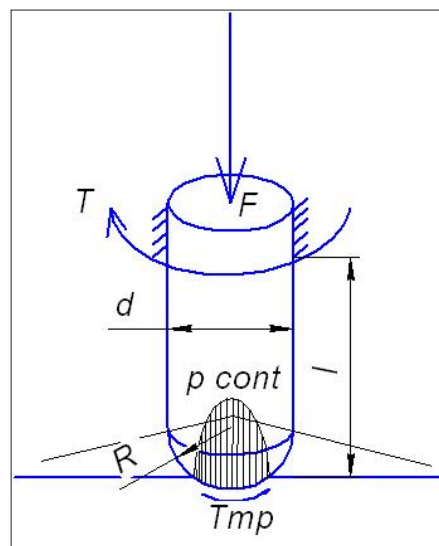


Рис. 4. Схема навантаження індентора

ня, яке викликає втрату стійкості первісної форми тіла (стрижня), називається критичним навантаженням та позначається через $F_{кр}$.

У нашому випадку при $F > F_{кр}$ стрижень втрачає стійкість, тобто прямолінійна форма рівноваги перестане бути стійкою (рис. 5).

Довжина стрижня визначається за формулою

$$\frac{\pi d}{2,8} \sqrt{\frac{E}{[\sigma]}} \leq l \leq \sqrt{0,03189 \frac{\pi^3 E d^4}{F n_{yct}}}, \quad (3)$$

де E – модуль Юнга першого роду (поздовжній модуль пружності), МПа; F – стискаюча сила, Н; d – діаметр круглого прямого циліндричного стрижня, мм; $[\sigma]$ – допустимі напруження, МПа; n_{yct} – коефіцієнт запасу стійкості.

Визначення діаметру стрижня

Для визначення діаметру індентора необхідно враховувати міцність матеріалу.

Стрижень перебуває під дією складного напруженого стану стиснення з крутінням. Напружений стан нескінченно малого елемента в небезпечній точці на бічній циліндричній поверхні стрижня.

Діаметр стрижня визначається за формулою:

$$\sqrt{\left(\frac{4F}{\pi d^2}\right)^2 + 3\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2} \leq [\sigma], \quad (4)$$

де F – стискаюча сила, Н; T – крутний момент Нм; d – діаметр круглого прямого циліндричного стрижня, мм; $[\sigma]$ – допустимі напруження, МПа; R_m^T – мінімальне значення тимчасового опору при розрахунковій температурі, МПа; $R_{p0,2}^T$ – мінімальне значення межі текучості при розрахунковій температурі, МПа; R_{mt}^T – мінімальна межа тривалої міцності за час t при розрахунковій температурі, МПа.

Для вирішення поставленого завдання пропонується представити його у вигляді багатокритеріальної задачі з оптимізації, де в якості параметрів оптимізації будуть використовуватися діаметр, довжина і радіус округлення торця.

$$z = \begin{cases} d \rightarrow \min; \\ l \rightarrow \min; \\ r \rightarrow \max \end{cases} \quad (5)$$

Прагнення діаметру та довжини стрижня до мінімального значення обумовлюється розмірами пластини (контртіла) для забезпечення зручності проведення експериментів. Радіус округлення робочого торця прагне до свого максимального допустимого значення для отримання зони контакту індентора з контртілом достатнього розміру для проведення подальших досліджень.

Для вирішення багатокритеріальної задачі з оптимізації геометричних розмірів індентору розглянемо фактори, що обумовлюють обмеження на ці параметри.

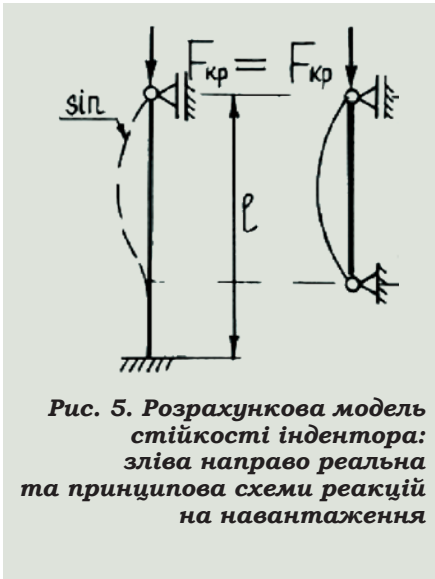


Рис. 5. Розрахункова модель стійкості індентора: зліва направо реальна та принципова схеми реакцій на навантаження

Так для визначення довжини індентора прийняті обмеження пов'язані: 1) зі стійкістю стрижня (див. вираз 2); 2) з довжиною приєднувальної частини стрижня, яка обумовлена системою кріплення використовуваного пристрою верстату. Аналіз виразу 2 вказує на те, що довжина індентора знаходиться в функціональній залежності від діаметру.

Визначення радіусу округлення торця обумовлено 2-ма параметрами: 1) діаметром плями контакту, буде аналізуватися; 2) твердістю індентора та контртіла (леза інструменту). Аналіз цих обмежень показує, що твердістю матеріалів можна знехтувати, а необхідним та достатнім є діаметр плями контакту в межах від 2 до 5 мм для його дослідження за допомогою інструментального мікроскопу. В інших випадках необхідно керуватись інструментальними обмеженнями наявних приладів.

Тому цю задачу можливо представити в наступному вигляді

$$z = d \rightarrow \min; \quad (6)$$

Визначення радіусу округлення робочого торця

Для розрахунку радіусу округлення робочого торця стрижня використовується модель двох дотичних сферичних тіл з радіусами R_1 та R_2 , де $R_1 = r$, так як перша поверхня є сферичним торцем індентору, а $R_2 \rightarrow \infty$, так як друга поверхня контакту (поверхня контртіла) є площиною.

Для цього випадку радіус площини контакту визначається за формулою:

$$r_{cont} = 0,9086 \sqrt[3]{\eta F \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}};$$

$$r_{cont} = 0,9086 \sqrt[3]{\eta F \frac{1}{\lim_{R_1 \rightarrow R} \frac{1}{R_1} + \lim_{R_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{R_2}}};$$

$$3 \text{ мм} \leq 0,9086 \sqrt[3]{\eta F R} \leq 5 \text{ мм}.$$

де F – сила, що стискає поверхні; $\eta = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$ – пружна постійна дотичних тіл, де ν_1 , ν_2 і E_2 відповідно E_1 коефіцієнти Пуассона і поперечні модулі пружності (модуль Юнга першого роду) першого та другого тіл.

У зв'язку із необхідністю закріплення індентора у цанговому патроні, розташованому на шпинделі верстату, рекомендовано виготовляти індентор довжиною $2L$ та з робочими радіусами на обох торцях, що забезпечить можливість проведення двох дослідів при умові використання лише одного індентора.

Висновки

1. За результатами дослідження літературних джерел з питання оцінювання якості лез різального інструменту встановлено, що існує багато методів для проведення цих робіт, які ґрунтуються на різноманітних теоріях (теорія акустичної емісії, теплового стану інструменту та ін.) та передбачають проведення великої кількості експериментів з використанням вже придбаного (виготовленого) інструменту безпосередньо у процесі різання.

2. Вперше запропоновано експрес метод оцінювання фрикційних властивостей пари «оброблюваний – інструментальний» матеріали без проведення експериментів безпосередньо у процесі різання.

3. Розроблена методика призначення розмірів індентора у вигляді стрижня з округленими торцевими поверхнями для проведення експериментів на дослідницькій установці на базі вертикально-фрезерного верстату 6Р12.

4. Розроблено математичну модель визначення геометричних параметрів індентора для проведення досліджень адгезійної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалів.

Список літератури:

1. Способ контроля качества режущего инструмента Авторы патента: Десненко В. А., Пушпань Л. И., Грабченко А. И., Ко-

ноненко В. И. // Патент RU № 1764833.

2. Способ прогнозирования стойкости режущего инструмента / [Доброскок В. Л. и др.] // Авторское свидетельство СССР № 1682888.

3. Способ контроля режущих свойств партии твердосплавных инструментов / В. П. Вавилов, В. А. Пушных, В. В. Ширяев, А. В. Шипулин // Авторское свидетельство СССР № 1224670.

4. Ozel T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting / T. Ozel, T. Altan // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2000. – Vol. 40. – P. 133–152.

5. Ozel T. Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting test / T. Ozel, E. Zeren // Journal of Material Processing Technology. – 2004. – Vol. 153. – P. 1019–1025.

6. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М. Ф. Полетика. – М.: Машиностроение, 1969. – 150 с.

7. Chandrasekaran H. Photoelastic analysis of tool-chip interface stresses / Chandrasekaran H., Kapoor S. G. // Trans. ASME. – 1965. – Vol. 87. – P. 78–91.

8. Андреев Г. С. Исследование напряжений в рабочей части резца на порязризационно-оптической установке с применением киносъемок / Г. С. Андреев // Вестник машиностроения. – 1958. – № 5. – С. 34–38.

9. Остафьев В. А. Физические основы процессов резания металлов. – К.: Высшая школа, 1976. – 136 с.

10. Бобров Б. Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

11. Внуков, Ю. М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів [Текст]: навч. посіб. / Ю. М. Внуков, В. О. Залога. – Суми: СумДУ, 2010. – 243 с.

12. Залога В. А. Методология экспериментального определения деформационной и адгезионной составляющих среднего коэффициента трения при резании / Д. В. Криворучко, О. А. Залога, С. С. Некрасов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 6 (65). – Ч. 1. – С. 63–70.

13. Сопротивление материалов / [Писаренко Г. С., Агаев В. А., Квитка А. Л., и др.]. – Учебник: [4-е изд., перераб. и доп.]. – К.: Вища школа, 1979. –