

УДК 621.9.022.2

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В РІЗАЛЬНОМУ КЛИНІ
ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ ПРИ РІЗАННІ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ****©Кондратюк О. Л., Скоркін А. О.***Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:**

Кондратюк Олег Леонідович: ORCID:0000-0002-3263-0483; mot@uira.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри металоріжучого обладнання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Скоркін Антон Олегович: ORCID:0000-0003-3032-83414; mot@uira.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри металоріжучого обладнання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

З розвитком комп'ютерних програм і технологій, обчислювальної техніки, багато інженерних проблем вирішується чисельними методами за допомогою комп'ютерних програм, включаючи визначення розподілу температури і внутрішнього напруження в різальному клині при різанні. В даний час найбільш широко використовуваний чисельний метод дослідження – це метод скінченних елементів.

У даній роботі досліджено напружено-деформований стан (НДС) в різальному клині в процесі різання дискового фрезою з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). На програмному забезпеченні ANSYS моделювалися навантаження зубів дискової фрези зовнішніми навантаженнями при різних оброблюваних і інструментальних матеріалах, умовах різання і геометричних параметрів інструмента. Розраховані деформації, розподіл внутрішніх напружень і температури в різальному клині, за якими оцінювалася міцність різального інструмента.

Ключові слова: метод скінченних елементів; МСЕ; напружено-деформований стан різального інструмента; НДС; дискова фреза; ANSYS; розподіл напружень; моделювання фрезерування.

Кондратюк О. Л., Скоркин А. О. «Исследование напряженно-деформированного состояния в режущем клине дисковой фрезы при резании методом конечных элементов».

С развитием компьютерных программ и технологий, вычислительной техники, много инженерных проблем решается численными методами с помощью компьютерных программ, включая определение распределения температуры и внутренних напряжений в режущем клине при резании. В настоящее время наиболее широко используемый численный метод исследования – это метод конечных элементов.

В данной работе исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) в режущем клине в процессе резания дисковой фрезой с использованием метода конечных элементов (МКЭ). На программном обеспечении ANSYS моделировались нагрузки зубов дисковой фрезы внешними нагрузками при различных обрабатываемых и инструментальных материалах, условиях резания и геометрических параметров инструмента. Рассчитаны деформации, распределение внутренних напряжений и температуры в режущем клине, по которым оценивалась прочность режущего инструмента.

Ключевые слова: метод конечных элементов; МКЭ; напряженно-деформированное состояние режущего инструмента; НДС; дисковая фреза; ANSYS; распределение напряжений; моделирование фрезерования.

Верстати та інструменти

Kondratyuk O., Skorkin A. “The finite element method study of stress-deformed state in the cutting wedge of disc cutter during cutting”.

With the development of computer programs and technology, computer technology, many engineering problems solved by numerical methods using computer programs, including the determination of the temperature distribution and internal stresses in the cutting wedge during cutting. Currently, the most widely used numerical method of research – is the finite element method.

In this paper the results of stressed-deformed state in the cutting wedge in milling by disc (saw) mill, using the finite element method (FEM) investigation, is presented. With the software ANSYS the process of loading milling cutter teeth by the external loads was simulated under different cutting mode and geometrical parameters of the tool. The deformation, distribution of internal stresses and temperature in the cutting tool are calculated, which are used for cutting tool strength estimation.

Key words: finite elements method; FEM; stressed-deformed state of cutting tool; SDS; disk mill; saw milling cutter; ANSYS; stress distribution; ANSYS; mill cutting simulation.

1. Вступ

При обробці різанням необхідний правильний вибір різального інструмента. Конструкція інструмента, інструментальні матеріали і геометричні параметри різального інструмента впливають на стійкість інструмента, ефективність виробництва, якість обробки. Різальний інструмент повинний мати хороші характеристики: високу механічну міцність і червоностійкість, твердість, велику ударну в'язкість, хорошу втомну міцність і відмінний опір зносу.

При обробці важкооброблюваних матеріалів дисковою фрезою виникає внутрішні напруження, що наближаються до межі міцності інструментального матеріалу. Для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) різального інструмента і оцінки його міцності було вирішено використовувати метод скінченних елементів (МСЕ), що реалізується за допомогою програмного забезпечення ANSYS.

Ця комп'ютерна програма дозволяє розглядати ПДВ областей з невеликими розмірами, що характерно для дослідження різального клина в області стружкоутворення. За допомогою цього методу можна також моделювати процес різання, а потім вибрати раціональну конструкцію інструмента, геометрію і режим різання, щоб збільшити надійність і стійкість різального інструмента, продуктивність обробки, використовуючи всі можливості інструмента.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для оцінки міцності різального інструмента необхідно вибрати певний критерій міцності, з яким порівнюватимуться розраховані головні напруження. При всебічному дії навантажень матеріал може витримати напруження набагато більше, ніж при одноосьовому навантаженні. Тому необхідно враховувати всі навантаження, що діють одночасно на зразок (елемент інструмента), а також і температуру в даній області.

В даний час широко використовується критерій граничного стану, розроблений в інституті проблем міцності АН УРСР Г.С. Писаренко і А.А. Лебедевим. Заснований на сучасних уявленнях про кінетику деформування і руйнування матеріалів, критерій Писаренко-Лебедева володіє високою вірогідністю (вище 92%) і описується наступним виразом:

$$\sigma_n = \chi \times \sigma_T + (1 - \chi) \times \sigma \times P \leq \sigma_B \quad (1)$$

де $\chi \square \sigma_{\theta} / \sigma_{-e}$ – константа матеріалу при заданих умовах роботи – її величина характеризує ступінь участі в мікроруйнуванні зсувної деформації, що створює сприятливі умови для розпушення матеріалу та утворення тріщин;

σ_{θ} , σ_{-e} – величини граничного опору матеріалу при одноосьовому розтягуванні і стисненні; σ_i – інтенсивність напружень в даній точці:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

$p = A^{1-j}$ – тут A – константа матеріалу, що відображає характер наявних в матеріалі дефектів і розміри тіла, тобто відбиває статистичну сутність процесу руйнування;

$j = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i$ – параметр напруженого стану, що має сенс жорсткості навантаження.

Враховуючи мінливість властивостей інструментальних матеріалів із зростанням температури, В. А. Остаф'єв рекомендує наступні критерії граничного стану для сплавів групи *WC-Co*, коли температура $\theta < 870$ К:

$$\sigma_{\eta} = 0,24 \times \sigma_i + 0,76 \times \sigma_1 \times 0,76^{1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1}} \leq \sigma_{\theta} \quad (3)$$

Запас міцності інструментального матеріалу:

$$n = \sigma_{\theta} / \sigma_{\eta} \quad (3)$$

Для твердого сплаву *VK8* з розміром зерна від 1 до 2 мкм межі міцності: при розтягненні $\sigma_{\theta} = 780$ МПа, при стисненні $\sigma_{-e} = 4200$ МПа.

3. Метою роботи є вивчення напружено-деформованого стану (НДС) і міцності різального клина з використанням методу скінченних елементів і виявлення причин відмови різальних інструментів при обробці за результатами досліджень.

4. Виклад основного матеріалу

4.1 Створення моделі різального інструмента

Підготовка вихідних даних для моделювання

У відповідність з ДСТУ 5348-2015 для тристоронніх фрез заносимо в табл. 1 розміри фрези.

Для створення об'ємного зображення дискової фрези використовуємо програмне забезпечення *SolidWorks*.

Таблиця 1 – Геометричні параметри фрези

Зовнішній діаметр фрези, D	150 мм
Діаметр отвору, d	52 мм
Число зубів, z	10
Ширина фрези, B	10 мм
Задній кут, a_{θ}	20°
Ширина зуба, C	10 мм
Передній кут, γ	0°
Повна висота зуба, H	9 мм
Ширина шпонки, b	13 мм
Висота паза, h	4 мм

Верстати та інструменти**Рис. 1** – 3D модель дискової фрези

Радіальна складова:

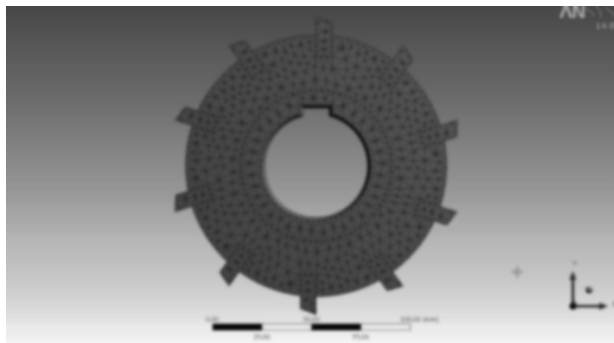
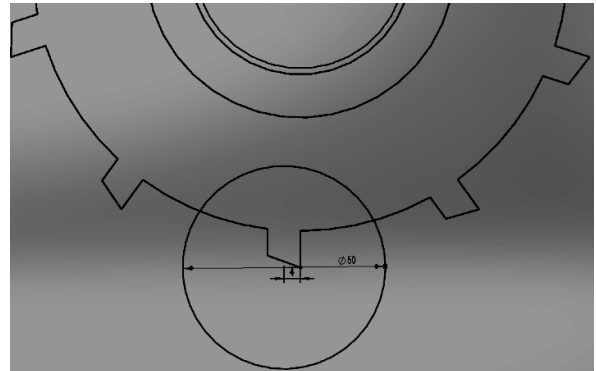
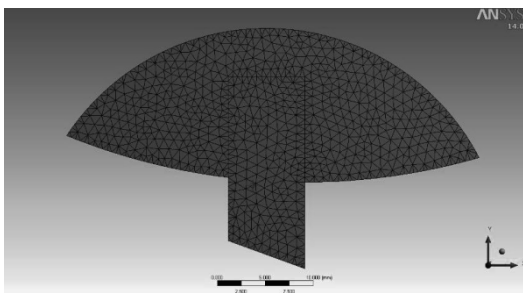
$$P_y = 10C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p = 10 \cdot 173 \cdot 10^{0,73} \cdot 0,18^{0,67} \cdot 6^0 \cdot 0,41 = 1208 \text{ Н}$$

При незначному зносі по задній поверхні діятимуть незначні додаткові сили. На фасці задньої поверхні $h_3 = 0.1$ мм: нормальна сила $N_h = 916$ Н, дотична сила $F_h = 242$ Н.

4.2 Розрахунок НДС зуба фрези і місця кріплення вставки

Вихідна схема розрахунку напружено-деформованого стану різального клина дискової фрези показана на рисунку 2.

При занадто великій кількості елементів зростає трудомісткість опису вихідних даних, час рахунку і ймовірність збою комп'ютера. В той же час розміри елементів повинні бути достатньо малі для збільшення точності розрахунку і збільшення роздільної здатності. Тому було вирішено обмежитися розрахунком невеликої області різального клина поблизу різальної кромки (рис. 3), а не розраховувати все тіло фрези.

**Рис. 2** – Вихідна схема розрахунку напружено-деформованого стану цілісної дискової фрези**Рис. 3** – Розрахункова область різального клина**Рис. 4** – Вихідна схема розрахунку напружено-деформованого стану сектора дискової фрези

Виділений сектор з зубом фрези розбивається на скінченні елементи (рис. 4).

В результаті розрахунку МСЕ з використанням програми ANSYS, ми отримали розподіл деформації різального клина і розподіл еквівалентних напружень при фрезеруванні сталі 35ХГСА дисковою фрезою з ножами зі швидкорізальної сталі (рис. 5 і 6).

З рис. 5 і рис. 6 видно що, у різальній кромки гострого зуба виникає велика деформація і

велике напруження, наближається до межі міцності матеріалу на стиск. Далеко від різальної кромки є напруження, що наближаються до межі міцності на розтяг, що пояснює руйнування різальної пластини в області, віддаленій від місця прикладання навантаження. В області впадини зуба фрези виникає підвищене місцеве напруження. Значить під дією однакової сили, в цій області швидше виникають напруження, ніж в інших частинах інструмента.

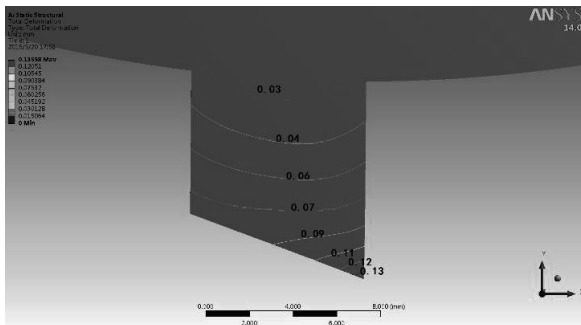


Рис. 5 – Деформація в гострому зубі фрези. Сталь 35ХГСА – Р6М5, $s_z = 0,03$ мм/зуб, $t = 15$ мм, $v = 6$ м/хв

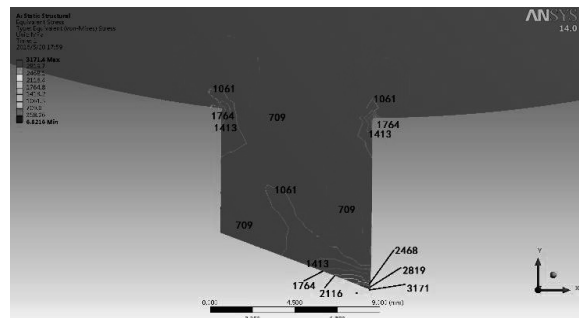
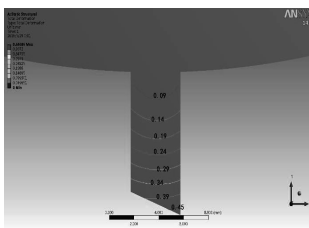


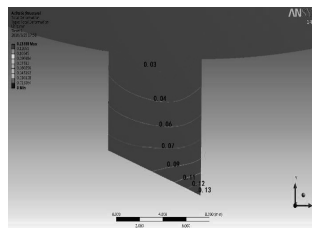
Рис. 6 – Розподіл еквівалентних напружень в гострому зубі фрези. Сталь 35ХГСА - Р6М5, $s_z = 0,03$ мм/зуб, $t = 15$ мм, $v = 6$ м/хв

4.3 Дослідження НДС зуба фрези при різній товщині різальної пластини

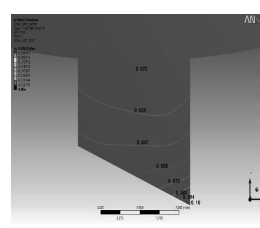
При різній товщині різальної пластини еквівалентні напруження змінюються наступним чином (рис. 7 і 8):



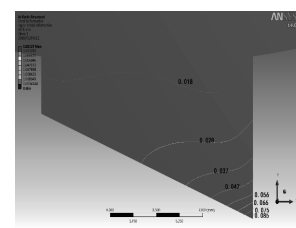
а) Деформація при товщині $h = 4$ мм



б) Деформація при товщині $h = 8$ мм

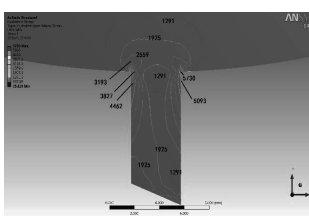


с) Деформація при товщині $h = 10$ мм

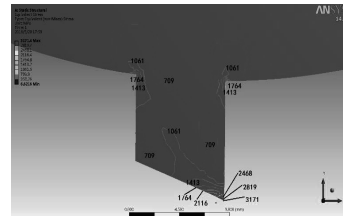


д) Деформація при товщині $h = 16$ мм

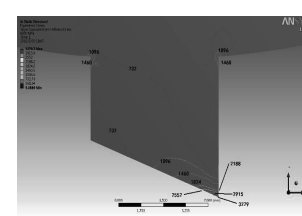
Рис. 7 – Деформація в різальному клині при різній товщині h різальної пластини. Сталь 35ХГСА - Р6М5, $s_z = 0,03$ мм/зуб, $t = 15$ мм, $v = 6$ м/хв



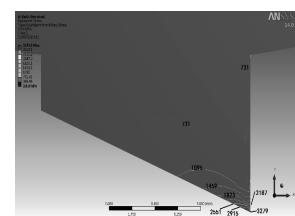
а) Напруження при товщині $h = 4$ мм



б) Напруження при товщині $h = 8$ мм



с) Напруження при товщині $h = 10$ мм



д) Напруження при товщині $h = 16$ мм

Рис. 8 – Розподіл еквівалентних напружень при різній товщині різальної пластини. Сталь 35ХГСА - Р6М5, $s_z = 0,03$ мм/зуб, $t = 15$ мм, $v = 6$ м/хв

З рис. 7 і рис. 8 видно що, при обробці різальною пластину з товщиною менше 5 мм виникають великі напруження, що перевищують межу міцності швидкорізальної сталі, що призводить до викришування головної різальної крайки.

Верстати та інструменти

Найбільшою мірою товщина різальної пластини h впливає на величину найбільшого стискального напруження в різальному клині при $h \leq 5$ мм. При подальшому збільшенні товщини пластини цей вплив істотно зменшується, а при $h > 10$ мм зміна товщини пластини практично не впливає на величину найбільшого еквівалентного напруження у різальній кромці.

4.4 Дослідження ПДВ інструмента при різному характері розподілу контактних навантажень.

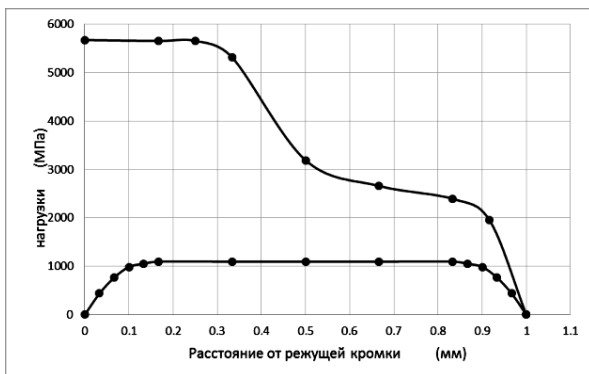
Сумарні сили, що діють на довжині контакту стружки з передньою поверхнею:

$$P_z = P_{z_1} + P_{z_2} = 4580 + 10432 = 15012 \text{ Н}$$

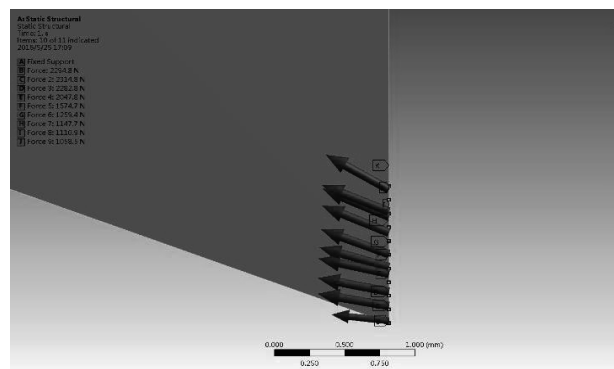
$$P_y = P_{y_1} + P_{y_2} = 1208 + 2752 = 3960 \text{ Н}$$

Таблиця 2 – Сили, що діють в вузлах сітки

№ вузла	Нормальна сила, Н	Дотична сила, Н
1	2280	260
2	2280	400
3	2240	440
4	2000	440
5	1512	440
6	1180	440
7	1060	440
8	1020	440
9	980	400
10	460	260
Загальна сила на пластині:	15012	3960



а) Розподіл контактних напружень на передній поверхні



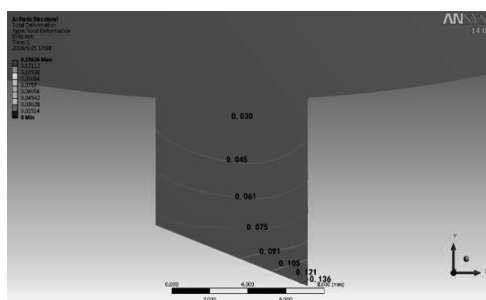
б) Завдання зовнішнього навантаження на передній поверхні

Рис. 9 – Розподіл зовнішніх навантажень на передній поверхні.

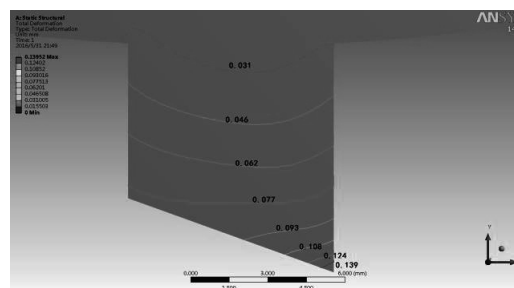
Сталь 35ХГСА - Р6М5, $s_z = 0,03$ мм/зуб, $t = 15$ мм, $v = 6$ м/хв

З рис. 10 і 11 видно, що розподіл еквівалентного напруження і деформації, отримані під дією реального розподілу навантаження, не сильно відрізняються від розподілів, отриманих під дією рівномірного навантаження (рис. 6).

Розподіл еквівалентних напружень, отриманий при дії зосередженого навантаження, у різальній кромці істотно більше, ніж при дії реального розподілу, що не збігається з дійсністю.

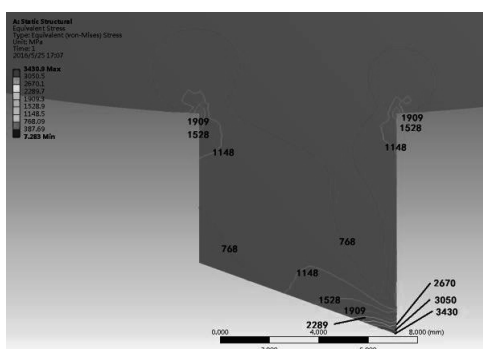


а) При дії реального розподілу

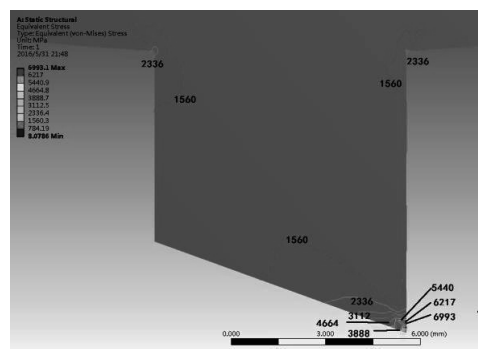


б) При дії зосередженого навантаження

Рис. 10 – Деформації в пластині при різному характері розподілі зовнішніх навантажень.
Сталь 35ХГСА - Р6М5, $s_z = 0,03$ мм/зуб, $t = 15$ мм, $v = 6$ м/хв



а) Розподіл контактних напружень на передній поверхні



б) Завдання зовнішнього навантаження на передній поверхні

Рис. 11 – Розподіл еквівалентних напружень при різному розподілі зовнішніх навантажень.
Сталь 35ХГСА - Р6М5, $s_z = 0,03$ мм/зуб, $t = 15$ мм, $v = 6$ м/хв

Висновки

– При моделюванні можна застосовувати рівномірне навантаження замість реального навантаження, щоб зменшувати трудомісткість отримання вихідних даних і в той же час забезпечити достатньо високу точність.

– При обробці сталі 35ХГСА гострозаточеним інструментом з $\gamma = 0^\circ$ в перший же момент відбувається викришування різальної крайки з утворенням фаски на задній поверхні внаслідок перевищення стискальних напружень граничного значення. Максимальна деформація відбувається на різальній кромці.

– При більшій товщині різальної пластини еквівалентні напруження істотно менше, але збільшення товщини більше 8 мм істотних змін не викликає.

– Найбільше напруження в тонких пластинах (менше 4 мм) перевищує межу міцності на стиск інструментального матеріалу – швидкорізальної сталі Р6М5 ($\sigma_{-B} = -5000$ МПа), що підтверджується на практиці (тонкі пластини при обробці сталі 35ХГСА ламаються).

Список використаних джерел:

1. Кожевников Д. В. Резание материалов / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов. – М. : Машиностроение, 2012. – 304 с.
2. Режущий инструмент : учебник для вузов / под общ. ред. С. В. Кирсанова. – М. : Машиностроение, 2014. – 520 с.
3. Справочник конструктора-инструментальщика / под ред. В. А. Гречишникова, С. В. Кирсанова. – М. : Машиностроение, 2006. – 542 с.

References

1. Kozhevnikov, D & Kirsanov, S 2012, *Rezaniye materialov*, Mashinostroyeniye, Moskva.
2. Kirsanov S, 2014, *Rezhushchiy instrument*, Mashinostroyeniye, Moskva.
3. Grechishnikov, V & Kirsanov, S 2006, *Spravochnik konstruktora-instrumentalshchika*, Mashinostroyeniye, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 5 грудня 2016 р.