

4. Litvin, F., & Fuentes, A. (2004). Gear Geometry and Applied Theory (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511547126.

УДК 621.81: 621.9.04

**Клименко С. А., чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, професор,  
Манохін А. С., канд. техн. наук, ст. дослідник,**

**Клименко С. Ан, канд. техн. наук,**

**Копейкіна М. Ю., канд. техн. наук, ст. науковий співробітник,**

**Чумак А.О., мол. науковий співробітник**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, atmu@meta.ua

## **МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ЗОНИ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ**

Фрези з різальними елементами із полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бою (PcBN) [1, 2] є другим за вживаності типом інструменту, який ефективно використовується для обробки сталей високої твердості.

В зоні різання при фрезеруванні має місце циклічне термобаричне навантаження інструменту, що обумовлює відносно значний термін часу до виходу системи на стабільну роботу. Це пов'язане зі зміною механічних властивостей оброблюваного матеріалу під дією термобаричного навантаження, яке циклічно їх змінює, що обумовлює поступове зростання як сили різання, так і температури різання при переході від робочого елемента фрези, який працює у конкретний момент часу, до наступного робочого елемента інструменту. Відмічене обумовлює відмінності у напружено-деформованому та тепловому стані зони різання та інструменту, його працездатності та вихідних показників процесу обробки. При цьому, потрібно відмітити, що значний вплив на кількісні показники, що характеризують контактні процеси у зоні обробки, мають властивості матеріалу, яким оснащений різальний інструмент.

Дослідження фрезерування загартованої сталі виконувались шляхом кінцево-елементного моделювання при умові припущення про плоско-деформований стан системи. При вирішенні пов'язаної термомеханічної задачі граничні умови склалися в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки і переміщенні абсолютно-жорсткого інструменту уздовж осі  $X$  заготовки з постійною швидкістю  $v$ , глибиною різання і шириною зрізу. При цьому враховано теплопровідність матеріалу інструменту і оброблюваного матеріалу.

На першому етапі досліджень вивчений вплив попередньої деформації зрізуваного шару оброблюваного матеріалу на характеристики пластичної деформації, напруження в поверхневому шарі оброблюваного зразку та сили різання. Вказане обумовлено тим, що середня товщина зрізуваного шару при фрезеруванні мала (10–20 мкм) і глибина, на яку розповсюджуються залишкові напруження при великих силах різання суттєво вище (до 100 мкм). Для урахування даного фактору модель передбачає реалізацію трьох послідовних проходів, на кожному з яких зрізується шар товщиною 20 мкм і після кожного проходу інструмент переміщується на товщину зрізу по осі  $Y$ . Для імітації імпульсного навантаження з наявністю проміжку часу  $\Delta t$  між врізаннями леза при фрезеруванні, довжина кожного проходу дорівнює подвоєній довжині заготовки.

Для тертя на контактних поверхнях розглядалась комбінована модель:

$$f_s = \min(\mu \cdot p, k \cdot m),$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя;

$p$  – тиск;

$k$  – межа плинності матеріалу на зсув;

$m$  – довільний коефіцієнт, для врахування інтенсивності фрикційної взаємодії.

Границя плинності оброблюваного матеріалу з ростом ступеня його деформації, відповідно до моделі, що описує криву плинності, зростає. Найбільш інтенсивне зростання характерне для низьких температур.

Параметром який демонструє зміну умов різання, стан інструменту або, при постійності цих параметрів, зміну властивостей оброблюваного матеріалу є величина складових сили різання. При врізанні інструменту спостерігається сплеск сили різання на рівні 10–11%, що відповідає перехідному процесу стружкоутворення з наростанням довжини контакту стружки з інструментом, на етапі, коли переміщення стружки вздовж передньої поверхні ще відсутнє.

В перші мілісекунди різання довжина контакту та усадка стружки вища у порівнянні зі квазісталим процесом обробки. Така закономірність спостерігається на кожному з проходів. При цьому на першому проході величини складових сили різання відрізняються від цих параметрів визначених для проходів 2 та 3.

Як і в попередньому випадку усадка стружки на першому проході ( $\zeta = 2,12$ ) суттєво відрізняється від подальших ітерацій процесу ( $\zeta = 1,78$ ) при товщині стружок відповідно 0,042 мм та 0,035 мм. Кут зсуву при цьому змінюється з  $25^{\circ}10'$  до  $29^{\circ}15'$ , довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця – від 0,034 мм до 0,023 мм після першого проходу інструменту. Коефіцієнт тертя на різній відстані від різальної кромки суттєво не змінюється, хоча спостерігається зростання величин нормальних та тангенційних контактних напружень з 1,9 до 2,15 та з 0,8 до 1,06 ГПа відповідно.

Ступінь зміцнення оброблюваної поверхні характеризується ефективною деформацією матеріалу, яку визначимо у вертикальному перетині на відстані 0,1 мм за різальною кромкою різця на кожному з проходів. Після першого та другого проходів ступінь деформації на поверхні (максимальна) дорівнює 0,36 збільшуючись до 0,48 після третього проходу. Зона на яку розповсюджуюється суттєве зміцнення по глибині зростає з кожним проходом, досягаючи на третьому проході величини 0,2 мм. При встановленні для моделювання товщині зрізу 20 мкм, для першого проходу глибина, що відповідає  $\epsilon = 0,2$  складає 36 мкм, після другого та третього 42 та 60 мкм.

Оскільки глибина зміцнення достатньо висока, весь шар матеріалу, що зрізується після першого проходу вже має механічні властивості, що відрізняються від вихідних механічних характеристик поверхневого шару сталі. Так при ступені ефективної деформації 0,5, границя міцності сталі зростає з 770 до 1100 МПа. Вказане приводить до зростання ефективних напружень в матеріалі, що деформується в зоні різання та пов'язане з тим, що при зміцненні та зменшенні пластичності оброблюваного матеріалу зростає кут зсуву та суттєво зменшується усадка стружки, а вплив зміцнення менш інтенсивний у порівнянні з впливом збільшення кута зсуву, що супроводжується зменшенням довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструменту.

Характеристика зміцнення визначена також у горизонтальному перетині, на рівні 10 мкм від поверхні (середина товщини зрізу) – наростання ступеню деформації відбувається в зоні випереджальної хвилі деформації на відстані 60 мкм, на відстані 30 мкм  $\epsilon = 0,35$  досягаючи 1,2 та 1,8 в зоні зсуву та в приконтактній зоні. Характеристика деформації підповерхневого шару після третього проходу на цій глибині складає  $\epsilon = 0,27$ .

Нестаціонарний характер обробки з врізаннями кожного з лез інструменту та виходом з зони різання обумовлює наявність періодів наростання температури різання та охолодження різального інструменту. При наростанні часу обробки величина температури різання збільшується, а значення температури, виміряне в інструменті, наближується до максимальної температури в оброблюваному матеріалі.

#### Список посилань

1. Инструменты из сверхтвердых материалов [Текст] / под ред. Н В. Новикова, С. А. Клименко. – М: Машиностроение, 2014. – 608 с.