

АКАДЕМІЯ ТЕХНІЧНИХ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

**Тарас В. І., Пилипчук М. І.,
Лазарчук К. Я., Саловський С. А.**

**ДЕРЕВОРІЗАЛЬНІ КРУГЛІ ПИЛКИ
ІЗ КОМБІНОВАНИМ ЗУБЧАСТИМ ВІНЦЕМ**

Монографія

Видавець Кушнір Г.М.
Івано-Франківськ – 2022

УДК 674.053:621.934

Д 11

*Рекомендовано до друку Вченою Радою наукової установи
Академія технічних наук України (протокол №3 від 27.04.2022 року).*

Рецензенти:

Грицай І. Є., доктор технічних наук, професор кафедри роботизації та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка»

Шахбазов Я. О., доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічного і пакувального виробництва Української академії друкарства

Маєвський В. О., доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту деревообробних та комп'ютерних технологій і дизайну Національного лісотехнічного університету України

Тарас В. І., Пилипчук М. І., Лазарчук К. Я., Саловський С. А.

Д 11 Дереворізальні круглі пилки із комбінованим зубчастим вінцем.
Монографія. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г.М., 2022. – 120 с.

ISBN 978-617-7926-35-0

УДК 674.053:621.934

Висвітлено результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу поздовжнього розпилювання деревини круглими пилками із комбінованим зубчастим вінцем. Встановлено закономірності впливу конструкційних параметрів зубців пилки на точність та енергоємність процесу пиляння. Розроблено нову конструкцію пилки із комбінованим зубчастим вінцем, що забезпечує підвищення робочої жорсткості пилки та дає змогу розпилювати деревину з точністю $\pm 0,5$ мм, а також знизити енергоємність процесу пиляння на 30%. Отримано рівняння регресії для визначання поля розсіювання розмірів деталей та потужності різання під час розпилювання деревини пилкою з комбінованим зубчастим вінцем залежно від швидкості подавання, висоти пропилю та породи деревини, які дають змогу прогнозувати точність обробляння та встановлювати раціональні режими пиляння.

ISBN 978-617-7926-35-0

© Тарас В. І., 2022

© Пилипчук М. І., 2022

© Лазарчук К. Я., 2022

© Саловський С. А., 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ ПИЛЯННЯ ДЕРЕВИНИ КРУГЛИМИ ПИЛКАМИ	7
1.1 Різновиди конструкцій круглих пилок для поздовжнього розпилювання деревини	7
1.2 Огляд праць із досліджування точності пиляння деревини круглими пилками	11
1.3 Аналіз чинників впливу на точність поздовжнього розпилювання дощок круглими пилками.....	15
1.4 Напрями вдосконалювання конструкцій круглих пилок	18
1.5 Висновки, мета і завдання дослідження.....	19
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПИЛЯННЯ ПИЛКОЮ З КОМБІНОВАНИМ ЗУБЧАСТИМ ВІНЦЕМ	21
2.1 Конструкція комбінованого зубчастого вінця круглої пилки як об'єкта дослідження.....	21
2.1.1 Вибір способу комбінування зубців із прямим і косим загостренням	21
2.1.2 Пилка із комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$	24
2.2 Досліджування робочої жорсткості пилки методом кінцевих елементів	25
2.2.1 Методика досліджування $3D$ моделі пилки.....	25
2.2.2 Встановлення залежностей робочої жорсткості пилки $FZ/2WZ$ від конструкційних параметрів.....	29
2.3 Встановлювання кінематичних залежностей процесу пиляння пилкою з комбінованим зубчастим вінцем.....	31
2.3.1 Визначення кута контакту для прорізних та зачисних зубців пилки.....	31
2.3.2 Визначення товщини стружки для прорізних та зачисних зубців пилки $Fz/2Wz$	35
2.3.3 Вплив величини подачі на зубець на формування пропили.....	37
2.4 Математичне моделювання точності поздовжнього пиляння пилками з комбінованим зубчастим вінцем.....	39

2.4.1 Початкові засади моделювання.....	39
2.4.2 Загальний вигляд математичної моделі точності пиляння на верстатах позиційного типу.....	40
2.5 Залежності визначання складових сил та потужності різання пилкою з комбінованим зубчастим вінцем.....	48
2.5.1 Дотична складова сили різання.....	48
2.5.2 Нормальна складова сили різання.....	59
2.5.3 Бокова складова сили різання.....	60
2.5.4 Потужність на різання.....	63
2.6 Математична модель точності поздовжнього пиляння на верстатах позиційного типу	65
2.7 Висновки до другого розділу	67
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЯННЯ КОНСТРУКЦІЙ КРУГЛИХ ПИЛОК З КОМБІНОВАНИМ ЗУБЧАСТИМ ВІНЦЕМ.....	68
3.1 Обґрунтування конструкційних параметрів пилки із комбінованим зубчастим вінцем.....	68
3.1.1 Основні лінійні параметри пилки	68
3.1.2 Параметри зубчастого вінця пилки.....	71
3.2 Розробляння конструкції пилки з комбінованим зубчастим вінцем <i>FZ/2WZ</i>	73
3.3 Конструкція пилки з комбінованими зубчастим вінцем <i>FZ1/FZ2</i>	75
3.4 Особливості технології виготовлення пилок з комбінованим зубчастим вінцем	78
3.5 Висновки до третього розділу.....	85
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПИЛЯННЯ ПИЛКАМИ ІЗ КОМБІНОВАНИМ ВІНЦЕМ.....	86
4.1 Дослідження точності процесу пиляння пилкою <i>FZ/2WZ</i>	86
4.1.1. Розробляння плану експерименту з багатьма чинниками..	86
4.1.2 Експериментальна установка і вимірювальні прилади ...	89
4.1.3 Результати точності процесу пиляння пилкою <i>FZ/2WZ</i> ..	94
4.1.4 Результати енергоємності процесу пиляння пилкою <i>FZ/2WZ</i>	98
4.2 Результати дослідження точності пиляння пилкою <i>FZ1/FZ2</i>	101

4.3 Дослідження зміни точності пиляння упродовж періоду тривкості пилки FZ/2WZ щодо спрацювання.....	105
4.3.1 Методика дослідження точності пиляння упродовж періоду тривкості пилки щодо спрацювання.....	105
4.3.2 Результати точності пиляння упродовж періоду тривкості пилки FZ/2WZ щодо спрацювання.....	109
4.4 Висновки до четвертого розділу	110
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	111
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112

ВСТУП

Сучасний розвиток деревообробних технологій й верстатобудування відбувається прискореними темпами у напрямі економії сировинних ресурсів та енергоспоживання. Якщо ще 20 – 30 років назад основним завданням удосконалення деревообробних верстатів було підвищення продуктивності процесу різання деревини, то на сьогоднішній день, у зв'язку з активним використанням та різким зменшенням природніх запасів деревини, пріоритети змінилися. На сьогодні найактуальнішим завданням для деревообробної галузі є раціональне використання деревини [1], яке забезпечується виготовленням пиломатеріалів з високою точністю та максимальним корисним виходом сировини. На лісопильних підприємствах деревина у вигляді колод розпилюється на дошки, які слугують основним видом заготовок для столярного та меблевого виробництва [2]. Основу сучасних меблів і столярно-будівельних виробів складають клеєні брусківі та щитові заготовки із цільної деревини [3-5]. Для виготовлення клеєних заготовок використовують бруски різних розмірів, які одержують шляхом поздовжнього розпилювання дощок на круглопилкових верстатах.

Круглопилкові верстати є найпоширенішим обладнанням для розпилювання дощок на брусківі заготовки, завдяки спрощеній конструкції різального інструменту, верстата та організації процесу різання [6, 7]. Круглопилкові верстати складають близько 40% від загальної кількості всіх деревообробних верстатів, а верстати для поздовжнього розпилювання дощок – більше 50% із всіх видів конструкцій круглопилкових верстатів [6, 8].

Значні похибки обробляння (до 6,0 мм), що виникають під час поздовжнього розпилювання деревини круглими пилками [9, 10], призводять до зменшення корисного виходу сировини та збільшення припусків для обробляння брусківих заготовок на наступних стадіях технологічного процесу. Відповідно, точність поздовжнього розпилювання деревини круглими пилками є визначальним показником щодо економії енергії та деревинних ресурсів. З огляду

на це, сучасні вимоги щодо точності розмірів і форми брускових заготовок для виготовлення клеєної масивної деревини стають щораз вищими. Підтвердженням є чинний стандарт з якості пиломатеріалів ДСТУ 19917:2016 ($\pm 0,5$ мм) [11], в якому допустимі відхилення розмірів пиломатеріалів зменшено вдвічі у порівнянні зі стандартом ДСТУ EN 336:2003 ($\pm 1,0$ мм) [12].

Отже, основним завданням удосконалення круглих пилок є забезпечення високої точності розпилювання ($\pm 0,5$ мм), вирішення якого дасть змогу усунути з технологічного процесу операції зі зниження значних похибок на поздовжньо-фрезувальних верстатах, що призводить до додаткових втрат деревини та електроенергії.

Тому досліджування способів вдосконалення процесу поздовжнього розпилювання деревини круглими пилками з метою забезпечення високої точності розпилювання ($\pm 0,5$ мм) та мінімального енергоспоживання є актуальним завданням.

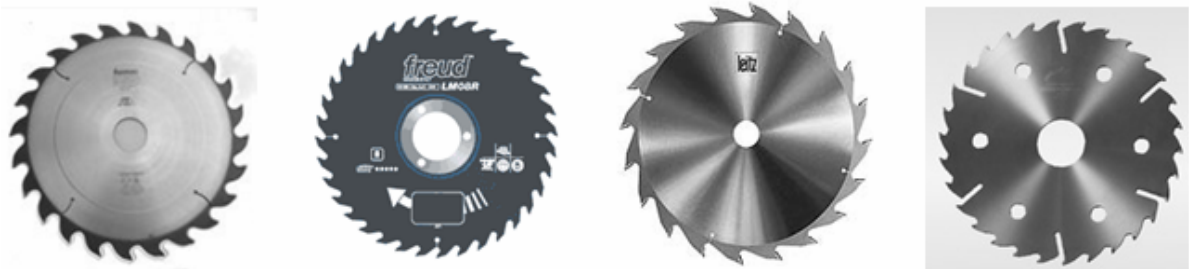
РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТОЧНОСТІ ПИЛЯННЯ ДЕРЕВИНИ КРУГЛИМИ ПИЛКАМИ

1.1 Аналіз відомих конструкцій круглих пилок для поздовжнього розпилювання деревини

Круглі пилки – є найпоширенішим інструментом для розпилювання деревини, який постійно вдосконалюється [13-20]. Круглі пилки з пластинами твердого сплаву різняться призначенням, конструкцією корпусу, формою пластин твердого сплаву, геометричними та лінійними параметрами [7, 21].

Круглі пилки із суцільним корпусом (рис. 1.1 *а, б, в, г*) використовуються на однопилкових круглопилкових верстатах [7]. На корпусі таких пилок можуть бути технологічні прорізи, що переривають тепловий потік під час напаявання пластин твердого сплаву та прорізи, що зменшують рівень шуму і вібрації круглої пилки під час роботи.



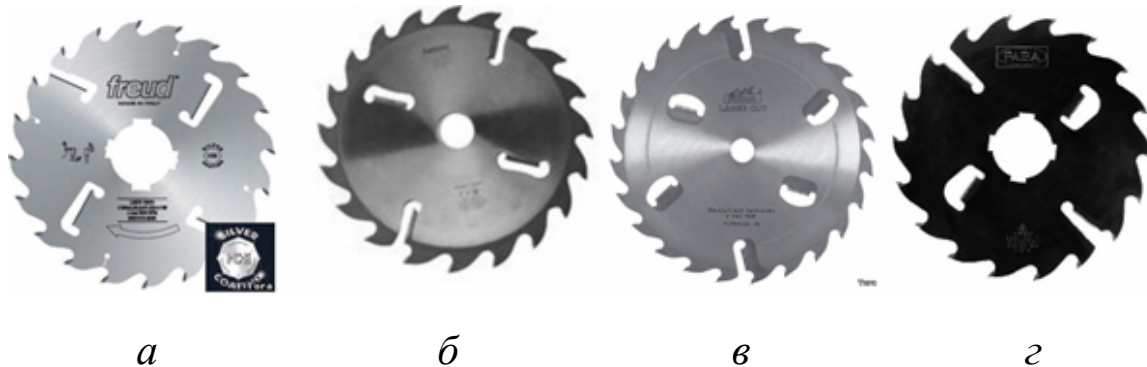
а – фірма ІНТЕКС плюс (Україна); *б* – фірма FREUD (Італія);
в – фірма LEITZ (Німеччина); *г* – фірма KANEFUSA (Японія)

Рисунок 1.1 – Круглі пилки з пластинами твердого сплаву
та суцільним корпусом

Пилки, що використовуються на багатопилкових круглопилкових верстатах (рис. 1.2 *а, б, в, г*), мають малу кількість зубців; на корпусах є напаяні пластини для виносу стружки з пропилу та технологічні

пази під шпонки гільзи круглопилкового верстата, на яку встановлюється набір пилок [22].

Суттєвий вплив на якість розпилювання деревини та енергоємність процесу пиляння має форма твердосплавної пластини зубця пилки [7, 23].



а – фірма FREUD (Італія); *б* – фірма ІНТЕКС плюс (Україна);
в - фірма Pillana (Чехія); *г* - фірма FABA (Польща)

Рисунок 1.2 – Круглі пилки з пластинами твердого сплаву на зубцях та зачисними пластинами для винесення стружки з пропилу

Основні форми різальних твердосплавних пластин зубців пилок [24] наведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1– Форми різальних пластин зубців пилок

Профіль пластин зубця з боку передньої поверхні	Прямокутний	Запалій	Трапецієподібний	Скошений на один бік	Скошений боки, що чергується	Конічний	Прямокутно-трапецієподібний	Скошено-конічний	Скошений на два боки
Умовне позначення ISO	FZ	HZ	TR	ES	WZ	KON	FZ/TR	WZ/KON	DZ
Форма									

Для поздовжнього розпилювання деревини використовуються такі форми твердосплавних пластин: *FZ* – для розпилювання без високих вимог до якості стінок пропилу та крайок заготовок; *WZ* – для чистового розпилювання; *HZ* – для розпилювання з підвищеною вимогою щодо якості розпилювання.

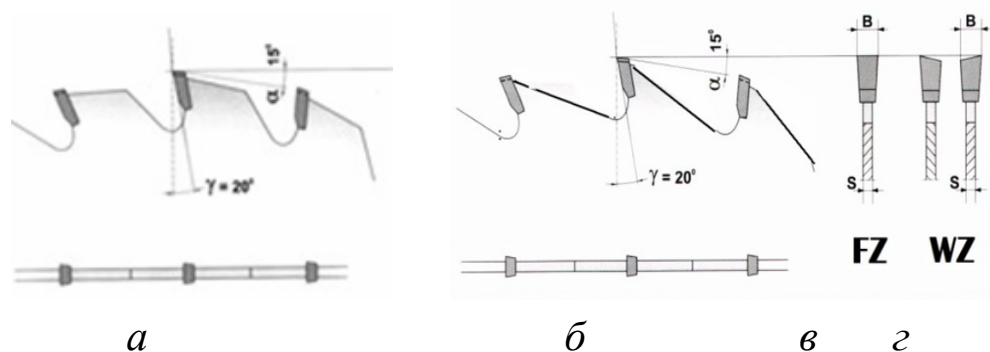
Також було проаналізовано конструкції круглих пилок для поздовжнього розпилювання деревини різних фірм виробників (табл. 1.2), які забезпечують підприємства України таким інструментом, і

Таблиця 1.2 – Лінійні та кутові параметри круглих пилок

Зовнішній діаметр пилки $\varnothing D$ мм	Посадковий діаметр пилки $\varnothing d$ мм	Ширина пластинки В мм	Товщина тіла пили b, мм	Кількість зубців пилки z, шт	Передній кут γ	Задній кут α	Форма пластини
Фірма Інтекс							
250-800	32, 50-100	3,2 - 6,5	-	18 - 36	20°	15°	FZ
Фірма Механік							
350-400	32, 50-60	3,6 - 4,1	2,4 - 2,8	20 - 36	20°	15°	FZ
Фірма Поділля							
250-600	30 - 90	3,2 - 5,0	2,2 - 3,8	16 - 28	20°	15°	FZ
Фірма Freud							
250-600	30, 60-90	2,2 – 5,5	1,8 - 3,5	24 - 40	20°, 25°	15°, 12°	FZ;WZ
Фірма Leitz							
250-450	30, 70-80	2,4 – 5,0	1,6 - 3,2	18 - 40	-	-	FZ
Фірма Leuco							
250-520	30, 60-100	2,4 - 4,6	2,2 - 3,2	16 - 48	20°	15°	FZ;WZ

Фірма Pillana							
250-800	30, 70-80	3,2 - 4,4	2,2 - 3,2	16 - 28	20°	15°	FZ
Фірма Faba							
250-600	30, 60-150	2,8 - 5,5	1,8 - 4,0	16 - 28	18°, 21° 23°	≈15°	FZ
Фірма Gass							
250-610	30, 50-90	2,8 - 6,3	1,8 - 3,9	18	-	-	FZ

встановлено, що для поздовжнього розпилювання цільної деревини, найчастіше застосовують пилки з ламаною або прямою задньою гранню (рис.1.3 *а, б*) і пластинами твердого сплаву FZ – з прямим загостренням лез по задній поверхні та WZ – з косим загостренням лез по задній поверхні (рис. 1.3 *в, г*).



а, в – зубчастий вінець пилки; *б, г* – форми твердосплавних пластин

Рисунок 1.3 – Конструкції зубців пилок

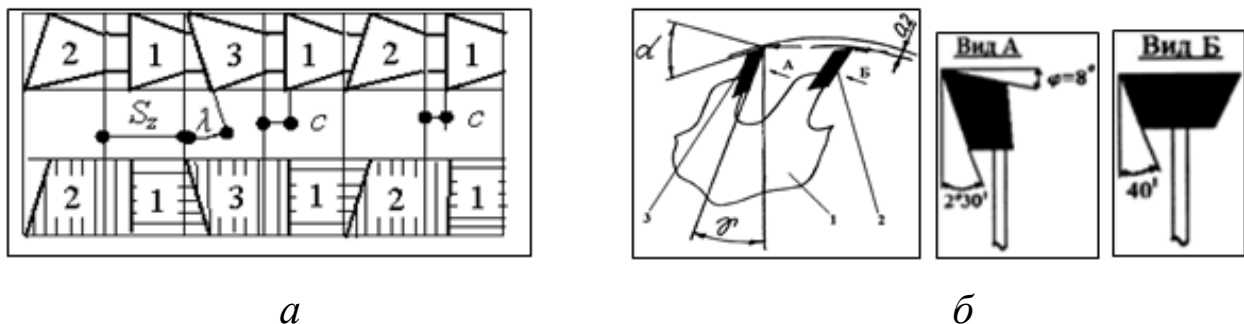
Проте у згаданих конструкцій круглих пилок є суттєві вади: у перших – висока енергоємність пиляння, у других – малий ресурс роботи пилки.

Отже, на основі результатів аналізу існуючих конструкцій пилок із пластинами твердого сплаву виникає необхідність їх вдосконалювання з метою підвищення точності розпилювання та зниження енергоємності процесу.

1.2 Огляд праць із досліджування точності пиляння деревини круглими пилами

Дослідженням жорсткості круглих пилок присвячено роботи [7]. Для підвищення стійкості пилки в пропилі на сьогодні застосовують різні конструкційні рішення: радіальні прорізи й напаяні в них пластини для винесення стружки; проміжні зубці; різні профілі різальних зубців, тощо.

Відомими також є роботи [7], в яких жорсткість пилок пропонується підвищити способом комбінування зубців з пластинами твердого сплаву різного профілю та розмірів (рис. 1.4 а, б).



а – зубці прямо і косо загострені по передній грані;
б – зубці різної висоти і форми пластин твердого сплаву

Рисунок 1.4 – Конструкції комбінованих зубчастих вінців
круглих пилок для поздовжнього розпилювання деревини

У роботі [7] розроблено конструкцію пилки для поздовжнього пиляння деревини із комбінуванням косо і прямо загострених зубців (див. рис. 1.4, а), яка забезпечує зниження енергоємності процесу пиляння. Автором роботи [7] розроблено способом комбінування зубців пилки різної форми і розмірів (див. рис. 1.4, б) конструкцію пилки для поздовжнього розпилювання деревини із м'яких листяних порід.

Авторами роботи [25] виконано дослідження якості пиляння круглими пилами з пластинами із карбиду вольфраму та металокерамічним напиленням, результати яких показали, що

вищу якість забезпечує конструкція пилки із металокерамічним напиленням, за умови застосування високих швидкостей різання та мінімальної швидкості подавання.

У роботі [26] подано нову концепцію гасіння коливань пилок, яка базується на негативній ємності шунтованих п'єзоелектричних перетворювачів, що наносяться на посадковий отвір пилкового диска. Необхідна енергія для електроніки генерується з обертання пилки, яка є свого роду генератором, тому ніяких змін у верстаті робити не потрібно. Встановлено, що п'єзоелектричне шунтове демпфування дискової пилки з автономним джерелом живлення забезпечує зменшення вібрації інструмента.

Авторами [27] за допомогою методу кінцевих елементів досліджено вплив вальцювання на стійкість круглої пилки. Результати показують, що натяг пилкового диска і ефект напруженого стану може бути різним, коли тангентальна сила і сила тиску ролика не однакові. Отже, зрівноваження тангентальної сили і сили тиску ролика, особливо для пилок невеликих діаметрів, покращує результат. Автори статті [28] вважають, що найважливішою умовою різання деревини дисковими пилками є висока точність пиляння, яка залежить від стійкості зубців пилки в пропилі. Проведено огляд поточного стану знань, щодо характеристик власних коливань пилок та представлено деякі експериментальні результати щодо зменшення вібрації круглої пилки та підвищення продуктивності процесу пиляння. Автори статті [29] аналізують напруження навколо зубців круглих пилок різних конструкцій під час різання. На основі отриманих аналітичних результатів, пропонується ефективний підхід для зниження концентрації напружень навколо зуба пилки і запобігання виламування зубців.

Дослідження точності пиляння деревини круглими пилками [7] показали, що умову точного пиляння круглими пилками можна виразити залежністю

$$y_{\max} = \frac{P_x}{j_p} \leq [y], \quad (1.1)$$

де y_{\max} – максимальне відхилення пилки під дією бокової сили різання, м; P_x – бокова сила різання, Н; j_p – робоча жорсткість пилки від дії сил різання, Н/м;

$[y]$ – допустиме відхилення пилки під час пиляння, мм, а зміна робочої жорсткості пилки від горизонтальної сили різання P_x , має однаковий характер як для рамних, так і для круглих пилок.

В [7] наведено, що значний вплив на точність пиляння деревини круглими пилками здійснюють температурний перепад, відцентрові сили інерції, розвід зубців пилки (уширення на сторону, для твердосплавних пилок), подача на зубець, коефіцієнт заповнення западин зубців. Серед основних причин зниження жорсткості пилки під час пиляння є напруження в диску пилки від нерівномірного його нагрівання до досягнення теплової рівноваги. Під час пиляння робота різання перетворюється у теплову енергію, внаслідок чого відбувається нагрівання диска пилки. Дослідженню впливу температурного перепаду і відцентрових сил інерції присвячені роботи Thunell B., Walker K., Fischer R. [30-32].

В [7] досліджено, що нагрівання круглих пилок в процесі пиляння зумовлене також тертям пружно-деформованих волокон деревини по задній і бокових поверхнях зубців та тертям стружки по передній поверхні зубців. Нагрівання пилки відбувається лише у зоні різання, тобто через перепад температури в диску зменшується робоча жорсткість пилки і вона втрачає стійкість у пропилі.

Розробляння способів щодо підвищення термостійкості пилок та вирівнювання температурного перепаду по радіусу диска присвячені роботи С.В. Щепочкина, І.І. Соловійова, М.М. Твердиніної, Г.С. Гуркіна, Г.А. Жодзішко, А.Н. Галашова та інших.

Вважається, що проблему температурного перепаду в диску пилки під час пиляння можна вирішити двома шляхами: нагріванням його середини або охолодженням різальної частини.

В.І. Саньов у своїх дослідженнях встановив, що використання

відомих способів вирівнювання температурного перепаду по радіусу диска дозволяє знизити поперечні коливання круглої пилки на 20-25 %, а точність пиляння підвищити на 16-20 %.

Одним із ефективних способів підвищення жорсткості круглих пилок є застосування напрямників, які встановлюють над або під розпилюваним пиломатеріалом. Раніше розроблено різновиди конструкцій контактних та безконтактних напрямників. Для зменшення тертя напрямників з пилкою було запропоновано виготовляти їх у вигляді аеростатистичних опор, досліджених та вдосконалених Г.Ф. Прокоф'євим, П.Б. Шубним. Доцільність використання електромагнітних напрямних було досліджено та обґрунтовано Є.Ю. Кузнецовим.

Для вирішення питання термостійкості пилки широкого застосування набув спосіб нанесення на диск покриття з різних полімерних матеріалів. Наукова праця [33] підтверджує, що полімерні покриття підвищують стійкість пилки за рахунок відсутності її перегрівання внаслідок тертя диска із стружкою у пропилі.

Аналітичні залежності сили, яка діє на зубець під час різання деревини, розглянуто у наукових працях, М.А. Дешевого, О.Л. Бершадського, Е.Г. Івановського, С.А. Воскресенського, В.І. Любченка та інших. Силу різання розкладають на три складових – дотичну, яка характеризує енергоємність процесу пиляння деревини та нормальну і бокову, які характеризують якісні показники (шорсткість і точність) процесу пиляння деревини.

Якщо середнє значення дотичної складової сили різання прийняти за 100%, то середні значення нормальної та бокової складових становитимуть 12% та 8% відповідно [7]. За умови зростання затуплювання зубців це співвідношення змінюється у зв'язку із зростанням нормальної та бокової складових сили різання.

З проведеного огляду наукових праць визначено два основні напрями досліджень, що ставлять за мету підвищення точності процесу пиляння круглими пилками: перший – вдосконалення конструкцій круглопилкових верстатів шляхом підвищення їх геометричної точності

та жорсткості системи ВІЗ, другий – вдосконалювання конструкцій круглих пилок з метою підвищення їх робочої жорсткості та стійкості в пропилі.

1.3 Аналіз чинників впливу на точність поздовжнього розпилювання дощок круглими пилками

Процес поздовжнього розпилювання деревини круглими пилками оцінюється такими критеріями, як точність розпилювання та енергоємність процесу пиляння. Одним із вагомих чинників впливу на ці критерії є конструкція твердосплавної пилки, тому необхідно проаналізувати існуючі способи її вдосконалення з метою підвищення точності та зниження енергоємності процесу пиляння.

Одним із завдань вдосконалення круглих пилок є підвищення їхньої робочої жорсткості [7], що забезпечує стійкість пилки у пропилі і підвищення точності розпилювання. Відповідно на точність пиляння впливає конструкція диска пилки та зубчастого вінця [24], тому розглянемо можливі способи вдосконалення конструкцій круглих пилок.

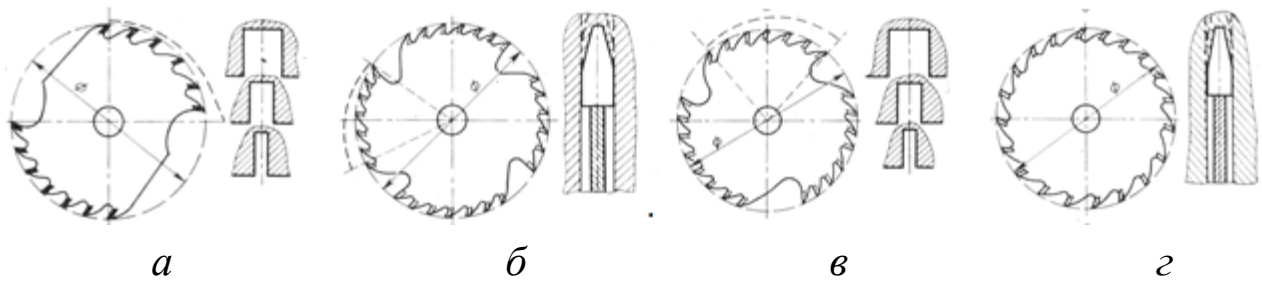
Підвищення жорсткості пилки можливе за рахунок збільшення товщини диска пилки (2,4...4,0мм), але це призводить до збільшення ширини пропилу і, тим самим, знижує корисний вихід пиломатеріалу та підвищує енергоємність процесу.

На енергоємність процесу пиляння круглими пилками впливає ряд чинників [22] серед них: ширина пропилу, яка залежить від товщини диска пилки; кількість зубців, що одночасно приймають участь у процесі пиляння; сили тертя, що залежать від умов процесу пиляння деревини. Для зменшення впливу цих чинників застосовують пилки із меншою кількістю зубців (12–28), а в диску роблять прорізи із підчисними ножами. Недоліком цих способів є те, що зменшення кількості зубців підвищує шорсткість обробленої поверхні, а прагнення зменшити товщину диска призводить до втрати стійкості пилки та появи хвилястості пропилу.

Одним із ефективних способів зниження шорсткості обробленої поверхні та енергоємності процесу пиляння є зміна форми твердосплавної пластинки зуба пилки. Класичною формою твердосплавних пластинок зубів пилки для поздовжнього розпилювання масивної деревини є пластинки форми FZ (див. табл. 1.1). З метою підвищення якості обробленої поверхні застосовують пилки із формою пластинок WZ, але ресурс роботи такої пилки зменшується на 40% у порівнянні із прямою FZ [7].

Знизити шорсткість обробленої поверхні намагаються шляхом комбінування різних форм пластин у зубчастому вінці: із формою твердосплавних пластин FZ, які чергуються із TR (FZ/TR); із формою WZ, що чергуються із KON(WZ/KON) [24]. Такі пилки застосовуються для розкрою плитних матеріалів на верстатах з однією основною пилкою, тобто без підрізної пилки, і за технічними параметрами не можуть бути використані для розпилювання цільної деревини.

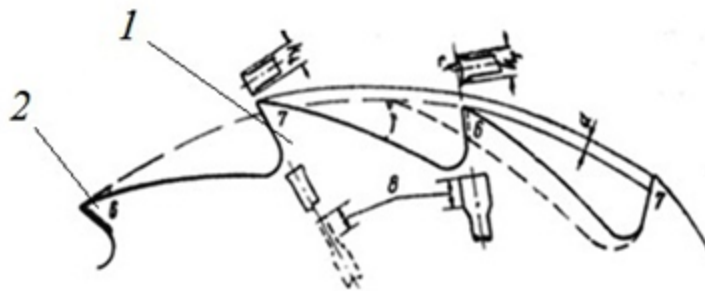
Підвищення точності із одночасним зниженням енергоємності процесу пиляння круглими пилами можливе шляхом оптимізації механізму стружкоутворення за рахунок групового розміщення різальних елементів з їх функціональним розділенням на підрізні і сколювальні [7]. На сьогодні відомі конструкції круглих пилок з пластинами твердого сплаву, в яких зубчастий вінець виконаний у вигляді двох і більше груп із прорізних і формувальних зубців (рис. 1.5). Першим у кожній групі є прорізний зубець, який має найменшу товщину, а всі наступні (3-6 шт) зубці – формувальні, товщина яких поступово зростає, а висота – спадає по радіусу. Недоліком таких пилок є складність конструкції та висока енергоємність процесу пиляння у зв'язку з тим, що пилки призначені для виготовлення технологічної стружки великих розмірів (4 – 16мм).



а – пилка з прямими груповими зубцями (дві групи); *б* – пилка з прямими груповими зубцями (чотири групи); *в* – пилка з конічними зубцями (три групи); *г* – пилка з конічними зубцями

Рисунок 1.5 – Круглі пилки для поздовжнього розпилювання деревини з отриманням технологічної стружки

Прагнення розділити ширину пропилу на окремі ділянки, оброблення яких здійснюється від середини пропилу до боків, і тим самим зменшити величину сколів, призвело до комбінування зубців пилки з твердосплавними пластинками різної ширини і висоти, що чергуються через один із функціональним їх розділенням на прорізні і зачисні (рис.1.6).



1 – прорізний зубець, *2* – зачисний зубець

Рисунок 1.6 – Сталева кругла пилка для поздовжнього розпилювання деревини із комбінуванням зубців різної ширини і висоти

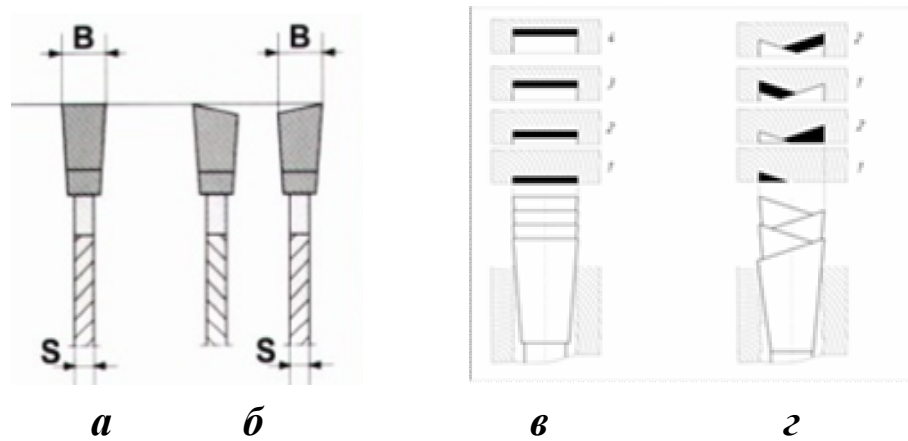
Така конструкція зубчастого вінця пилки дозволяє знизити енергоємність процесу пиляння до 30% [7].

На основі аналізу відомих способів вдосконалення конструкцій круглих пилок з пластинами твердого сплаву встановлено, що є значна кількість досліджень щодо вдосконалення конструкцій круглих пилок з метою зниження шорсткості обробленої поверхні та енергоємності процесу, проте дуже мало робіт, які основним завданням вдосконалення пилок ставлять підвищення точності процесу поздовжнього пиляння з одночасним зниженням енергоємності пиляння. Тому, існує необхідність розроблення нових способів вдосконалення конструкції пилок для поздовжнього розпилювання цільної деревини з метою підвищення точності з одночасним зниженням енергоємності процесу пиляння.

1.4 Напрями вдосконалювання конструкцій круглих пилок

Удосконалення конструкцій круглих пилок з пластинами твердого сплаву із прямо і косо загостреними зубцями (рис. 1.7 а, б) полягає у забезпеченні підвищення точності поздовжнього пиляння деревини з одночасним зниженням енергоємності процесу шляхом застосування способу комбінування зубців різної форми і розмірів.

Аналізуючи схеми формування пропилу зубцями *FZ* та *WZ* відомих круглих пилок (рис.1.7, в, г), слід відмітити наступне. Зубці пилок із прямим загостренням зрізують стружку на всій ширині пропилу, що відповідає головній різальній кромці (див.рис.1.7, в), відповідно енергозатрати на різання такими зубцями будуть максимальними. Зубці пилки із косим загостренням лез, що чергуються (див.рис.1.7, г), зрізують стружку шириною, яка рівна половині ширини пропилу. Кожна стінка пропилу формується тільки половиною всіх зубців, які загострені в одну сторону. Як результат, загальна потужність на різання зменшується, проте, подача на зубець збільшується. Взаємодія зубця із деревиною відбувається під певним кутом, тому максимальні сили різання будуть зосереджені на вершинах зубців пилки [7], що пришвидшує зношення та зменшує період їхньої стійкості проти спрацювання.



a, б – форми твердосплавних пластин зубців *FZ, WZ* ;
в, з – схеми формування пропилу зубцями *FZ, WZ*

Рисунок 1. 7 – Конструкції зубців пилок та схеми формування пропилу пилками з прямо *FZ* і косо *WZ* загостреними зубцями

Отже, на основі огляду наукових джерел та аналізу основних чинників впливу на точність поздовжнього розпилювання деревини визначено спосіб удосконалювання конструкції круглої пилки – комбінування зубчастого вінця із зубців з прямо і косо загостреними пластинами твердого сплаву, що дасть змогу підвищити робочу жорсткість пилки та знизити енергоємність процесу пиляння.

1.5 Висновки, мета та завдання дослідження

1 Результати проведеного аналізу конструкцій круглих пилок для поздовжнього розпилювання деревини засвідчили, що існує багато видів конструкцій зубчастих вінців із пластинами твердого сплаву, які призначені для розпилювання різних матеріалів (ДСП, МДФ, OSB, пластиків, м'яких металів), проте для поздовжнього розпилювання деревини використовують тільки два профілі зубців *FZ* і *WZ* , які не повністю задовольняють вимоги щодо точності поздовжнього пиляння.

4 Огляд наукових праць свідчить, що є проведена значна дослідницька робота, щодо точності поздовжнього пиляння деревини круглими пилками, проте дуже мало є досліджень, які основними критеріями ставлять підвищення точності із одночасним зниженням

енергоємності процесу поздовжнього пиляння.

5 Підвищення точності поздовжнього розпилювання деревини на круглопилкових верстатах доцільно реалізувати шляхом вдосконалення конструкції круглої пилки.

Мета дослідження – підвищення точності та зниження енергоємності процесу поздовжнього розпилювання деревини удосконаленням конструкції пилки.

Завдання дослідження:

– розробити спосіб удосконалення конструкції пилки комбінуванням зубців із пластинами твердого сплаву різної форми та розмірів для підвищення точності та зниження енергоємності процесу пиляння;

– дослідити вплив конструкційних параметрів комбінованого зубчастого вінця круглої пилки на робочу жорсткість пилки за допомогою методів твердотільного моделювання і кінцевих елементів;

– розробити математичну модель точності пиляння деревини пилкою із комбінованим зубчастим вінцем для встановлювання характеру впливу на точність пиляння низки конструкційних та технологічних чинників;

– розробити нові конструкції круглих пилок із комбінованим зубчастим вінцем та обґрунтувати їхні лінійні і кутові параметри;

– виконати експериментальні дослідження для встановлення математичних моделей точності та енергоємності процесу пиляння від основних режимних чинників та підтвердження ефективності розроблених способів підвищення точності пиляння.

РОЗДІЛ 2

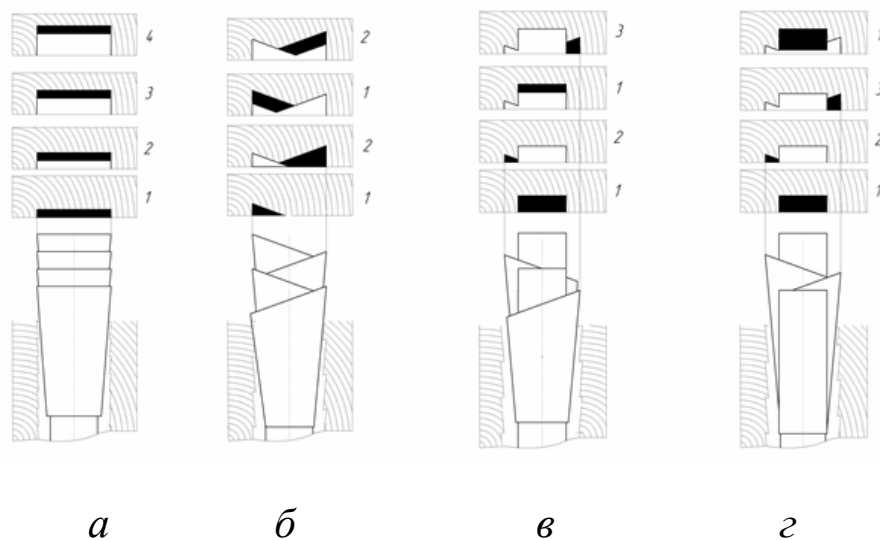
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПИЛЯННЯ ПІЛКОЮ З КОМБІНОВАНИМ ЗУБЧАСТИМ ВІНЦЕМ

2.1 Конструкція комбінованого зубчастого вінця круглої пилки як об'єкта дослідження

2.1.1 Вибір способу комбінування зубців із прямим і косим загостренням

За класичною теорією різання деревини [2] під час поздовжнього пиляння, головна різальна кромка зубця здійснює поздовжньо-торцеве різання, а бокові – поздовжньо-поперечне. На рис.2.1 наведено принцип формування поперечного перерізу стружки під час поздовжнього пиляння деревини пилками із різними профілями зубців.

Зубці пилок із прямим загостренням зрізують стружку на всій ширині пропилу, що відповідає головній різальній кромці (див. рис. 2.1, *a*) і підтверджують загальну теорію різання.



a – прямі *FZ*; *б* – косі *WZ*; *в* – комбіновані *FZ / WZ*;
г – комбіновані *FZ / 2WZ*

Рисунку 2.1 – Формування пропилу зубцями різних профілів

Зубці пилки із косим загостренням, що чергуються (див.рис.2.1,б), зрізають стружку шириною, яка рівна половині ширини пропилу. Кожна стінка пропилу формується тільки половиною всіх зубців, які загострені в один бік. Відповідно величина подачі, яка припадає на кожний із косо загострених зубців є в два рази більшою, ніж на зубець із прямим загостренням, що сприяє пришвидшеному зношенню і знижує ресурс пилки у 1,5-2 рази порівняно із пилкою з прямим загостренням зубців.

Комбінування форми зубців забезпечує розділення у часі навантаження на оброблюваний матеріал від сил різання і полягає в умовному розділенні зубців на прорізні (*FZ*), зубці із прямим загостренням по задній грані, що виступають над загальним колом різання; і зачисні (*WZ*), які мають косо загострення по задній грані зубця, а по висоті рівні загальному колу різання.

Комбінування зубців із прямим та косим загостренням по задній грані (див.рис. 2.1, в, г), поліпшує умови пиляння внаслідок збільшення частки поперечного різання та підвищує якість обробленої поверхні, а виступ грані прямого зубця забезпечує прямолінійність різку та стійкість інструмента у пропилі. Різниця між діаметрами кола різання зубців таких пил досягає 1-1,5 мм [40].

Процес формування пропилу пилкою з комбінованими зубцями *FZ/WZ* (див.рис.2.1,в) відбувається наступним чином. Перший прорізний зубець починає різання, видаляючи стружку шириною, яка рівна товщині полотна. Наступний за ним зачисний зубець, зрізає стружку з обох боків до загальної ширини пропилу, і на глибину трохи меншу за дно пропилу.

Формування пропилу пилкою з комбінованими зубцями *FZ/ 2WZ* (див. рис. 2.1, г) поділяється на два етапи. Спочатку прорізний зубець *1FZ* зрізає частину стружки, яка рівна товщині полотна пилки, утворюючи паз, який утримує пилку від бокового зміщення, а його головна різальна кромка здійснює торцеве різання. Наступний зачисний зубець *2WZ* розширює утворений пропил до ширини, яка відповідає ширині пропилу звичайної твердосплавної круглої пилки, а завдяки

косому загостренню по задній поверхні, головна різальна кромка здійснює перехідне різання (від торцевого до поперечного), енергоємність якого є нижчою. Другий зачисний зубець $3WZ$ довершує формування пропилу, зрізаючи стружку не зрізану першим зачисним зубцем.

Оскільки для порівняння використали дві комбінації зубців зубчастого вінця FZ/WZ і $FZ/2WZ$, то необхідно обґрунтувати раціональну кількість і черговість прорізних і зачисних зубців.

Кількість прорізних зубців для профілю FZ/WZ становитиме

$$z_n = z / 2, \quad (2.1)$$

де z – загальна кількість зубців пилки, шт. Відповідно для даного профілю співвідношення прорізних до зачисних зубців $z_n / z_3 = 18/18$.

Комбінація зубчастого вінця профілю $FZ/2WZ$ складається із трьох зубців, що формують пропили, тому кількість прорізних зубців рівна

$$z_n = z / 3, \quad (2.2)$$

де z – загальна кількість зубців пилки, шт.

Загальна кількість прорізних зубців становить $z_n = 12$. Відповідно, кількість зачисних зубців пилки буде рівна

$$z_3 = z - z_n, \quad (2.3)$$

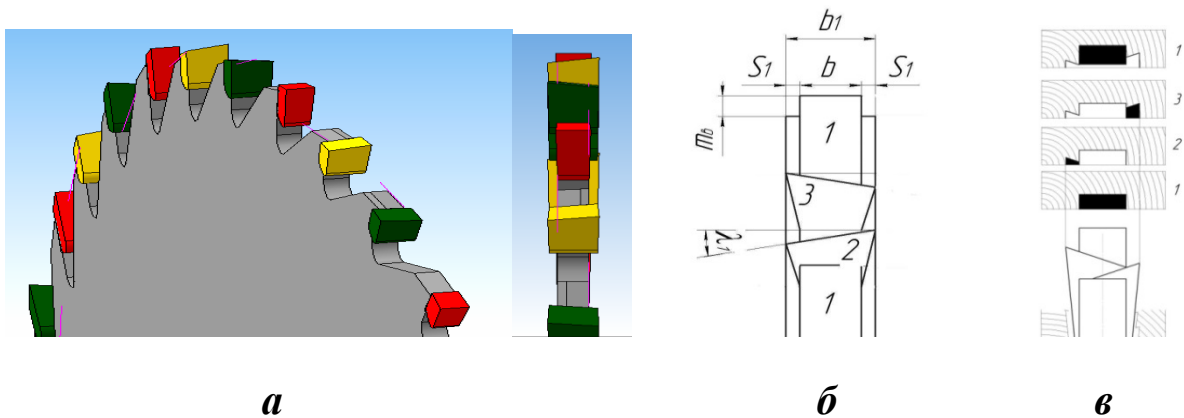
де z – загальна кількість зубців пилки, шт.; z_n – загальна кількість прорізних зубців пилки, шт.

Співвідношення кількості прорізних до зачисних зубців становить $z_n / z_3 = 12/24$. Приймавши до уваги, що основні зусилля припадають на прорізний зубець, і провівши розрахунок потужності на різання для 36, 18 і 12 зубців, за однакових умов ($D=315$ мм, $H=40$ мм, $V_s = 25$ м/хв, $B=3,4$ мм, $n=3000$ хв⁻¹) отримаємо: для 36 зубців $N_p = 3,2$ кВт; для 18 – 2,4 кВт; для 12 – 2,0 кВт.

Відповідно раціональною комбінацією зубців, за умови забезпечення високої точності і мінімального енергоспоживання є профіль $FZ/2WZ$ із співвідношенням зубців $z_n/z_3=12/24$. Дане співвідношення приймаємо постійним для подальших досліджень.

2.1.2 Пилка із комбінованим зубчастим вінцем $FZ/ 2WZ$

Об'єктом дослідження є кругла пилка з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/ 2WZ$ для поздовжнього розпилювання деревини [23]. Спосіб комбінування зубців із твердосплавними пластинами різної форми та розміру (рис.2.2 *a, б*), забезпечує розділення в часі навантаження на оброблюваний матеріал від сил різання і полягає в умовному розділенні зубців на *прорізні 1* із прямим загостренням по задній грані (FZ), що виступають над загальним колом різання, і *зачисні 2, 3*, які мають ліво і правостороннє косо загострення по задній грані зубця (WZ).



a – 3D модель зубчастого вінця пилки; *б* – конструкційні параметри зубців *в* – схема формування пропилу

Рисунок 2.2 – Конструкція комбінованого зубчастого вінця пилки $FZ/ 2WZ$

Вплив конструкційних параметрів пилки з комбінуванням зубців $FZ/ 2WZ$ на точність поздовжнього пиляння деревини пояснюється особливостями кінематики процесу різання [23]. Формування пропилу пилкою $FZ/ 2WZ$ поділяється на два етапи. Спочатку прорізний зубець

1FZ зрізає середню частину стружки, утворюючи серединний паз в дні пропилу, який утримує пилку від бокового зміщення. Наступні два зачисних зубці *2WZ* і *3WZ* послідовно формують ліву і праву частини пропилу, розширюючи утворений паз до ширини, що відповідає ширині пропилу.

Отже, об'єктом подальших досліджень є кругла пилка з комбінованим зубчастим вінцем *FZ/ 2WZ* для поздовжнього розпилювання деревини.

2.2 Досліджування робочої жорсткості пилки методом кінцевих елементів

2.2.1 Методика досліджування 3D моделі пилки *FZ/ 2WZ*

Сутність твердотільного моделювання. Твердотільне моделювання полягає у виконанні досліджень на ЕОМ із застосуванням методу кінцевих елементів (МСЕ) над віртуальною комп'ютерною моделлю, у якій відтворені основні ознаки реального об'єкта дослідження.

Віртуальну модель створюють у вигляді тривимірного тіла за допомогою систем автоматизованого проектування (САПР або CAD). Прикладами такого програмного забезпечення є: Компас–3D, AutoCAD, SolidWorks. Дослідження МСЕ виконують за допомогою систем міцнісного кінцево-елементного аналізу. Такі системи можуть бути у вигляді додаткових компонентів деяких САПР (окремі версії Компас–3D, SolidWorks, AutoCAD) [41–44].

Твердотільне моделювання об'єкту та його дослідження проводять у такій послідовності: створюють тривимірне тіло з геометричними розмірами, які відповідають розмірам реального об'єкта дослідження; задають матеріал, з якого виготовлене тіло; задають умови закріплення моделі; задають силові фактори, які діють

на модель; розбивають модель на скінченні елементи (створюють скінченно-елементну сітку); проводять розрахунок за допомогою методу скінченних елементів (у автоматичному режимі); виконують аналіз результатів.

Твердотільне моделювання дає можливість визначити: величину деформацій моделі, напруження у кожній точці моделі, розподіл температури тощо.

Метод кінцевих елементів (МСЕ). МСЕ по своїй суті зводиться до апроксимації неперервного середовища об'єкта дослідження з нескінченною кількістю елементів, котрі мають кінцеве число ступенів вільності [41-44]. Розглянемо основні етапи кінцево-елементної реалізації для об'єкта у вигляді круглої пилки. Насамперед здійснюється дискретизація об'ємів тіл на елементарні області – тетраедри з гранями, котрі апроксимуються функціями першого або другого порядку. Такими ж функціями апроксимуються переміщення в межах кожного елемента. У вершинах елементів обчислюються (або задаються) переміщення і сили. У результаті прикладання кінематичних і статичних граничних умов (переміщення і сили) віртуальна модель тіла деформується. Для кожного елемента визначається матриця жорсткості. Добуток матриці жорсткості на стовпець переміщень у вузлах дає результат – зусилля у вузлах. Для розрахунку компонентів матриць жорсткості входять характеристики матеріалу – модулі пружності і коефіцієнти Пуассона. Матриці жорсткості елементів об'єднуються в глобальну матрицю жорсткості $[K]$. Стовпці переміщень u, v, w у вузлах 1, 2, ..., i , об'єднуються в загальний стовпець переміщень $[\Delta]$:

$$[\Delta] = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_k, v_k, w_k, \dots]^T. \quad (2.4)$$

Сили в напрямку осей x, y, z окремих елементів в сумі утворюють глобальний стовпець сил $[p]$:

$$[p] = [p_{1x}, p_{1z}, p_{1z}, p_{2x}, p_{2z}, p_{2z}, \dots, p_{kx}, p_{kz}, p_{kz}, \dots]^T. \quad (2.5)$$

У результаті формується система лінійних рівнянь із невідомими переміщеннями:

$$[K] \cdot [p] = [\Delta] \quad (2.6)$$

Для кожного елемента на основі визначених переміщень розраховують деформації. На основі деформацій розраховують напруження в елементах. Сучасне програмне забезпечення для твердотільного моделювання виконує всі перераховані вище етапи автоматично.

Моделювання круглої пилки. Жорсткість пилки свідчить про здатність опиратися дії бокової складової сили різання і чисельно є величиною відхилення зубців пилки у боковому напрямку під дією бокової сили.

На жорсткість круглих пилок впливає низка чинників; основними з яких є: діаметр і товщина пилки, діаметр фланця, властивості матеріалу пилки, спосіб створення напруженого стану, форма і розміри зубців, кількість, форма і розміри прорізів. Аналітичні способи розрахунку жорсткості круглих пилок не забезпечують можливості враховувати вплив форми і розмірів зубців, а також кількості, форми та розмірів прорізів у диску пилки. Для того, щоб врахувати зазначені чинники, жорсткість пилок можна досліджувати за допомогою МСЕ. Для створення тривимірних моделей пилок і виконання скінченно-елементного моделювання застосовано середовище SolidWorks [42].

Розміри сітки скінченних елементів прийнято відповідно до рекомендацій, наведених у [45]: розмір у цілому 5,0 мм, допустима межа 0,25 мм.

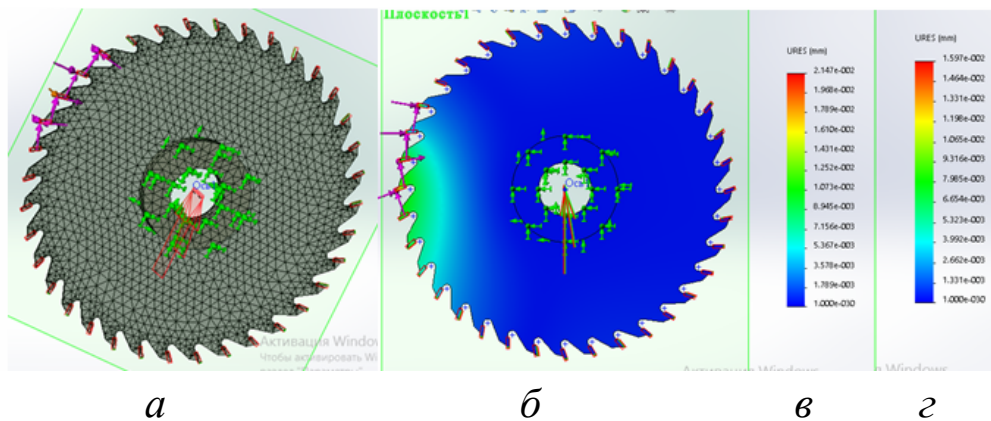
Дослідження виконували у такій послідовності:

- створили тривимірну модель пилки у середовищі Solidworks (рис. 2.3), задали матеріал – гарячекатана листовая сталь 75 Cr1 (DIN EN 10029);

- задавали закріплення пилки у вигляді жорсткого закріплення по діаметру 100 мм (відповідно до розміру фланця на верстаті);

- задавали складові сили різання на головних різальних крайках зубців, що одночасно беруть участь у різанні – дотичну та нормальну, а також бокову силу на вершині зубця, що знімає найтовстішу стружку;

- створювали скінченно-елементну сітку і виконували розрахунок. Визначали величину деформування Δx у боковому напрямку вершини зубця, до якого прикладена бокова сила.



a – розбиття на моделі кінцево-елементної сітки, *б* – прикладання складових сили різання до зубців пилки, *в*, *г* – результати відхилення пилки за повного і часткового навантаження

Рисунок 2.3 – Зображення кінцево-елементної 3D- моделі круглої пилки у середовищі SolidWorks під час визначення її робочої жорсткості

Кількість зубців, котрі одночасно приймають участь у різанні, і величини сил різання на цих зубцях визначено за умови здійснення поздовжнього пиляння з висотою пропилу 60 мм. Встановлено, що за такої висоти пропилу одночасно беруть участь у різанні чотири зубці пилки «z=36».

Жорсткість пилки визначали за формулою

$$j_n = \frac{P_x}{\Delta x}; \quad (2.7)$$

де P_x – сила прикладена до пилки, Н; Δx – величина відхилення пилки, мм.

Під час дослідження прикладали до зубців пилки дотичну складову сили різання, яка є головною. Величину дотичної сили різання визначають за встановленою потужністю двигуна механізму

різання [46]:

$$P_z = \frac{1000N \cdot \eta}{v}, \quad (2.8)$$

де N – потужність двигуна механізму різання, кВт; η – коефіцієнт корисної дії механізму різання (прийнято значення $\eta = 0,88$); v – швидкість різання, м/с; (на круглопилкових верстатах для поздовжнього розпилювання деревини $v = 50$ м/с).

2.2.2 Встановлення залежностей робочої жорсткості пилки FZ/2WZ від конструкційних параметрів

За розробленою методикою (див. пункт 2.2.1), було проведено дослідження за допомогою 3D-моделювання у середовищі Solid Works методом кінцевих елементів залежності робочої жорсткості пилки FZ/2WZ від величини виступу прорізного зубця. Дослідження виконувались за розробленим математичним планом з двома змінними чинниками [56].

Оброблення результатів досліджень виконано за допомогою застосовної програми GrafOrt [47] та отримано адекватне рівняння регресії залежності робочої жорсткості пилки від змінних чинників в кодових значеннях, що має вигляд:

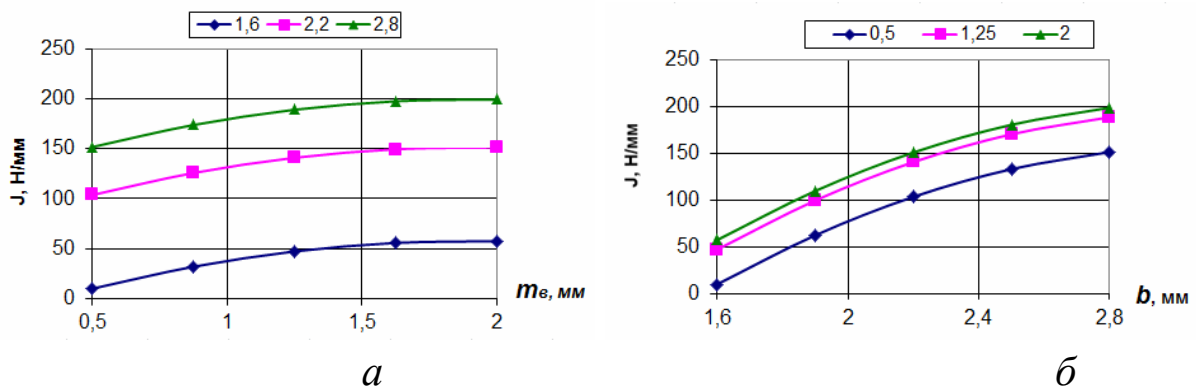
$$J = 141,07 + 23,78X_1 + 70,94X_2 - 13,56X_1^2 - 22,88X_2^2. \quad (2.9)$$

Аналізуючи рівняння (2.9), слід відмітити наступне: вільний член 141,07 - це значення робочої жорсткості пилки за умови, коли значення двох чинників відповідають середньому рівню; збільшення виступу зубця та його товщини підвищує жорсткість пилки, тобто існує пряма залежність між чинниками впливу і параметром оцінки; товщина зубця має майже в три рази більший вплив на жорсткість пилки ніж висота виступу зубця; наявність членів із квадратами підтверджує параболічну залежність між змінними чинниками і жорсткістю пилки.

Рівняння регресії в натуральних значеннях чинників має вигляд:

$$J = -503,98 + 91,95m_g + 397,91b - 24,10m_g^2 - 63,56b^2. \quad (2.10)$$

На основі рівняння (2.10) побудовано графічні залежності (рис.2.4 а, б) робочої жорсткості пилки від величини виступу прорізного зубця та товщини зубця, наглядність яких дають змогу провести аналіз результатів дослідження.



а – залежність робочої жорсткості пилки від виступу прорізного зубця; б – залежність робочої жорсткості пилки від товщини зубця

Рисунок 2.4 – Результати дослідження робочої жорсткості пилки

Рациональним діапазоном величини виступу прорізного зубця є 1,0-1,5 мм, що відповідає найбільшому зростанню робочої жорсткості пилки, після якого робоча жорсткість стабілізується. Обґрунтування виступу $m_g = 1,0$ мм полягає в тому, що за такого виступу формується достатньої величини паз у дні пропилу, який забезпечує вібростійкість пилки, а також запобігає зміщенню зубців пилки в осьовому напрямі. Для забезпечення необхідної робочої жорсткості пилки ($J \geq 150$ Н/мм) [7] визначено оптимальну величину товщини диска пилки (2,4 мм), що дозволяє зменшити загальну ширину пропилу на 16%. Максимального корисного виходу пилопродукції можна досягнути збільшивши величину виступу прорізного зубця до 1,5 мм, та використовуючи круглу пилку товщиною 2,0 мм, що

забезпечує робочу жорсткість 120 Н/мм, та мінімальну ширину пропилу 3,0 мм.

На основі виконаних досліджень встановлено, що раціональна величина виступу прорізного зубця для товщини пилки 2,4 мм, яка забезпечує необхідну робочу жорсткість пилки, рівна 1,0 мм.

2.3 Встановлювання кінематичних залежностей під час пиляння пилкою з комбінованим зубчастим вінцем

2.3.1 Визначення кута контакту для прорізних та зачисних зубців пилки

Кінематика процесу поздовжнього розпилювання пиломатеріалів у вигляді дощок на верстатах позиційного типу організована так, що рухи різання і подавання здійснюють пилками (рис. 2.5), а заготовка є нерухомою. Кругла пилка обертається і її вісь обертання переміщується поступально, здійснюючи рух подавання. Під час переміщування пилкового супорта вперед процес поздовжнього пиляння здійснюється із зустрічним подаванням, а під час зворотного ходу – з попутним.

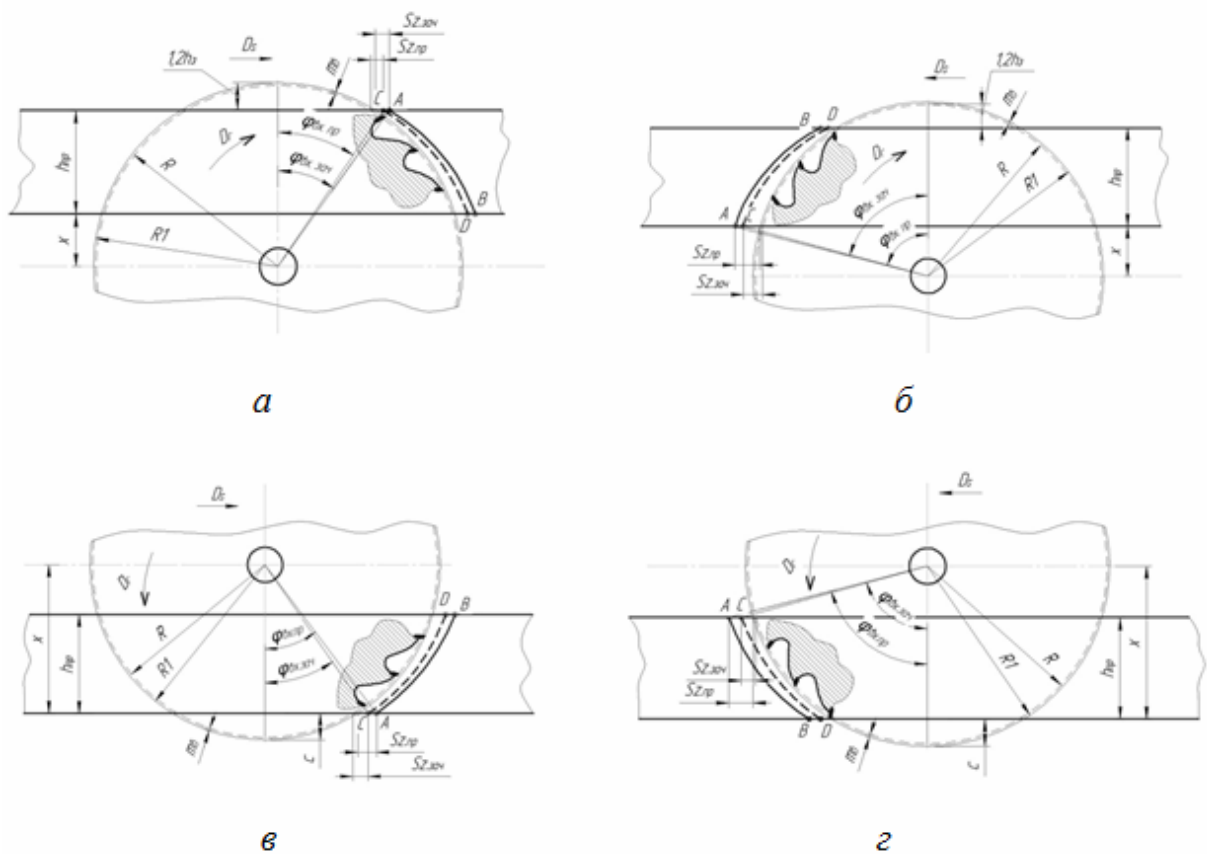
За схемами різання встановлено залежності для визначання кутів входу та виходу прорізних та зачисних зубців з пропилу (табл. 2.1). За наявності кінематичних кутів входу та виходу зубців із пропилу довжина дуги контакту під час поздовжнього пиляння рівна

$$l_k = (2\pi R / 360) \cdot \varphi_k, \quad (2.11)$$

де φ_k – кут контакту зубця із заготовкою, град.

Кут контакту під час поздовжнього пиляння із зустрічним подаванням визначали із залежності

$$\varphi_k = \varphi_{вих} - \varphi_{вх}, \quad (2.12)$$



a, в – із зустрічним подавання; *б, г* – із попутним подавання

Рисунок 2.5 – Схеми різання круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем

де $\varphi_{вих}$ – кінематичний кут виходу зубця із заготовки, град.;

$\varphi_{вх}$ – кінематичний кут входу зубця в заготовку, град.

Користуючись залежностями із табл. 2.1, можна визначити довжину дуги контакту для прорізного і зачисного зубців під час пиляння із зустрічним та попутним подаванням:

$$l_{к(1)}^{зус.} = (2\pi(R + m_{\epsilon}) / 360) \varphi_{вх} ; \quad l_{к(2)}^{зус.} = (2\pi R / 360) \varphi_{вх} \quad (2.13)$$

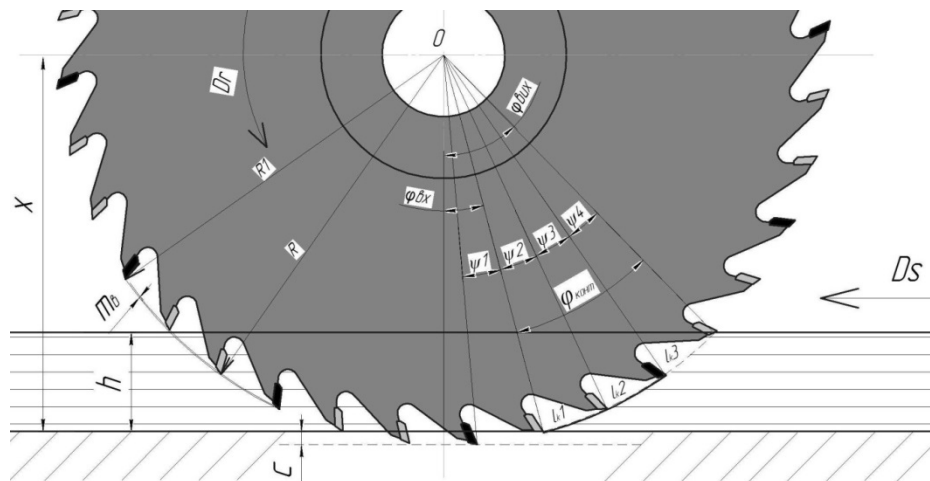
$$l_{к(1)}^{non.} = (2\pi(R + m_{\epsilon}) / 360) \varphi_{вих} ; \quad l_{к(2)}^{non.} = (2\pi R / 360) \varphi_{вих} \quad (2.14)$$

Таблиця 2.1 – Залежності кутів φ_{ex} та $\varphi_{вих}$ зубців пилки під час поздовжнього пиляння пилкою із комбінованим зубчастим вінцем

Розташування пилки відносно заготовки	Вид подавання			
	зустрічне		попутне	
	φ_{ex}	$\varphi_{вих}$	φ_{ex}	$\varphi_{вих}$
Верхнє (прорізний зубець)	$\arccos \frac{x}{R + m_g}$	$\arccos \frac{x - h}{R + m_g}$	$\arccos \frac{x - h}{R + m_g}$	$\arccos \frac{x}{R + m_g}$
Верхнє (зачисний зубець)	$\arccos \frac{x}{R}$	$\arccos \frac{x - h}{R}$	$\arccos \frac{x}{R}$	$\arccos \frac{x - h}{R}$
Нижнє (прорізний зубець)	$\arccos \frac{x + h}{R + m_g}$	$\arccos \frac{x}{R + m_g}$	$\arccos \frac{x}{R + m_g}$	$\arccos \frac{x + h}{R + m_g}$
Нижнє (зачисний зубець)	$\arccos \frac{x + h}{R}$	$\arccos \frac{x}{R}$	$\arccos \frac{x}{R}$	$\arccos \frac{x + h}{R}$

де $l_{к(1)}^{зус.}$, $l_{к(1)}^{ноп.}$ – довжина дуги контакту прорізними зубцями під час зустрічного та попутного пиляння, мм.; $l_{к(2)}^{зус.}$, $l_{к(2)}^{ноп.}$ – довжина дуги контакту зачисними зубцями.

Якщо задатись висотою пропилу 40 мм, тоді загальна кількість зубців, що одночасно перебувають у пропилі, рівна трьом (рис. 2.6). Приймаємо, що перший та другий зубці є зачисними.



X – відстань від осі пилки до поверхні стола, мм; H – висота пропилу, мм; c – глибина прорізу під пилку, мм; m_e – величина виступу прорізного зубця, мм; R – радіус кола зачисних зубців, мм; Rl – радіус кола прорізних зубців, мм; $l_{k(1)}$ – довжина дуги контакту 1-ого зубця, мм; $l_{k(2)}$ та $l_{k(3)}$ – другого і третього зубця, мм; φ_{ex} – кут входу пили в заготовку, °; φ_{vix} – кут виходу пили із заготовки, °; $\psi 1$, $\psi 2$, $\psi 3$, $\psi 4$ – кутовий крок зубця пилки, °; φ_k – кут контакту леза зубців з деревиною, °; D_r – рух обертання пилки, рад; D_s – рух подавання заготовки, м/хв.

Рисунок 2.6 – Кінематика процесу пиляння круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем

Для визначення товщини стружки, яка зрізується кожним зубцем необхідно визначити кут контакту (φ_k) леза кожного зубця із деревиною. Відповідно, кути контакту прорізних і зачисних зубців рівні:

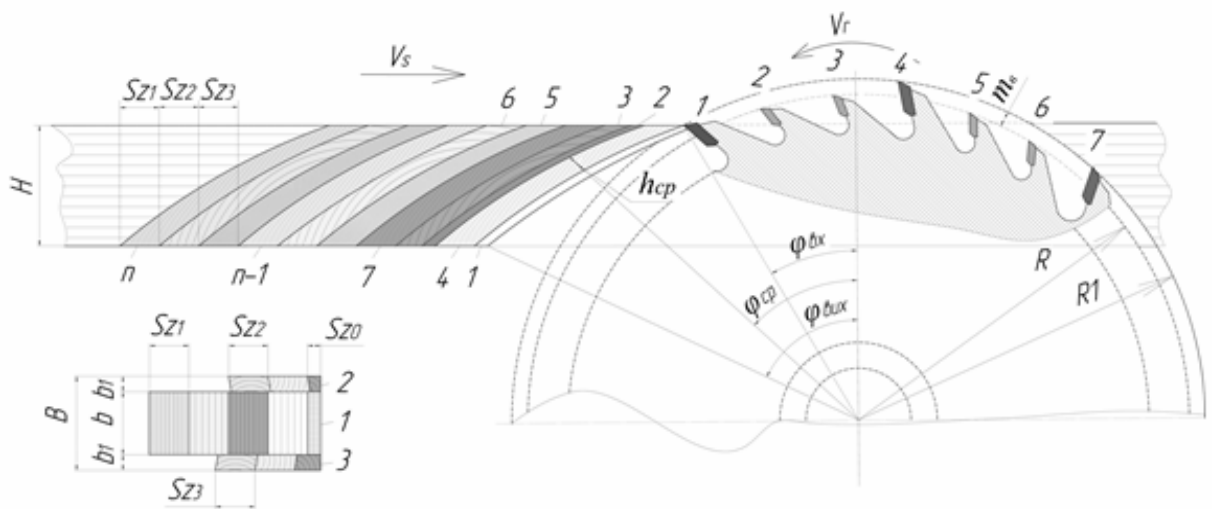
$$\text{прорізного зубця:} \quad \varphi_{k(1)} = \varphi_{vix(1)} - \varphi_{ex(1)}, \quad (2.15)$$

$$\text{зачисних зубців –} \quad \varphi_{k(2)} = \varphi_{vix(2)} - \varphi_{ex(2)}, \quad (2.16)$$

де φ_{ex} і φ_{vix} – відповідно кути входу і виходу зубців пили в заготовці, град.

2.3.2 Визначення товщини стружки для прорізних та зачисних зубців пилки Fz/2Wz

Однією із особливостей пиляння пилкою з комбінованим зубчастим вінцем є те, що чергування прорізних через два зачисних зубці (рис. 2.7), змінює величину подачі на кожний зубець. Відповідно на прорізний і зачисні зубці припадає потрійна подача.



1, 4, 7 – прорізні зубці; 2, 3, 5, 6 – зачисні зубці

Рисунок 2.7 – Схеми стружкоутворення та формування пропилу під час різання пилкою FZ/2WZ

Оскільки на кожний прорізний і зачисний зубець припадає потрійна подача, відповідно $S_{z1} = S_{z2,3} = 3S_{z0}$, тоді

$$S_{z(1,2,3)} = 3S_{z(0)}, \quad (2.17)$$

де $S_{z(1)}$ – подача на прорізний зубець пилки, мм.; $S_{z(2,3)}$ – подача на зачисний зубець пилки, мм.; $S_{z(0)} = S_z$ – загальна подача на один зубець пилки, мм.

Середня товщина стружки, що зрізується зубцями круглої пилки FZ/2WZ знаходиться за залежністю

$$h_{cm} = S_z \cdot \sin \varphi_{сер} \quad (2.18)$$

Відповідно, середня товщина стружки під час процесу пиляння

пилкою з комбінованими зубцями матиме вигляд:

для прорізного зубця

$$h_{(1)} = 3S_z \cdot \sin \varphi_{cp(1)}, \quad (2.19)$$

для зачисного зубця

$$h_{(2)} = 3S_z \cdot \sin \varphi_{cp(2)}, \quad (2.20)$$

де S_z – подача на зубець, мм; $\varphi_{cp(1)}$ – середній кут прорізного зубця, °

$\varphi_{cp(2)}$ – середній кут зачисного зубця, °.

Середній кут контакту зубців із деревиною для конструкції пилки $FZ/2WZ$ визначається із залежності:

$$\varphi_{cp} = \frac{\varphi_k}{2}, \quad (2.21)$$

Підставивши значення φ_k для прорізного (2.19) або зачисного (2.20) зубців, отримаємо середню товщину стружки для прорізного зубця

$$h_{(1)} = 3S_z \cdot \sin \varphi_{cp(1)} = 3S_z \cdot \sin \frac{\varphi_{k(1)}}{2}, \quad (2.22)$$

де $\varphi_{k(1)}$ – кут контакту прорізного зубця пилки, °.

Середня товщина стружки для зачисного зубця рівна

$$h_{(2)} = 3S_z \cdot \sin \varphi_{cp(2)} = 3S_z \cdot \sin \frac{\varphi_{k(2)}}{2}, \quad (2.23)$$

де $\varphi_{k(2)}$ – кут контакту зачисного зубця пилки, °.

Різниця між кутом контакту прорізних і зачисних зубців є незначною, тому можна прийняти, що середні кути є рівними для двох видів зубців. Оскільки кути контакту прорізних і зачисних зубців однакові, то відповідно значення середньої товщини стружки зубців також рівні, тобто

$$h_{(1,2,3)} = 3S_z \cdot \sin \varphi_{cp}, \quad (2.24)$$

де S_z – подача на зубець, мм; φ_{cp} – середній кут зубців, °.

2.3.3 Вплив величини подачі на зубець на формування пропилу

Для виступу прорізного зубця $m_g = 1,0$ мм, необхідно розрахувати максимально допустимі подачу на зубець для пилки з комбінованим зубчастим вінцем (рис. 2.8).

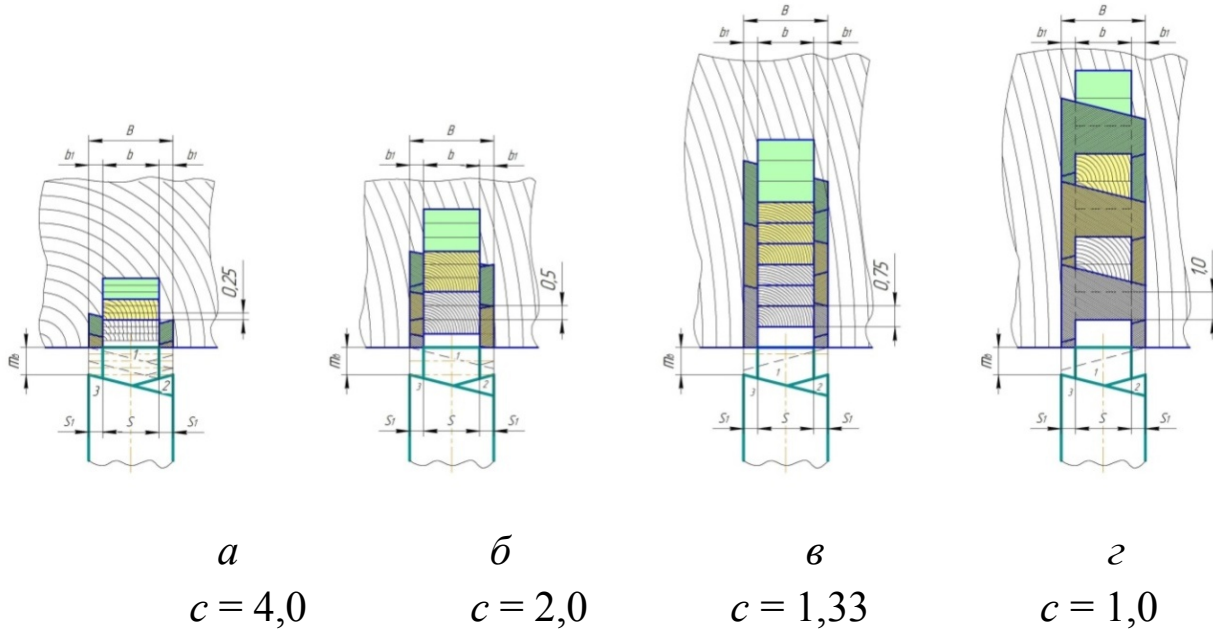


Рисунок 2.8 – Вплив швидкості подавання на формування пропилу пилкою Fz/2Wz з параметрами: $D=315$ мм; $m_g=1$ мм; $S=2,4$ мм; $B=3,4$ мм

Подача на кожний із зубців для пилки з комбінованим зубчастим вінцем є не однакою, тому для розрахунків приймаємо швидкість подавання, оскільки вона є сталою для певного режиму пиляння і визначається за формулою

$$V_s = \frac{S_z \cdot z \cdot n}{1000}, \text{ м/хв} \quad (2.25)$$

Із швидкості подавання визначаємо загальну подачу на зубець, яка рівна:

$$S_{z(0)} = \frac{V_s \cdot 1000}{z \cdot n}, \text{ мм} \quad (2.26)$$

де z – загальна кількість зубців пилки, шт.; n – частота обертання пилкового валу, хв^{-1} .

Оскільки зубці пилки з профілем $FZ/2WZ$, чергуються через три, відповідно подача на прорізні і зачисні зубці буде визначатись із залежності

$$S_{z(1,2,3)} = 3S_{z(0)} = \frac{3V_s \cdot 1000}{z \cdot n}, \text{ мм} \quad (2.27)$$

де V_s – швидкість подачі, м/хв. ; z – загальна кількість зубців пилки, шт.; n – частота обертання пилкового валу, хв^{-1} .

Для забезпечення рівномірного зрізування площ стружок лівим і правим зачисними зубцями (див. рис. 2.7), необхідно дотримуватись певного співвідношення виступу прорізного зубця і подачі на зубець пилки, яке прийнято називати **коефіцієнтом форми пропилу**, c :

$$c = \frac{m_g}{S_z}, \quad (2.28)$$

де m_g – виступ прорізного зубця пилки, мм; S_z – подача на зубець, мм.

Даний коефіцієнт є основним критерієм визначення діапазону раціональних швидкостей подавання для пилки $FZ/2WZ$. Коефіцієнт форми пропилу враховує співвідношення величини виступу прорізного зубця до загальної подачі на зубець і дає змогу визначати діапазон, в якому процес різання даною пилкою буде ефективним.

Для виступу прорізного зубця в 1,0 мм, коефіцієнт c повинен бути у 4 рази більшим за мінімальну подачу. Відповідно, умова для визначання раціональних швидкостей подавання залежно від виступу має вигляд:

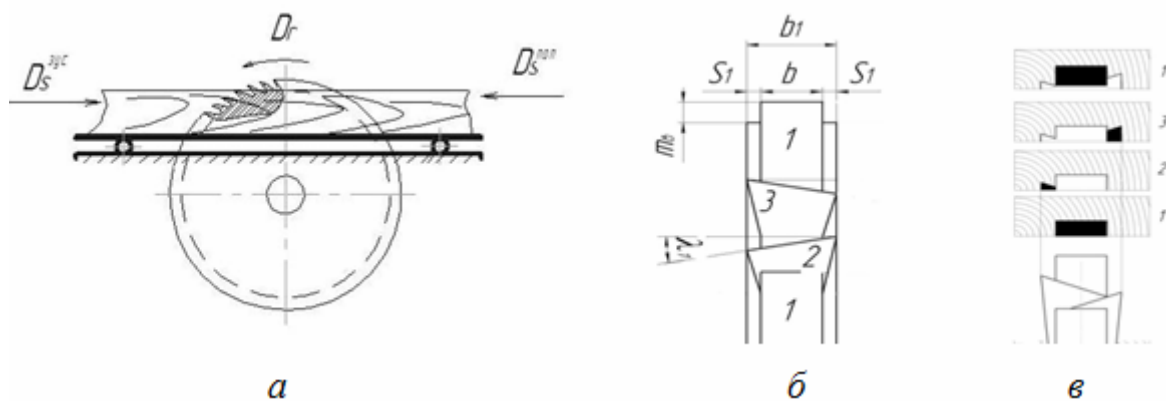
$$c = \frac{m_g}{S_{z(0)}} \geq 4, \quad (2.29)$$

де m_g – величина виступу прорізного зубця, мм.; $S_{z(0)}$ – загальна подача на один зубець пилки, мм.

2.4 Математичне моделювання точності поздовжнього пиляння пилами з комбінованим зубчастим вінцем

2.4.1 Початкові засади моделювання

Визначено принципові конструкційні підходи для підвищення точності пиляння на круглопилкових верстатах позиційного типу, а саме: конструкція верстата базується на способі подавання заготовок кареткою (рис.2.9, *a*), конструкція пилки – на розробленні комбінованого зубчастого вінця із зубців з твердосплавними пластинами *FZ* і *WZ* (рис.2.9, *б*, *в*).



- a* – принципова схема верстата з подавальною кареткою ;
- б* – конструкція зубчастого вінця пилки *Fz/2Wz*;
- в* – схема формування пропилу пилкою *Fz/2Wz*

Рисунок 2.9 – Принципові схеми нових конструкційних рішень верстата та пилки

Згідно розробленої автором [7] (підрозділ 2.2) методики, всі похибки оброблення на круглопилковому верстаті позиційного типу, у тому числі й систематичні, прийнято розглядати як випадкові. Тоді, за нормального їх розподілу сумарна похибка розпилювання дощок на круглопилкових верстатах позиційного типу за міжремонтний період має вигляд:

$$\sum \omega = \sqrt{\omega_{z.m.v.}^2 + \omega_{ж.в.}^2 + \omega_{z.m.i.}^2 + \omega_{ж.i.}^2 + \omega_3^2 + \omega_{p.n.}^2 + \omega_{вим}^2}, \quad (2.30)$$

На підставі наведеного рівняння (2.30) виникає потреба у складанні загальної математичної моделі точності пиляння на круглопилковому верстаті позиційного типу та виведення залежностей для визначення всіх складових моделі, що дасть можливість аналізувати вплив кожного із чинників на точність пиляння та розробляти практичні способи підвищення точності пиляння.

2.4.2 Розроблення математичної моделі точності пиляння на круглопилкових верстатах позиційного типу

2.4.2.1 Систематичні похибки

Похибку від геометричної точності верстата характеризують типові норми для кожного з них. Основою для визначання типових норм геометричної точності круглопилкових верстатів є загальні норми геометричної точності деревообробних верстатів, розроблені проф. Ф.М. Манжосом [20]. Проаналізувавши їх та конструкційні особливості круглопилкових верстатів, визначено показники геометричних похибок круглопилкових верстатів із рухомим пилковим супортом та нормативні значення для трьох класів точності верстатів [7]. Для визначення числових значень похибок оброблення від впливу геометричних похибок елементів верстату необхідно встановити залежності зв'язку між ними та знайти сумарну похибку оброблення, $\Sigma \Delta l_c$.

Із загальної теорії точності механізмів відомо, що кінематична ланка верстата відіграє вирішальну роль у формуванні деталей. Проте в деревообробних верстатах точність оброблення не залежить від внутрішньої кінематики верстатів [8], а формоутворюючими чинниками тут найчастіше є шпинделі, столи, супорти і напрямники.

Для круглопилкових верстатів позиційного типу основним вузлом, який безпосередньо впливає на величину похибок

розпилювання є пилковий вузол, тому достатньо буде визначення похибки від жорсткості пилкового вала (рис. 2.10). Вплив жорсткості пилкового вала на точність оброблення можна виразити залежністю:

$$\omega_{ж.в.} = \frac{P_6}{j_6}, \quad (2.31)$$

де P_6 – вертикальна складова сила різання, що діє на пилковий вал верстата, Н; j_6 – жорсткість пилкового вала верстата, Н/мм.

Вертикальну складову сили різання, що діє на пилковий вал верстата можна визначити із залежності

$$P_6 = P_z \cdot \cos \varphi_{різ} \pm P_y \cdot \sin \varphi_{різ}, \quad (2.32)$$

де P_z , P_y – дотична і нормальна складові сили різання, Н; $\varphi_{різ}$ – біжучий кут різання під час контакту зубців з деревиною, град; «-» і «+» – відповідно під час пиляння із зустрічним та попутним подаванням.

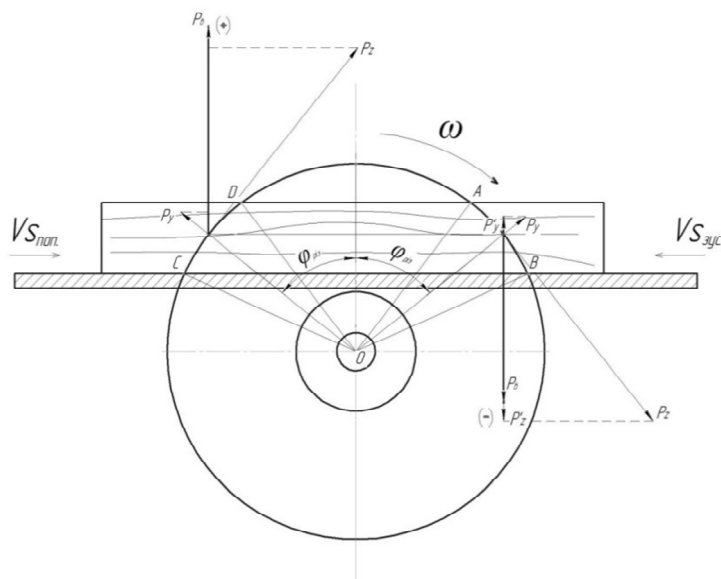


Рисунок 2.10 – Визначення вертикальної складової сили різання під час зустрічного і попутного пиляння

Для чистового оброблення деревини можна допустити похибку обробки від пружних деформацій верстата не більше $\omega_{ж.в.} = 0,03$ мм. Тому приймаємо цю величину за максимально допустиму деформацію верстата.

З метою забезпечення достатньої жорсткості пилкового вузла, необхідно щоб жорсткість пилкового валу була максимально високою, тому приймаємо її рівну допустимій

$$J_{\epsilon} = J_{\text{дон}}. \quad (2.33)$$

де $J_{\text{дон}}$ – допустима приведена жорсткість верстата, Н/мм.

За даними [7], допустима приведена жорсткість верстата $J_{\text{дон}}$ на один кВт встановленої потужності за швидкості різання 40-50 м/с становить 1000 Н/мм. Отже, величина деформації пилкового вала спричинена його жорсткістю набуде вигляду:

$$\omega_{\text{ж.в.}} = \frac{P_z \cdot \cos \varphi_{\text{різ}} \pm P_y \cdot \sin \varphi_{\text{різ}}}{J_{\epsilon}}, \quad (2.34)$$

де P_z , P_y – дотична і нормальна складові сили різання, Н; $\varphi_{\text{різ}}$ – біжучий кут різання під час контакту зубців з деревиною, град; J_{ϵ} – фактична (прийнята) жорсткість верстата, Н/мм.

Похибка, створена під час розмірного налагодження на верстаті для поздовжнього розпилювання деревини має дві складових: похибку позиціювання заготовки і похибку від переміщення розмірної лінійки

$$\omega_{\text{р.н.}} = \omega_{\text{поз.}} + \omega_{\text{пер.}}, \quad (2.35)$$

де $\omega_{\text{поз.}}$ – похибка позиціювання заготовки, мм; $\omega_{\text{пер.}}$ – похибка переміщення розмірної лінійки, мм. Похибка позиціювання заготовки на верстатах позиційного типу знаходиться в межах 0,1 мм [6, 58].

Похибка механізму розмірного налагодження становить

$$\omega_{\text{пер.}} = 0,2 \cdot C, \quad (2.36)$$

де C – ціна поділки шкали механізму розмірного налагодження. Ціна поділки шкали механізму розмірного налагодження становить 0,01 мм.

Підставивши вищенаведені числові значення, отримаємо допустиму величину похибки розмірного налагодження, яка становить $\omega_{\text{р.н.}} = 0,102$ мм.

Круглі пилки з твердосплавними пластинами спричиняють як постійні (геометрична точність пилки), так і змінні (жорсткість пилки)

систематичні похибки обробляння.

Точність виготовлення круглих пилок регламентується вимогами чинних стандартів [58]. На основі аналізу показників точності виготовлення круглих пилок встановлено, що на точність пиляння впливає торцеве биття зубців пилки. Для круглих пилок з твёрдосплавними пластинами цей показник не повинен перевищувати $[\omega_{z.m.}] \leq 0,12 \text{ мм}$ [58]. Похибка від робочої жорсткості пилки є змінною, в процесі обробляння сили різання змінюються залежно від щільності деревини, зміни режиму пиляння (висоти пропилу і швидкості подавання), тому дані чинники будуть враховані у моделі точності поздовжнього пиляння через залежність похибки обробляння від жорсткості інструмента, тобто

$$\omega_{ж.і} = \frac{P_x}{j_{роб.}}, \quad (2.37)$$

де P_x – бокова складова сили різання, Н; $j_{роб}$ – робоча жорсткість пилки, Н/мм.

Робочу жорсткість пилки визначають із залежності

$$j_{роб} = j_{поч} \left(1 - \frac{P_y}{P_{y.кр}} \right), \quad (2.38)$$

де $j_{поч}$ – початкова жорсткість пилки, Н/мм; P_y – нормальна складова сили різання, Н; $P_{y.кр}$ – критична нормальна складова сили різання, Н. За даними [7], для товщини полотна пилки $S = 2,5$ мм; $P_{y.кр} = 10,5$ кН.

Підставивши залежність (2.38) у (2.37), похибка обробляння від жорсткості інструмента буде рівна

$$\omega_{ж.і} = \frac{P_x}{j_{поч} \cdot (1 - (P_y / P_{y.кр}))} \quad (2.39)$$

де P_x – бокова складова сили різання, Н; $j_{поч}$ – початкова жорсткість пилки, Н/мм; P_y – нормальна складова сили різання, Н; $P_{y.кр}$ –

критична нормальна складова сили різання, H .

2.4.2.2 Випадкові похибки

Похибки створені заготовкою. Заготовкою для розпилювання на верстатах позиційного типу є дошка товщиною 20-100 мм [14] відповідно, висота пропилу є одним із основних змінних чинників, що впливає на точність пиляння.

Вплив висоти пропилу. Висота пропилу або товщина пиломатеріалу, що розпилюють H , змінює кінематичні кути зустрічі і впливає на енергозатрати, а також на сили і питому роботу різання, шорсткість обробленої поверхні. Під час поздовжнього пиляння деревини із збільшенням товщини матеріалу, що розпилюють й незмінної величини середнього кінематичного кута зустрічі, питома робота різання збільшується, шорсткість поверхні зростає, оскільки збільшується найбільша товщина зрізуваної стружки. Відповідно, висота пропилу H буде застосовуватись у подальших дослідженнях та враховуватиметься у загальній математичній моделі через сили різання.

Вплив породи деревини. Деревина – анізотропно-ортотропний матеріал волокнисто-шарової різноклітинної будови. Процес пиляння ускладнюється великою різноманітністю властивостей деревини різних порід, зміною механічних властивостей породи залежно від умов проростання, її структурних особливостей (крупношарова, дрібношарова, сучкувата і т.д.), розміщення в стовбурі, вологості, температурних умов (мерзла, пропарена, суха, волога).

Встановлено, що щільність деревини за річними шарами нерівномірна і змінюється за синусоїдальною залежністю [16]. Максимальна щільність деревини в пізній зоні річного шару, а мінімальна – в ранній. Характер зміни твердості деревини за річними шарами, схожий зміні щільності: чим щільніша деревина, тим більша її міцність, тому порода деревини, як один із основних чинників, через коефіцієнт породи k_n , буде враховуватись у математичній моделі точності пиляння через складові сили різання.

Вплив вологості і температури. Оскільки дошки це пиломатеріал (напівфабрикат), який в подальшому піддається

додатковому оброблянню з метою отримання заготовок, в основному для столярного та меблевого виробництва, відповідно перед розпилюванням їх здебільшого попередньо висушують до вологості 12-15%, а сам процес подальшого поздовжнього розпилювання здійснюється за температури навколишнього середовища 20-22°C, тому цей чинник приймаємо постійним.

2.4.2.3 Похибки вимірювання

Загальна похибка вимірювання розмірів пиломатеріалів не повинна перевищувати 20% згідно з ГОСТ 25338-91, тому похибку вимірювання визначають із залежності (3.11)

$$\omega_{\text{вим.}} = 0,2 \cdot \omega_{\text{поч.}} \quad (2.40)$$

де $\omega_{\text{поч.}}$ – початкова похибка обробляння, яка включає похибки від геометричної точності верстата та інструмента.

Початкову похибку обробляння від геометричної точності круглої пилки та верстата з рухомим пилковим супортом визначали за залежністю

$$\omega_{\text{поч}}^c = \sum \Delta l_c + \omega_{\text{г.м.і}}, \quad (2.41)$$

а верстата з подавальною кареткою – за залежністю

$$\omega_{\text{поч}}^k = \sum \Delta l_k + \omega_{\text{г.м.і}}, \quad (2.42)$$

де Δl_c – похибки від геометричної точності верстата із рухомим пилковим супортом, мм; Δl_k – похибки від геометричної точності верстата із подавальною кареткою, мм; $\omega_{\text{г.м.і}}$ – похибки від геометричної точності пилки, мм.

2.4.2.4 Складання моделі точності пиляння на верстатах позиційного типу

Врахувавши залежності (2.31) – (2.42), залежність для визначання сумарної похибки обробляння на круглопилковому верстаті позиційного типу матиме вигляд:

$$\sum \omega = \sqrt{0,0248 + (\sum \Delta_i)^2 + \left(\frac{P_z \cdot \cos \varphi_{cp} \pm P_y \cdot \sin \varphi_{cp}}{J_g} \right)^2 + \left(\frac{P_x}{j_n \cdot (1 - (P_y / P_{y.kp}))} \right)^2 + (\omega_{вим})^2}, \quad (2.43)$$

де 0,0248 – сумарне значення допустимої геометричної похибки пилки і похибки від розмірного налагодження, мм; P_z , P_y , P_x – відповідно дотична, нормальна і бокова складові сили різання, Н; $\sum \Delta_i$ – похибка від геометричної точності верстата; φ_{cp} – середній кут дуги різання, град; «+» і «-» – відповідно для пиляння із зустрічним і попутним подаванням; J_g – робоча жорсткість верстата, Н/мм; j_n – початкова жорсткість пилки, Н/мм; $P_{y.kp}$ – критична нормальна сили різання, Н; $\omega_{вим}$ – похибка вимірювання розмірів деталей, мм.

Отримана математична модель точності поздовжнього пиляння на круглопилкових верстатах позиційного типу дає змогу математично описати характер впливу основних чинників на точність пиляння.

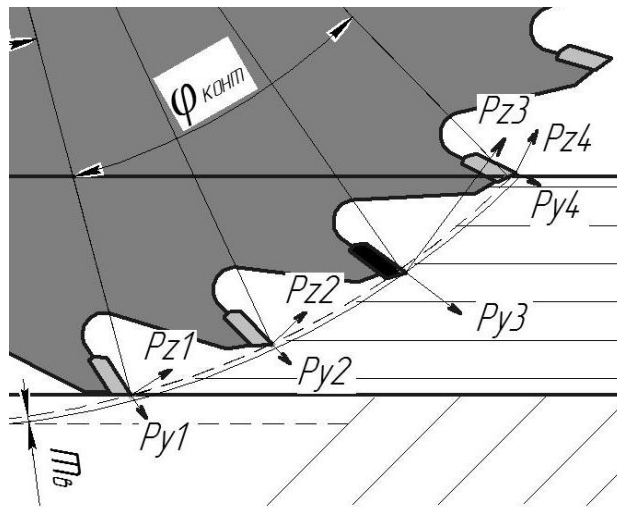
2.5 Залежності визначання складових сил та потужності різання пилкою з комбінованим зубчастим вінцем

2.5.1 Дотична складова сили різання

Дотичну складову сили різання [2] визначали із залежності, згідно схеми сил різання (рис. 2.11), які діють на прорізний і зачисні зубці

$$P_z = P_{num} \cdot F \quad (2.44)$$

де $P_{num.}$ – питома сила різання, Н/мм²; F – площа поперечного перерізу стружки, мм².



φ_k – кут контакту зубця із заготовкою; P_y – нормальна складова сили різання, Н; P_z – дотична складова сили різання, Н; m_v – величина виступу прорізного зубця, мм.

Рисунок 2.11– Схема сил, що діють на прорізний і зачисні зубці пилки

Питома сила різання під час поздовжнього пиляння, згідно даних [7], визначається залежністю

$$P_{num} = a_n a_w a_e \left(\frac{a_p p}{h_{cp}} + k + \frac{\alpha_\lambda \cdot H}{B} \right), \quad (2.45)$$

де a_n – поправковий множник на породу деревини; a_w – поправковий множник на вологість деревини; a_e – поправковий множник на вид подавання; (зустрічне –1,0; попутне –1,1); p – фіктивна сила різання по задній поверхні зубця, Н; k – дотичний тиск стружки на передню поверхню зубця, МПа; a_p – поправковий множник на затуплення лез зубців; H – висота пропилу, мм; B – ширина пропилу, мм; h_{cp} – середня товщина стружки, мм; α_λ (α_Δ) – коефіцієнт інтенсивності тертя, що рівний умовно питомому тиску стружки на стінки пропилу, Н/мм² [52] ($\alpha_\lambda \approx 0,72 \dots 0,75$ Н/мм²; $\alpha_\Delta = 0,59 \dots 0,69$ Н/мм²).

Для визначання дотичних і нормальних складових сили різання круглою пилкою із комбінованими зубцями, потрібно врахувати особливості такого виду поздовжнього пиляння у величинах: фіктивної сили різання по задній поверхні, дотичного тиску стружки на передню поверхню зубця пилки, а також поправкового множника на затуплювання інструмента [7].

Для визначення сил перехідного виду різання скористаємось принциповою схемою різання відносно волокон пилкою *FZ/2WZ* (рис. 2.12).

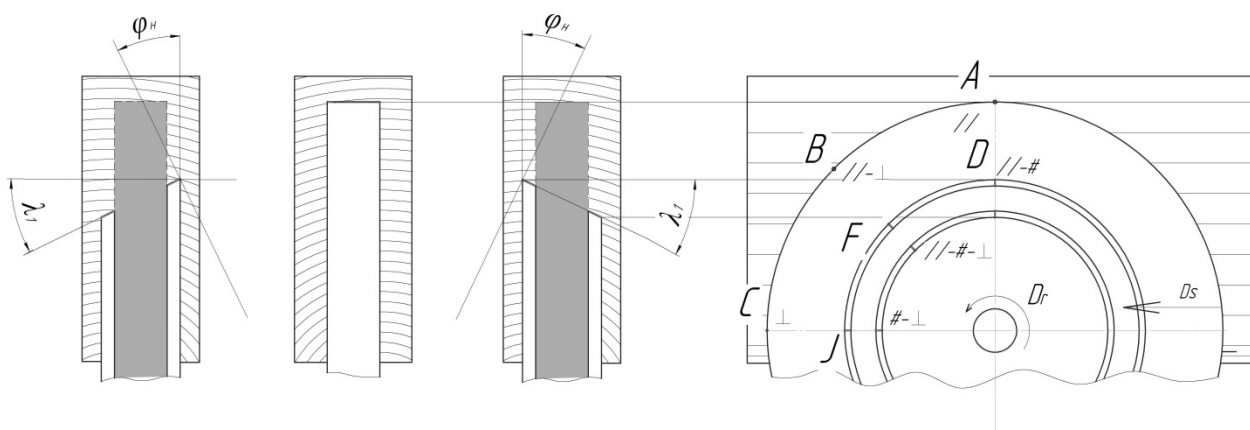


Рисунок 2.12 – Схема різання відносно волокон пилкою *FZ/2WZ*

Слід відмітити, що прорізний зубець, завдяки прямому загостренню по задній грані, здійснює поздовжнє різання у початковій точці під час входу зубця в деревину (*A*), до поперечного – у точці виходу зубця із деревини (*C*). В той же час, зачисний зубець, завдяки косому загостренню по задній грані зубця, здійснює поздовжньо-поперечне різання у початковій точці, під час входу зубця в деревину (*D*), і до торцево-поперечного різання у точці виходу зубця пилки із деревини (*J*). Тому для визначення сил і потужності різання необхідно знати значення фіктивної сили різання і дотичного тиску шару, що зрізається, на передню поверхню зубця пилки.

Для пилки з комбінованим зубчастим вінцем необхідно окремо визначати фіктивну силу та дотичний тиск для прорізного і для зачисного зубця, оскільки завдяки скосу λ_1 , зачисний

зубець здійснює поздовжньо-торцево-поперечне різання. Залежність для визначання фіктивної сили різання по задній поверхні для прорізного зубця приймали ту ж саму, що й для поздовжнього пиляння сталеву круглою пилкою, оскільки незалежно від виду пиляння умови процесу зрізування стружки є незмінними. Коефіцієнти рівняння наведені для пиляння сосни, вологістю 30%. Отже, фіктивну силу різання по задній поверхні прорізного зубця визначаємо за такою залежністю:

$$p_{(1)} = p_{\parallel-\perp} = 1,57 + 0,0359 \cdot \varphi_{сер} \quad (2.46)$$

Фіктивна сила різання по задній поверхні для зачисного зубця рівна

$$p_{(2)} = p_{\parallel-\#-\perp} = p_{\parallel-\perp} - (p_{\parallel-\perp} - p_{\parallel-\#}) \cdot \frac{\lambda_1}{90}, \quad (2.47)$$

де

$$p_{\parallel-\#} = 1,57 - 0,0065 \cdot \varphi_{сер} \quad (2.48)$$

Відповідно, загальна залежність для визначення фіктивної сили різання по задній поверхні для зачисного зубця набуде вигляду:

$$p_{(2)} = p_{\parallel-\#-\perp} = 1,57 + 0,0359 \cdot \varphi_{сер} - ((1,57 + 0,0359 \cdot \varphi_{сер}) - 1,57 - 0,0065 \cdot \varphi_{сер}) \cdot \frac{\lambda}{90} \quad (2.49)$$

Дотичний тиск стружки k на передню поверхню прорізного зубця [7] визначаємо залежністю

$$k_{(1)} = k_{\parallel-\perp} = (0,196 + 0,0039\varphi_{сер}) \cdot \delta + (0,069 + 0,0014\varphi_{сер}) \cdot (90 - \nu) - (5,4 + 0,158 \varphi_{сер}) \quad (2.50)$$

Залежність для визначення дотичного тиску зрізуваного шару на передню поверхню зачисного зубця набуде вигляду:

$$k_{(2)} = k_{\parallel-\#-\perp} = k_{\parallel-\perp} - (k_{\parallel-\perp} - k_{\parallel-\#}) \cdot \frac{\lambda_1}{90} \quad (2.51)$$

$$k_{\parallel-\#} = (0,196 + 0,00184\varphi_{сер}) \cdot \delta + [0,069 - (0,069 - B_{\#}) \cdot 0,011\varphi_{сер}] \cdot (90 - v) - (5,4 + 0,053 \varphi_{сер}), \quad (2.52)$$

де $B_{\#} = 0,059..0,069$ [7]. Слід звернути увагу, що при умові, якщо $V < 70$ м/с, замість V необхідно використовувати $(90 - V)$; де V – швидкість головного руху, м/с.

Підставивши залежності (2.50) та (2.52) у залежність (2.51), отримаємо загальне рівняння для визначення дотичного тиску зрізуваного шару на передню поверхню зачисного зубця, яке матиме вигляд:

$$k_{(2)} = k_{\parallel-\#-\perp} = (0,196 + 0,0039\varphi_{сер}) \cdot \delta + (0,069 + 0,0014\varphi_{сер}) \cdot (90 - v) - (5,4 + 0,158 \varphi_{сер}) - \{[(0,196 + 0,0039\varphi_{сер}) \cdot \delta + (0,069 + 0,0014\varphi_{сер}) \cdot (90 - v) - (5,4 + 0,158 \varphi_{сер})] - (0,196 + 0,00184\varphi_{сер}) \cdot \delta + [0,069 - (0,069 - B) \cdot 0,011\varphi_{сер}] \cdot (90 - v) - (5,4 + 0,053 \varphi_{сер})\} \cdot \frac{\lambda_1}{90} \quad (2.53)$$

Менше значення $B_{\#}$, якщо $\delta < 55^\circ$, більше – якщо $\delta > 55^\circ$. Для заданих умов коли $\delta = 70^\circ$, приймаємо $B_{\#} = 0,069$; де δ – кут різання, град.

Залежність для визначення поправкового множника на затуплення. Величина поправкового множника на затуплювання інструмента для поздовжнього пиляння круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем є меншою для прорізного зубця, ніж для зачисного завдяки тому, що прорізні зубці пилки проходять по меншій довжині дуги контакту за умови різної висоти пропилу.

Під час поздовжнього пиляння круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем, довжина дуги контакту у прорізних зубців є коротша, завдяки величині виступу m_e підвищується інтенсивність зношування прорізних зубців у порівнянні із зачисними, завдяки більшій площі стружки, що зрізується прорізним зубцем і яка складає (66%) від загальної. Загальна залежність коефіцієнта на затуплювання має вигляд:

$$a_p = 1 + \frac{\left(1 + 0,1 \frac{k}{p}\right) \cdot \Delta \rho}{\rho_0 + 50}, \quad (2.54)$$

де P – фіктивна сила різання по задній поверхні зубця, Н; k – дотичний тиск зрізаного шару на передню поверхню зубця, МПа; $\Delta \rho$ – приріст радіуса закруглення, мкм; ρ_0 – початковий радіус закруглення, мкм. Для круглих пилок радіус початкового затуплення ρ_0 становить 10 мкм.

Ступінь затуплювання лез зубців оцінюють величиною радіуса кривизни різальної кромки ρ , яка рівна сумі величини початкового радіуса закруглення ρ_0 та приросту цього радіуса $\Delta \rho$ і вимірюється в мкм. Відповідно в процесі монотонного зношення леза зубця, коли шорсткість робочої ділянки леза близька до шорсткості, яка забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя, радіус закруглення різальної кромки знаходять за такою залежністю:

$$\rho = \rho_0 + \gamma_{\Delta} \cdot L, \quad (2.55)$$

де ρ_0 – величина радіуса закруглення гострого зубця на початку монотонного зношення, мкм; γ_{Δ} – інтенсивність затуплення різальної кромки зубця на 1 м шляху в заготовці, мкм/м; L – шлях леза зубця в заготовці, м.

Ступінь затуплення лез круглої пилки із твердосплавними пластинками за даними [7] визначається із залежності:

$$\rho = 7,91 + 0,0004 L, \quad (2.56)$$

де L – довжина шляху різання одним різцем на довжині заготовки, м

$$L = l_k \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot T, \quad (2.57)$$

де T – чистий час на пиляння без втрат, хв.

$$L_{(1)} = l_{k(1)} \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot T, \quad (2.58)$$

$$L_{(2)} = l_{k(2)} \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot T, \quad (2.59)$$

Величину приросту затуплювання зубця визначали із залежності:

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 \quad (2.60)$$

де ρ_0 – величина радіуса закруглення гострого зубця, мкм; ρ – величина радіуса закруглення зубця, що пропрацював певний період часу, мкм.

У процесі розпилювання дощок круглими пилками із комбінованим зубчастим вінцем, ступінь затуплювання зубців необхідно визначати окремо для прорізних і, окремо для зачисних зубців, оскільки їхня взаємодія із деревиною є різною.

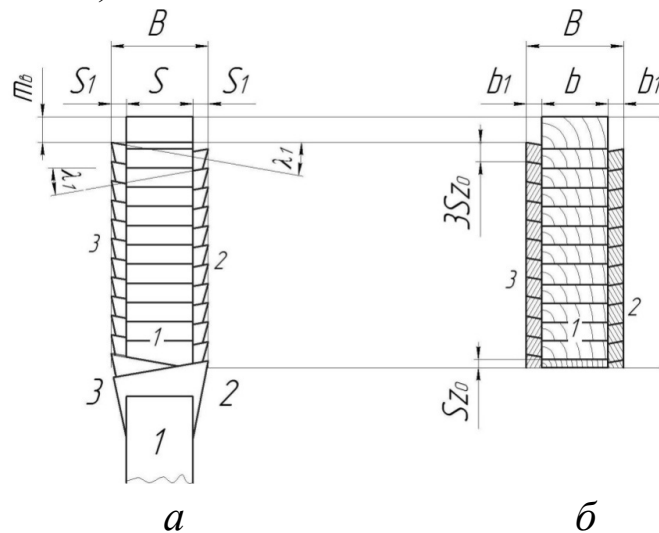
Аналіз результатів розрахунку показав, що ступінь затупленості зачисних зубців є більшою ніж прорізних, за рахунок більшого співвідношення фіктивної сили по задній поверхні зубця (p) та дотичного тиску стружки на передню поверхню зубця (k), а також завдяки більшій довжині дуги контакту зачисних зубців. Оскільки різниця між отриманими значеннями ступеня спрацювання прорізних і зачисних зубців є незначною (3,5%), відповідно для практичних розрахунків їх можна приймати рівними.

Залежно від швидкості подавання, час роботи пилки між переозагостреннями визначали за формулою

$$T_p = \frac{L_{\max} \cdot V_s}{L_1}, \quad (2.61)$$

де L_{\max} – максимальна довжина шляху різання лезом в заготовках до критичного затуплення, ($\rho = 60$ мкм); L_1 – довжина шляху різання лезом за одну годину часу роботи із швидкістю 1 м/хв.

Визначення площі поперечного перерізу стружки для прорізних і зачисних зубців. Зубці пилки $FZ/2WZ$ мають однакові кутові параметри, проте різну висоту і ширину твердосплавної пластинки зубця в залежності від призначення (прорізний або зачисний). Лінійні розміри зубців різні, відповідно й площа стружки, яку вони зрізують буде різною (рис. 2.13).



a – зубчастий вінець пилки, b – формування пропилу; B – ширина пропилу, мм; S – товщина полотна пилки, мм; S_1 – величини розширення зачисного зубця на бік, мм; λ_1 – кут нахилу головної задньої поверхні по відношенню до торцевої поверхні корпусу, °; m_b – величина виступу зубця, мм; b – ширина пропилу прорізним зубцем, мм; b_1 – розширення на бік зачисного зубця, мм; S_z – подача на зубець, мм; 1 – прорізний зубець (FZ); 2 – зачисний правий зубець (WZ_{np}); 3 – зачисний лівий зубець ($WZ_{лв}$)

Рисунок 2.13 – Схема визначення площі поперечного перерізу шарів пропилу для прорізних і зачисних зубців

На рис. 2.13, a показані профілі зубців пилки в пропилі, а на рис. 2.13, b – перерізи зрізаних шарів цими зубцями за однакової подачі на зубець. Розріз шарів, що зрізуються, здійснено площиною, яка паралельна вектору швидкості подачі і перпендикулярна стінкам пропилу. Ширина пропилу рівна B . Відповідно площу шару стружки,

яка зрізується зубцем круглої пилки можна визначити за залежністю:

$$F = Sz \cdot B, \text{ мм}^2 \quad (2.62)$$

де S_z – подача на зубець, мм; B – ширина пропилу, мм

Площу шару стружки, яка зрізується зубцями пилки з профілем $FZ/2WZ$, визначали для прорізних і зачисних зубців окремо, оскільки їхні лінійні розміри різні.

Площу поперечного перерізу стружки, яка зрізується прорізними зубцями для профілю $FZ/2WZ$, можна визначити скориставшись схемою (рис. 3.16, б) за залежністю

$$F_1 = 3(Sz \cdot B - 2Sz \cdot b_1) + m_g \cdot b, \quad (2.63)$$

де B – ширина пропилу, мм; b – ширина прорізного зубця, мм; b_1 – розширення на бік зачисного зубця, мм; S_z – подача на зубець, мм; m_g – виступ прорізного зубця, мм

Для зачисних зубців, при співвідношенні $c > 4$ залежність для визначення площі стружки набуде вигляду:

$$F_2 = 3Sz \cdot (B - b - b_1), \quad (2.64)$$

де B – ширина пропилу, мм; b – ширина прорізного зубця, мм; b_1 – розширення на бік зачисного зубця, мм; S_z – подача на зубець, мм.

Для ефективної роботи пилки із комбінованим зубчастим вінцем необхідно забезпечити умову, за якої площа стружки, що зрізується прорізним зубцем буде пропорційно рівною площі стружки, зрізаній зачисними зубцями, а площа стружки, зачисних зубців – рівною між собою.

Після визначення площі стружки і її співвідношення між прорізними і зачисними зубцями (рис. 2.14) встановлено, що найефективніше конструкція пилки з комбінованим зубчастим вінцем, профіль $FZ/2WZ$ працюватиме із загальною подачею на зубець в межах від 0,05 до 0,25 мм.

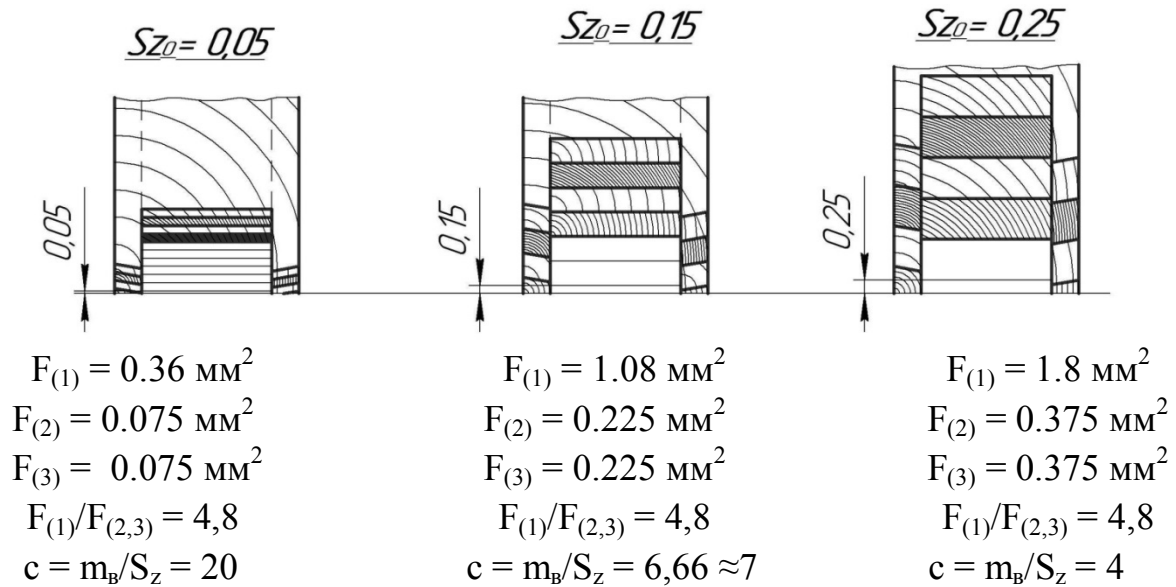


Рисунок 2.14 – Вплив величини швидкості подавання на формування пропилу під час пиляння пилкою $FZ/2WZ$ з параметрами:
 $D=315\text{мм}$; $m_e=1\text{мм}$; $S=2,4\text{мм}$; $B=3,4\text{мм}$

Відповідно, за таких умов, співвідношення площі стружки зрізаної прорізним зубцем до площі – зачисним, має становити 4,8, а співвідношення величини виступу до величини подачі c , має бути більшим від чотирьох ($c \geq 4$).

Встановлення залежності дотичної сили для прорізних і зачисних зубців. В процесі пиляння пилкою з комбінованим зубчастим вінцем необхідно визначати дотичну складову сили різання для кожного зубця із групи. Відповідно, враховуючи залежності (2.45) та (2.63) для прорізного зубця дотичну складову сили різання визначали:

$$P_{z(1)} = a_n a_w a_e \cdot \left(\frac{a_{p(1)} \cdot P_{(1)}}{h} + k_{(1)} + \frac{\alpha_\Delta \cdot H}{b} \right) \cdot (3(Sz \cdot B - 2Sz \cdot b_1) + m_e \cdot b) \quad (2.65)$$

Користуючись залежністю (2.45) та (2.64) знаходили дотичну складову сили різання для зачисного зубця:

$$P_{z(2)} = a_n a_w a_e \cdot \left(\frac{a_{p(2)} \cdot P_{(2)}}{h} + k_{(2)} + \frac{\alpha_\lambda \cdot H}{b_1} \right) \cdot (3Sz \cdot (B - b - b_1)) \quad (2.66)$$

Оскільки група зубців, які утворюють пропил у заготовці

товщиною 40 мм, складається із одного прорізного із прямим загостренням по задній поверхні і двох зачисних, із косим загостренням по задній поверхні, то середнє значення дотичної складової сили різання визначали із залежності:

$$P_z^{cp} = \frac{P_{z(1)} + 2P_{z(2)}}{3}, \quad (2.67)$$

де $P_{z(1)}$ – дотична складова сили різання прорізним зубцем, Н; $P_{z(2)}$ – дотична складова сили різання зачисним зубцем, Н

Під час пиляння круглою пилкою участь у процесі різання приймають одночасно кілька зубців, тому середню дотичну складову сили різання за оберт пилки (колова сила різання) визначали із залежності:

$$P_{z.кол.} = \sum P_{z.cp} \cdot \frac{l_k \cdot z}{2\pi R}. \quad (2.68)$$

Середню дотичну складову сили різання визначали із залежності

$$P_{z.cp} = \frac{P_{max}}{2}, \quad (2.69)$$

де P_{max} – максимальне значення дотичної складової сили різання, за найтяжчих умов, Н; відповідно: $P_{z.cp(2)} = P_{z.cp(3)}$, а $l_{k(2)} = l_{k(3)}$.

Оскільки формування пропилу пилкою $FZ/2WZ$ здійснюється трьома зубцями, то середню колову циклу визначали за залежністю:

$$P_{z.cp.ц} = \frac{P_{z.cp(1)} + P_{z.cp(2)}}{3}. \quad (2.70)$$

Аналогічно визначали довжину дуги контакту за цикл:

$$l_{k.ц} = l_{k(1)} + 2l_{k(2)}. \quad (2.71)$$

Врахувавши рівняння (2.68) – (2.71) отримали залежність для визначення колової сили різання пилкою $FZ/2WZ$, яка має вигляд:

$$P_{z.кол.} = \frac{P_{z.ср(1)} \cdot l_{k(1)} + 2P_{z.ср(2)} \cdot l_{k(2)} \cdot z_p}{4\pi R \cdot z_y}, \quad (2.72)$$

де $z = z_p$ – загальна кількість зубців пилки, шт.; z_y – кількість зубців пилки, що одночасно перебувають у пропилі, шт.

2.5.2 Нормальна складова сили різання

Нормальну складову сили різання під час пиляння круглими пилками визначали із залежностей [7]. Загальне рівняння для визначення нормальної сили різання набуде вигляду:

$$P_y = \frac{a_n \cdot a_w \cdot a_b \cdot B \cdot l_{кон}}{t_3} \cdot \left(\frac{0,5\alpha_\rho^2 \rho_0}{\rho_0 + 50} \left[\alpha_\rho p + 0,1 \cdot \left(k + \frac{\alpha \cdot H}{B} \right) \right] - \right. \\ \left. - (h - 0,1) \cdot \left(k + \frac{\alpha \cdot H}{B} \right) \cdot \text{tg}(90^\circ - \delta - \varphi_{зyc}) \right). \quad (2.73)$$

Із загальної залежності нормальної складової сили різання під час пиляння круглими пилками, визначили нормальну складову сили різання, яка діє на прорізний і окремо на зачисний зубці круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем.

Спочатку визначали нормальну складову сили різання, яка діє на прорізний зубець:

$$P_{y(1)} = \frac{a_n \cdot a_w \cdot a_b \cdot b \cdot l_{k(1)}}{t_3} \cdot \left(\frac{0,5\alpha_{\rho(1)}^2 \cdot \rho_0}{\rho_0 + 50} \left[\alpha_{\rho(1)} \cdot p_{(1)} + 0,1 \cdot \left(k_{(1)} + \frac{\alpha_\Delta \cdot H}{b} \right) \right] - \right. \\ \left. - (h - 0,1) \cdot \left(k_{(1)} + \frac{\alpha_\Delta \cdot H}{b} \right) \cdot \text{tg}(90^\circ - \delta - \varphi_{зyc}) \right). \quad (2.74)$$

Нормальну складову сили різання, яка діє на зачисний зубець визначали залежністю

$$P_{y(2)} = \frac{a_n \cdot a_w \cdot a_g \cdot b_1 \cdot l_{k(2)}}{t_3} \cdot \left(\begin{array}{l} \frac{0,5\alpha_{\rho(2)}^2 \cdot \rho_0}{\rho_0 + 50} \left[\alpha_{\rho(2)} \cdot p_{(2)} + 0,1 \cdot \left(k_{(2)} + \frac{\alpha_\lambda \cdot H}{b_1} \right) \right] - \\ -(h-0,1) \cdot \left(k_{(2)} + \frac{\alpha_\lambda \cdot H}{b_1} \right) \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi_{зyc}) \end{array} \right). \quad (2.75)$$

Наведена методика теоретичних досліджень дає змогу розробити математичну модель точності поздовжнього пиляння круглими пилками з комбінованим зубчастим вінцем, дослідити дотичну і нормальну складові сили різання під час пиляння та встановити їх вплив на технологічну точність верстата.

2.5.3 Бокова складова сили різання

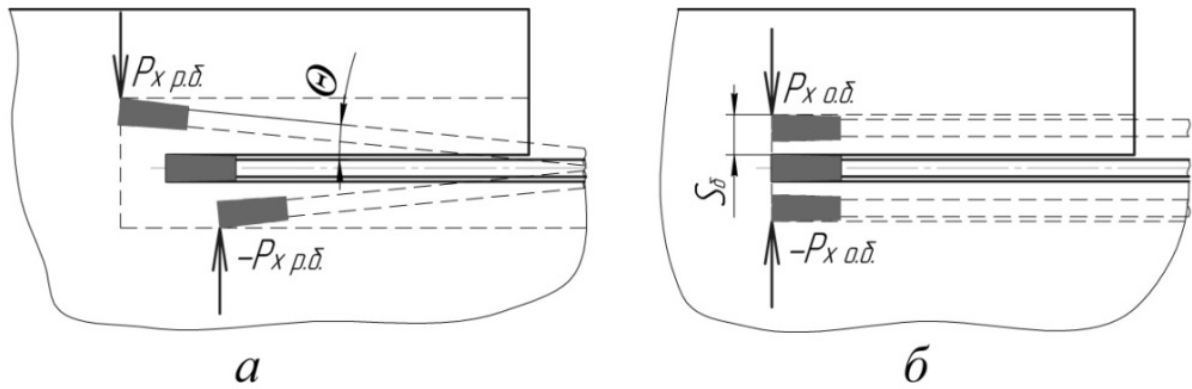
Під час пиляння бокова сила, що діє на круглу пилку, спричинена такими джерелами: верстатом, інструментом, заготовкою.

Результуюча бокова сила дорівнює векторній сумі складників:

$$\sum P_x = P_{x.v.} + P_{x.i.} + P_{x.z.} + P_{x.p.p.}, \quad (2.76)$$

де $P_{x.v.}$, $P_{x.i.}$, $P_{x.z.}$, $P_{x.p.p.}$ – бокова сила спричинена верстатом, інструментом, заготовкою і режимом процесу пиляння відповідно.

Бокова сила, спричинена конструкцією верстата. Аналізуючи показники геометричної точності круглопилкового верстата позиційного типу можна зробити висновок, що бокова складова сили різання виникає від: непрямої лінійного переміщення пилкового супорта, радіального биття пилкового вала і торцевого биття фланця пилки. Саме ці три геометричні показники спричиняють виникнення складників бокової сили різання внаслідок зміщення пилки у поперечному напрямку відносно площини пропилю (рис. 2.15).



a – радіальне биття пилкового вала;

б – непрямолінійне переміщення пилкового супорта або подавальної каретки

Рисунок 2.15 – Джерела виникнення бокової складової сили різання

Радіальне биття пилкового вала спричиняє бокову силу внаслідок відхилення пилки (див. рис. 2.15 *a*) на певний кут $\Theta_{p.\delta}$ від площини пиляння:

$$P_{x.p.\delta} = \pm P_y \cdot \Theta_{p.\delta} \quad (2.77)$$

де $\Theta_{p.\delta}$ – кут повороту пилки від радіального биття вала, град.

Торцеве биття фланця для кріплення пилки спричиняє бокову силу в результаті зміщення пилки у поперечному напрямку (див. рис. 2.15 *б*) на величину биття $S_{m.\delta}$. Залежність бокової сили від торцевого биття має вигляд:

$$P_{x.m.\delta} = \pm \frac{P_y \cdot S_{m.\delta.\phi}}{R} \quad (2.78)$$

де $S_{m.\delta.\phi}$ – величина відхилення пилки внаслідок торцевого биття фланця, мм.

Непрямолінійне переміщення пилкового супорта або подавальної каретки (рис. 2.15 *б*), спричиняє відхилення пилки у поперечному напрямі на певний кут. Бокову складову сили різання від непрямолінійного переміщення визначали за формулою:

$$P_{x.n.k.} = \pm P_y \cdot \Theta_{n.n.}, \quad (2.79)$$

де P_y – нормальна складова сили різання, Н; $\Theta_{n.n.}$ – кут відхилення пилки внаслідок непрямолінійного переміщення град.

Залежність для визначання сумарної бокової складової сили різання спричиненої верстатом має вигляд:

$$P_{x.v.} = \pm P_y \cdot \left(\Theta_{n.n.} + \Theta_{p.б.} + \frac{S_{m.б.}}{R} \right), \quad (2.80)$$

де P_y – нормальна складова сили різання, Н; $\Theta_{n.n.}$ – кут відхилення пилки внаслідок непрямолінійного переміщення, град; $\Theta_{p.б.}$ – кут повороту пилки від радіального биття вала, град; $S_{m.б.}$ – величина відхилення пилки внаслідок торцевого биття, мм; R – радіус пилки, мм.

Бокова сила спричинена інструментом. Для інструмента джерелом виникнення бокової сили є точність виготовлення пилки, яка характеризується параметром торцевого биття різальних пластин (рис. 3.18, б). Бокову складову сили різання від геометричної точності круглої пилки визначали за залежністю:

$$P_{x.z.m.i.} = \pm \frac{P_y \cdot S_{m.б.пл.}}{R}, \quad (2.81)$$

де $S_{m.б.пл.}$ – величина торцевого биття пластин, мм.

Вплив режимних чинників та ступінь затуплення інструмента враховано у залежностях дотичної (2.65), (2.66) і нормальної (2.74) та (2.75) складових сили різання, від яких залежить бокова складова. Відповідно, бокова складова сили різання спричинена інструментом має вигляд:

$$P_{x.i.} = \pm P_{x.z.m.i.} = \pm \frac{P_y \cdot S_{m.б.пл.}}{R}, \quad (2.82)$$

де P_y – нормальна складова сили різання, Н; $S_{m.б.пл.}$ – величина

торцевого биття пластин, мм; R – радіус пилки, мм.

Бокова сила спричинена заготовкою. Розглядати заготовку як джерело виникнення бокової сили під час поздовжнього розпилювання можна лише зі сторони неоднорідності структури деревини. Адже як відомо з літератури [2, 4], пиломатеріали у вигляді дощок в центральній зоні мають значно меншу щільність, ніж у периферійній, що позначається на зміні величини бокової сили. Також на бокову силу впливає наявність сучків, порода та вологість деревини. Нами ці чинники було враховано у залежностях дотичної і нормальної складових сили різання, від яких залежить бокова складова.

Просумувавши встановлені залежності від основних джерел виникнення, отримано залежність бокової складової сили різання:

$$P_x = \pm P_y \cdot \left(\Theta_{p.б.} + \Theta_{н.п.} + \frac{S_{m.б.ф.}}{R} + \frac{S_{m.б.пл.}}{R} \right), \quad (2.83)$$

де P_y – нормальна складова сили різання, Н; $\Theta_{p.б.}$ – кут повороту пилки від радіального биття вала, град; $\Theta_{н.п.}$ – кут відхилення пилки внаслідок непрямолінійного переміщення, град; $S_{m.б.ф.}$ – величина відхилення пилки внаслідок торцевого биття фланця, мм; $S_{m.б.пл.}$ – величина торцевого биття пластин, мм; R – радіус пилки, мм.

Встановлені залежності для визначання бокової складової сили різання будуть враховані у математичній моделі точності пиляння, що теоретично дасть змогу досліджувати технологічну точність круглопилкового верстата для поздовжнього розпилювання деревини.

2.5.4 Потужність на різання

У результаті нерівномірного почергового зрізування стружок, дотичні сили різання на кожному із зубців, що одночасно приймають участь у процесі різання, є різними за величиною. Тому, колову дотичну силу різання доцільно визначати, як середнє арифметичне значення дотичних складових сили різання прорізних і зачисних

зубців, що одночасно приймають участь у різанні, залежність (2.72).

На основі теоретичної залежності (2.72), побудовано графічну залежність (рис. 2.16) дотичної складової сили різання під час поздовжнього розпилювання пиломатеріалів у вигляді дощок круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем, що дозволяє визначати потужність на різання [2] під час поздовжнього пиляння деревини круглою пилкою $FZ/2WZ$.

$$N_{\text{різ.}} = \left(\left(\frac{(P_{z.cp(1)} \cdot l_{k(1)} + 2P_{z.cp(2)} \cdot l_{k(2)}) \cdot z_p}{4\pi R \cdot z_u} \right) \cdot V_p \right) \cdot 10^{-3}, \quad (2.84)$$

де $P_{z.cp(1)}$ – дотична складова сили різання, що діє на прорізні зубці, Н; $P_{z.cp(2)}$ – дотична складова сили різання, що діє на зачисні зубці, Н; z_p – загальна кількість зубців пилки, шт.; z_u – кількість зубців пилки, що одночасно перебувають у пропилі, шт.; V_p – швидкість різання, м/с.

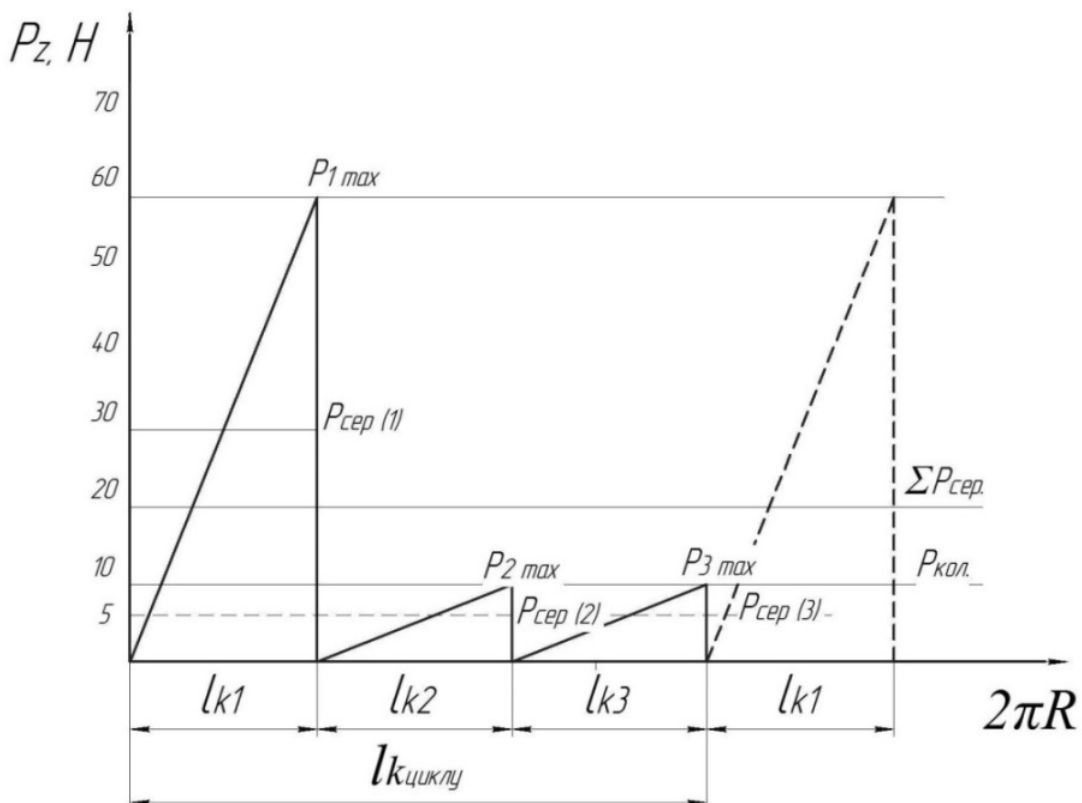


Рисунок 2.16 – Дотична складова сили різання під час пиляння берези ($H = 40\text{мм}$) круглою пилкою $FZ/2WZ$

На основі аналізу встановлених залежностей дотичної складової сили різання, розраховано значення потужності для трьох пилок і наведено за допомогою діаграми (рис. 2.17).

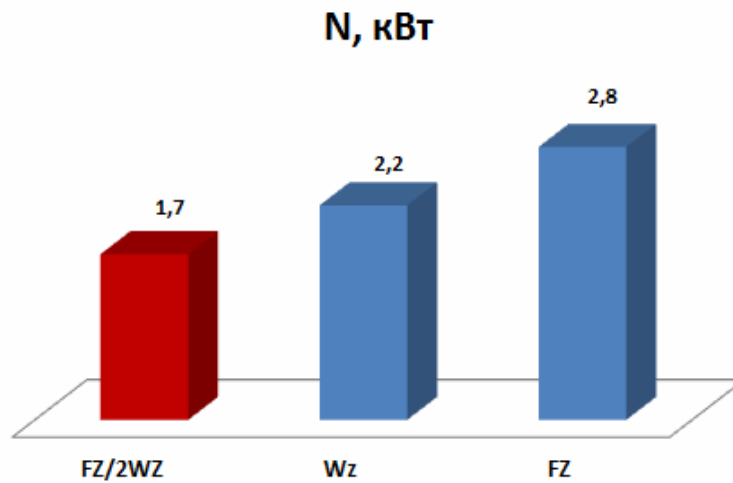


Рисунок 2.17 – Результати потужності на різання для різних пилок за умов: $V_s=16$ м/хв; $H=40$ мм; порода – сосна

На основі теоретичних розрахунків [7] встановлено, що потужність різання круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$ нижча на 40% порівняно з пилкою FZ і на 23% – від пилки WZ .

2.6 Математична модель точності поздовжнього пиляння на верстатах позиційного типу

Врахувавши встановлені залежності для визначання складових сили різання та пилки із груповим розміщенням зубців, часткова математична модель точності пиляння на верстатах позиційного типу набуде вигляду:

$$\sum \omega = \left(\begin{aligned} &0,0248 + \left(\sum \Delta l_i \right)^2 + \left[\frac{I}{j_6} \left(\left(P_{z(1)} + 2P_{z(2)} \right) \cdot \cos \varphi_{cep} \pm \right) \right]^2 + \\ &+ \left[\frac{P_{y.kp} \cdot \left(P_{y(1)} + 2P_{y(2)} \right) \cdot \left(\Theta_{p.б.} + \Theta_{н.н.} + \left(S_{м.б.ф.} + S_{м.б.н.} \right) / R \right)}{j_n \cdot \left(3P_{y.kp} - \left(P_{y(1)} + 2P_{y(2)} \right) \right)} \right]^2 + \\ &+ \left(0,2 \cdot \left(\sum \Delta l_i + \omega_{z.m.i} \right) \right)^2 \end{aligned} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (2.85)$$

Для визначення шляхів вдосконалення конструкції верстата позиційного типу [7] на основі математичної моделі точності пиляння (2.85) проаналізовано вплив основних джерел виникнення похибок на точність поздовжнього розпилювання пиломатеріалів у вигляді дощок, круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем FZ/2WZ. Ступінь впливу кожного із джерел виразили у відсотках відношенням похибки спричиненої окремим джерелом та сумарної похибки обробляння (рис. 2.18).

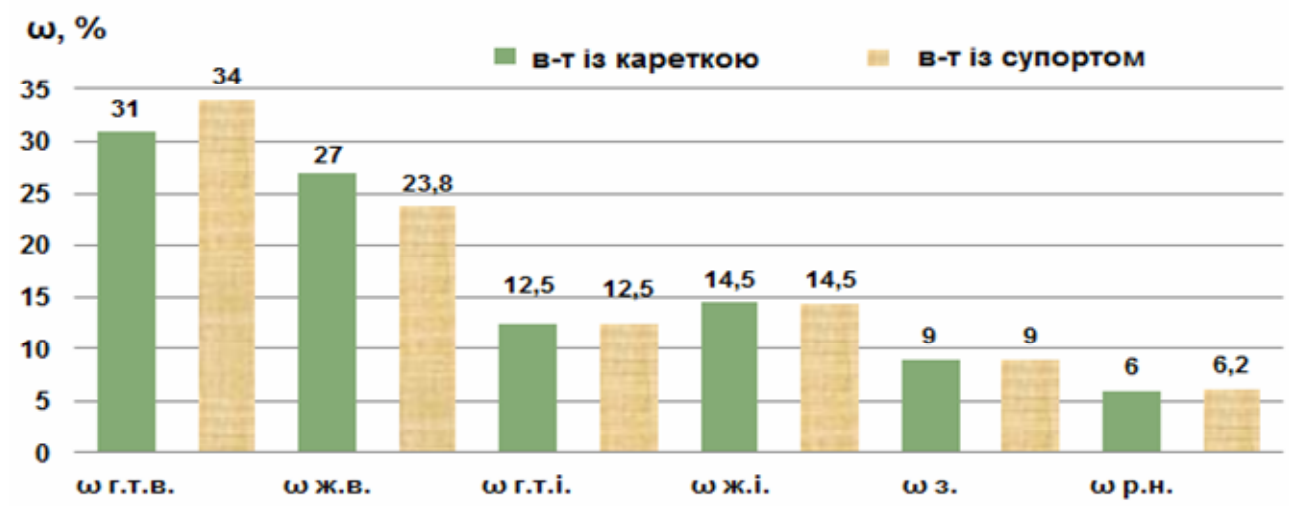


Рисунок 2.18 – Похибки основних джерел впливу на точність пиляння пилкою FZ/2WZ за умов різання: $V_s=16$ м/хв; $H=40$ мм.

Під час визначання впливу кожного із основних джерел, що спричиняють виникнення похибок прийнято постійними такі величини: геометричну точність та жорсткість верстата, геометричну точність пилки, похибку розмірного налагодження, висоту пропилю і швидкість подавання. Визначання похибок від кожного джерела виконано за умови величини радіуса закруглення головної різальної кромки зубців пилки $\rho=60$ мкм, тобто за період стійкості інструмента.

На основі аналізу математичної моделі точності поздовжнього пиляння на верстатах позиційного типу встановлено, що на точність пиляння найбільше впливають: геометрична точність та жорсткість верстата, похибка від яких становить 34 % та 23,8% відповідно; геометрична точність та робоча жорсткість пилки, похибка від яких становить до 12,5% та 14,5 % відповідно.

На основі проведеного аналізу основних джерел впливу встановлено, що з метою підвищення точності поздовжнього розпилювання деревини потрібно вдосконалювати конструкцію верстата і пилок.

2.7 Висновки до другого розділу

1 На основі твердотільного 3D-моделювання пилки та методу кінцевих елементів у середовищі Solid Works досліджено робочу жорсткість круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем та отримано залежність впливу виступу прорізного зубця і його товщини на робочу жорсткість пилки $FZ/2WZ$, яка дає змогу визначати раціональні значення цих чинників для забезпечення необхідної жорсткості пилки та точності пропилю.

2 Встановлено кінематичні залежності процесу пиляння пилкою з комбінованим зубчастим вінцем для визначення кута контакту прорізних та зачисних зубців пилки, товщини стружки для прорізних та зачисних зубців пилки $FZ/2WZ$ та впливу величини подачі на один зубець на стружкоутворення та формування пропилю.

3 Розроблено математичну модель точності поздовжнього пиляння деревини на круглопилкових верстатах позиційного типу пилкою з комбінованим зубчастим вінцем та доведено можливість її застосування для прогнозування виготовлення брусків заготовок у межах допустимої похибки $\pm 0,5$ мм.

4 Для реалізації розробленої математичної моделі точності поздовжнього пиляння деревини на верстатах позиційного типу встановлено залежності дотичної, нормальної і бокової складових сили різання під час поздовжнього розпилювання дощок круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$.

5 Отримана математична модель дає змогу теоретично досліджувати вплив низки чинників на точність поздовжнього розпилювання деревини круглою пилкою з комбінованим зубчастим вінцем та є основою для розробляння числового програмного керування режимом роботи верстата за технологічною точністю.

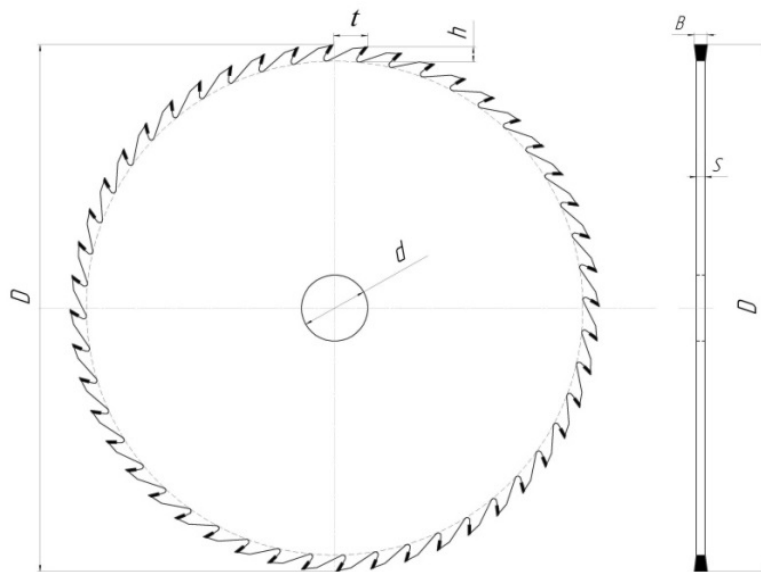
РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЯННЯ КОНСТРУКЦІЙ КРУГЛИХ ПИЛОК З КОМБІНОВАНИМ ЗУБЧАСТИМ ВІНЦЕМ

3.1 Обґрунтування конструкційних параметрів пилки із комбінованим зубчастим вінцем

3.1.1 Основні лінійні параметри диска пилки

Оскільки, круглопилкові верстати переважно використовуються для поздовжнього розпилювання пиломатеріалів у вигляді дощок товщиною до 80 мм, то доцільно встановити основні постійні конструкційні параметри для цих пилок (рис.3.1), а саме: D – діаметр пилки; d – діаметр посадкового отвору; B – ширина зубчастого вінця; S – товщина полотна пилки; t – крок зубців; h – висота зубців.



D – діаметр пилки, мм; d – діаметр посадкового отвору, мм;
 B – ширина зубчастого вінця, мм; S – товщина полотна пилки, мм;
 t – крок зубця, мм; h – висота зубця, мм

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд та основні технічні параметри
круглої пилки з твердосплавними пластинами

Діаметр пилки D визначається залежністю

$$D_p = 2 \cdot (H + r + 10) \quad (3.1)$$

де H – максимальна висота пропилю, мм; r – радіус притискної шайби, мм; ($r = 60$ мм) [7]. Для розпилювання дощок на верстатах із верхнім розміщенням пилки відносно базової поверхні, діаметр пилки становить 300 мм, а із нижнім – 315 мм. Відповідно для подальших розрахунків приймаємо діаметр 315 мм [25].

Товщина полотна пилки, S . На основі аналізу лінійних та кутових параметрів круглих пилок для поздовжнього розпилювання цільної деревини [24] (див. табл.1.2) було встановлено, що раціональна товщина полотна пилки діаметром 300 мм, яка експлуатується вітчизняними виробничниками становить 2,4 мм. Тому в подальшому товщина полотна пилки буде постійною і становитиме 2,4 мм.

Ширина зубчастого вінця, B . Для правильної експлуатації круглої пилки із твердосплавними пластинками, під час поздовжнього розпилювання цільної деревини рекомендується використовувати такі розширення зубів на бік відносно товщини тіла пилки [35]: м'які породи деревини (сосна, ялина) – 0,5-0,7 мм на бік; тверді породи деревини (дуб, бук) – 0,3-0,5 мм на бік.

Оскільки конструкція пилки призначена для розпилювання цільної деревини м'яких і твердих порід, то розширення зубів на бік відносно товщини тіла пилки становить 0,5 мм. Ширину зубчастого вінця визначали із залежності

$$B = S + 2S_1, \quad (3.2)$$

де S – товщина полотна пилки, мм; S_1 – розширення зубів на бік відносно товщини тіла пилки, мм; ($S_1 = 0,5$ мм) [22].

Розрахункова ширина зубчастого вінця становить 3,4 мм, тому прийняли ширину зубчастого вінця для подальших розрахунків рівну розрахунковій, відповідно $B = 3,4$ мм.

Обґрунтування кількості зубців пилки. Кількість зубців пилки впливає на ряд чинників, які по різному взаємодіють залежно від критеріїв оцінки. Одним із головних критеріїв оцінки для визначення кількості зубців є точність розпилювання. Згідно із рекомендаціями [36], для забезпечення точності пиляння необхідно, щоб у пропилі

одночасно знаходилось не менше двох зубців. Висота пропилу, для розпилювання круглою пилкою становить 20–60 мм [37]. Керуючись ДСТУ ГОСТ 980-2009 (ISO 2935-74) та рекомендаціями [38] для поздовжнього розпилювання деревини круглими пилками, мінімально необхідна кількість зубців визначається із співвідношення

$$z = (0,32 \dots 0,18) \cdot D / S, \quad (3.3)$$

де D – загальний діаметр пилки, мм; S – товщина тіла пилки, мм.

Під час вибору кількості зубців необхідно враховувати, що зменшення числа зубців зумовлює зниження енерговитрат, проте знижується якість розпилювання і продуктивність, які визначаються подачею на зубець.

Після розрахунку визначено, що оптимальна кількість зубців за критерієм забезпечення високої точності пропилу становить 36. Така кількість зубців забезпечує одночасне знаходження не менше двох зубців на діаметрі 315 мм і висоті пропилу 20 мм, що відповідає зазначеним умовам. Відповідно, загальна кількість зубців круглої пилки [39], яка призначена для поздовжнього розпилювання цільної деревини твердих і м'яких порід, за критерієм забезпечення високої точності пиляння, становить $z = 36$.

Крок зубців t_z залежить від загального діаметра пилки та кількості зубців

$$t_z = \frac{D}{z}, \text{ мм} \quad (3.4)$$

де D – загальний діаметр пилки, мм; z – кількість зубців пилки, шт.

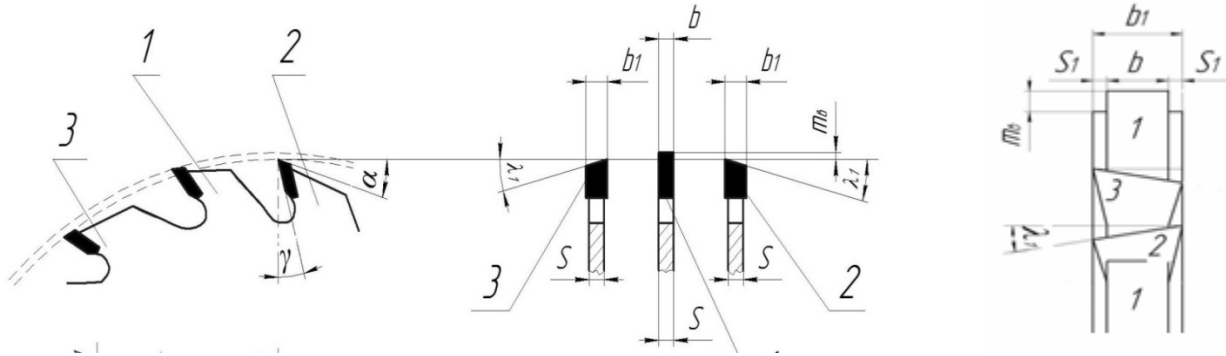
Висота зубця h визначається із співвідношення

$$h_z = (0,3 \dots 0,7) \cdot t_z, \quad (3.5)$$

де t_z – крок зубців пилки, мм.

3.1.2 Параметри зубчастого вінця пилки

Обґрунтування лінійних параметрів прорізних зубців. Кругла пилка з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$ складається із комбінації прорізних через два зачисних зубці (рис. 3.2).



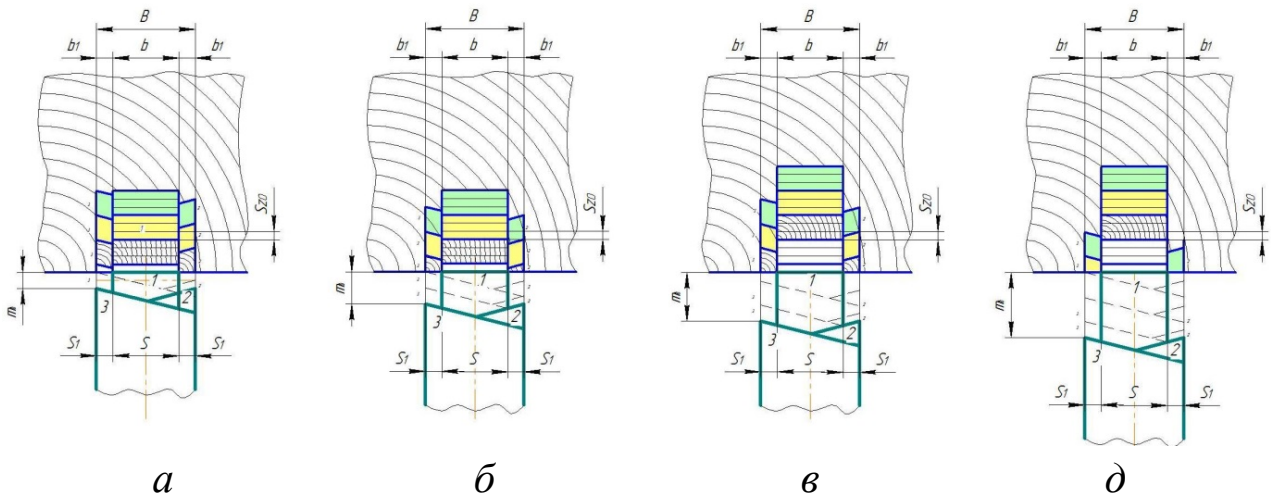
S – товщина полотна пилки, $S1$ – виступ твердосплавних пластин відносно торця корпуса, b – ширина прорізного зубця, $b1$ – ширина зачисного зубця, B – ширина пропилу, γ – передній кут, α – головний задній кут, λ_1 – кут нахилу головної задньої поверхні по відношенню до торцевої поверхні корпуса, 1 – прорізний зубець (FZ); 2 – зачисний лівий зубець (WZ); 3 – зачисний правий зубець (WZ)

Рисунок 3.2 – Кутові та лінійні параметри зубчастого вінця пилки

Ширина прорізного зубця b має бути рівною або більшою (у залежності від технологічних умов підготовки до роботи) товщини полотна пилки S . Відповідно, для пилки з профілем $FZ/2WZ$, приймаємо ширину прорізного зубця b , рівною товщині полотна пилки ($b = S$).

Формування пропилу (рис. 3.3) здійснюється зачисними зубцями $2,3 WZ$, а прорізний зубець $1FZ$, завдяки виступу m_e здійснює прорізування спрямовуючого пазу і утримує пилку від бокового зміщення. Оскільки виступ прорізного зубця має значний вплив на процес формування пропилу, то його величину необхідно дослідити більш ґрунтовно.

Величина виступу прорізного зубця впливає на стійкість пилки в пропилі. З одного боку виступ впливає на точність розпилювання через подачу на зубець, а з іншого – через робочу жорсткість пилки.



a – $m_e = 0,5$ мм; ***б*** – $m_e = 1,0$ мм; ***в*** – $m_e = 1,5$ мм; ***д*** – $m_e = 2,0$ мм

Рисунок 3.3 – Вплив величини виступу m_e прорізного зубця на формування пропилу пилкою $FZ/2WZ$:
 $S=2,4$ мм; $B=3,4$ мм; $b_1 = 0,5$ мм; $S_{z(0)} = 0,25$ мм

Дослідження впливу величини виступу прорізного зубця на робочу жорсткість круглої пилки проведено на віртуальній моделі у середовищі Solid Works за допомогою методу кінцевих елементів.

Визначення ширини та кута скосу зачисних зубців. Зачисні зубці пилки $2,3 WZ$ здійснюють формування ширини пропилу, відповідно їхня ширина b_1 рівна ширині пропилу B (див. рис. 3.2), відповідно ширина зачисних зубців WZ рівна 3,4 мм.

Кут нахилу головної задньої поверхні по відношенню до торцевої поверхні корпусу λ_1 забезпечує зниження енергоємності та покращення якості пропилу за рахунок перерозподілу зусиль на різання [7].

Оскільки кругла пилка з комбінованим зубчастим вінцем призначена для поздовжнього розпилювання деревини, то її кутові параметри згідно ГОСТ 9769-79 [38], для твёрдосплавних пилок

діаметром $D = 315$ мм становлять: передній кут $\gamma = 20^\circ$; головний задній кут $\alpha = 15^\circ$; кут нахилу головної задньої поверхні по відношенню до торцевої поверхні корпусу $\lambda_1 = 10^\circ$.

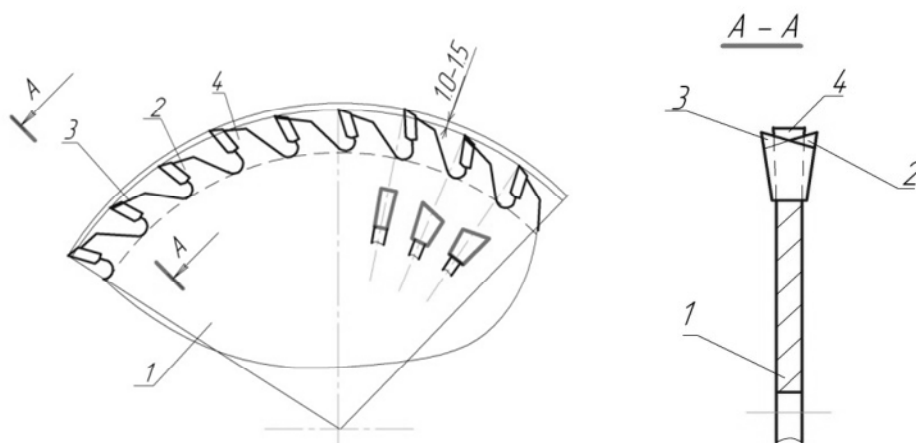
3.2 Розробляння конструкції круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$

Розробляння круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$ виконується з метою підвищення точності поздовжнього розпилювання пиломатеріалів у вигляді дощок на брускові заготовки та зниження енергоємності процесу пиляння.

Поставлено завдання розробити конструкцію твердосплавної круглої пилки, яка забезпечить підвищення точності пиляння і стійкості зубців проти спрацювання, а також спрощення конструкції та зменшення трудомісткості підготовки пилки до роботи.

Зубчастий вінець вдосконаленої твердосплавної круглої пилки [40], складається з трьох видів зубців, що чергуються: одні мають правостороннє косе загострення, другі – лівостороннє косе загострення, треті – пряму різальну грань, яка на 1,0...1,5 мм виступає над двома попередніми, а їхня товщина становить $2/3$ від найбільшої товщини зубців із косим загостренням.

Конструкція зубчастого вінця такої пилки наведена на рис. 3.4.



1 – корпус; 2, 3 – пластини зубців скошені почергово на один бік з формою WZ ; 4 - зубці з пластинами форми FZ

Рисунок 3.4 – Конструкція круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$

Дана пилка має зубці 4 з пластинами форми FZ , ширина яких складає $2/3$ від ширини пропилу й мають однакову ширину з товщиною корпусу l та їх головні різальні кромки виступають над колом обертання вершин зубців пилки 2, 3 з формою WZ на 1,5 мм. Зубці 4, які виступають, у розпилюваному матеріалі утворюють паз, бокові стінки якого утримують пилку від бокового зміщення і тим самим забезпечують стабільність обертання пилки. Бокові стінки пропилу формуються зубцями 2,3 з формою пластини WZ . Вершини цих зубців прорізають у заготівці паз шириною, що складає $1/3$ від ширини пропилу, який залишиться з обох боків після різання зубцями FZ .

Така конструкція твердосплавної круглої пилки забезпечує підвищення точності розпилювання і зменшення енергоємності процесу пиляння.

Параметри диска пилки. Важливо зазначити, що використовуючи інструмент діаметром 450 мм, замість 300 мм, ширина пропилу збільшується в півтори рази, що веде до втрати деревини та збільшення енергоємності в процесі поздовжнього пиляння деревини. Діаметр пилки визначено з врахуванням товщини пиломатеріалів, що розпилюються (дошки із твердих порід деревини товщиною 19...65 мм та 19...100 мм – із м'яких порід) [4, 12]. Проте, фактично на виробництві розпилювання дощок здійснюється висотою до 80 мм [12], більші висоти пропилу відносяться до брусів, які поділяють на малі (80-140мм) та великі (140-200 мм) [4].

Для поздовжнього розпилювання пиломатеріалів у вигляді дощок, на круглопилкових верстатах з верхнім або нижнім розміщенням пилки відносно стола, раціональним є мінімально допустиме значення діаметра круглої пилки. Для максимальної висоти пропилу 65 мм раціональний діаметр пилки становить 315 мм.

Товщина диска пилки впливає на точність розпилювання через жорсткість тіла пилки [48]. Провідні українські фірми-виробники (Інтекс, Поділля, Механік) виготовляють круглі пилки діаметром 315 мм, товщиною 1,6...3,0 мм [18]. Товщина дослідного взірця пилки ($FZ/2WZ = 12/24$) відповідає середньому значенню, тобто $S = 2,4$ мм. Ширина зубчастого вінця пилки формується трьома зубцями, а саме:

зубець FZ рівний товщині тіла пилки, а зубці WZ ширші від товщини тіла пилки на величину $S_I=0,5$ мм. Загальна ширина зубчастого вінця пилки становить 3,4 мм. Така конструкція пилки може застосовуватись для розпилювання як м'яких (сосна, ялина, модрина) порід деревини, так і твердих (дуб, бук, ясень).

Параметри зубчастого вінця. Раціональна кількість зубців пилки. Кількість зубців пилки впливає як на точність розпилювання, так і на потужність різання [2, 6]. Із збільшенням кількості зубців, що одночасно приймають участь у різанні, підвищується точність розпилювання, але зростає потужність на різання. На основі попередніх експериментальних досліджень [34] точності розпилювання трьома пилками однакового діаметру із різною кількістю зубців ($FZ/2WZ = 8/16$; $12/24$; $16/32$) встановлено, що пилка із загальною кількістю зубців $z_{заг} = 36$ ($FZ/2WZ = 12/24$) шт, забезпечує найвищу точність пиляння (у межах $\pm 0,5$ мм), тому саме таку кількість зубців прийнято за оптимальну.

Отже, конструкція круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$ має такі параметри: $D = 315$ мм, $S = 2,4$ мм, $z_{заг} = 36$ ($FZ/2WZ = 12/24$) шт, $b_{np} = S + 2S_I = 3,4$ мм, $m_g = 1,0$ мм.

3.3 Конструкція пилки з комбінованими зубчастим вінцем $FZ1/FZ2$

Недоліком конструкції $FZ/2WZ$ є низька стійкість проти спрацювання зубців з косим загостренням та велика трудомісткість підготовлення їх до роботи. В основу нової моделі поставлено завдання розробити конструкцію твердосплавної круглої пилки, яка забезпечить підвищення точності пиляння і стійкості зубців проти спрацювання, а також спрощення конструкції та зменшення трудомісткості підготовлення пилки до роботи.

Поставлене завдання вирішується тим, що зубчастий вінець виконується з двох видів прямо загострених зубців, які чергуються через один: одні (прорізні) мають товщину рівну товщині тіла пилки, а другі (формувальні) – менші за висотою на 1,0...2,0 мм і мають товщину рівну ширині пропилю.

За рахунок виступу одних зубців на 1,0...2,0 мм попередньо прорізається паз у дні пропилу, що забезпечує пряmolінійність різу та стійкість інструмента і підвищує точність пиляння, а зубці меншої висоти формують стінки пропилу і забезпечують якість обробленої поверхні. Пряме загострення прорізних і формувальних зубців забезпечує спрощення конструкції та зменшення трудомісткості підготовки пилки до роботи.

Кругла пилка (рис. 3.12) складається з тіла 1 та зубчастого вінця із двома типорозмірами прямозагострених зубців 2,3. Зубці 2 мають товщину рівну ширині пропилу, а зубці 3 на 1,0...2,0 мм виступають над колом різання зубців 2, а їхня товщина рівна товщині тіла пилки.

Кругла пилка працює наступним чином. Під час взаємодії з розпилюваним матеріалом зубець 3 зарізає в деревині паз шириною, що рівній товщині тіла пилки, а зубець 2 розширює пропил та здійснює формування бокової поверхні пиломатеріалу.

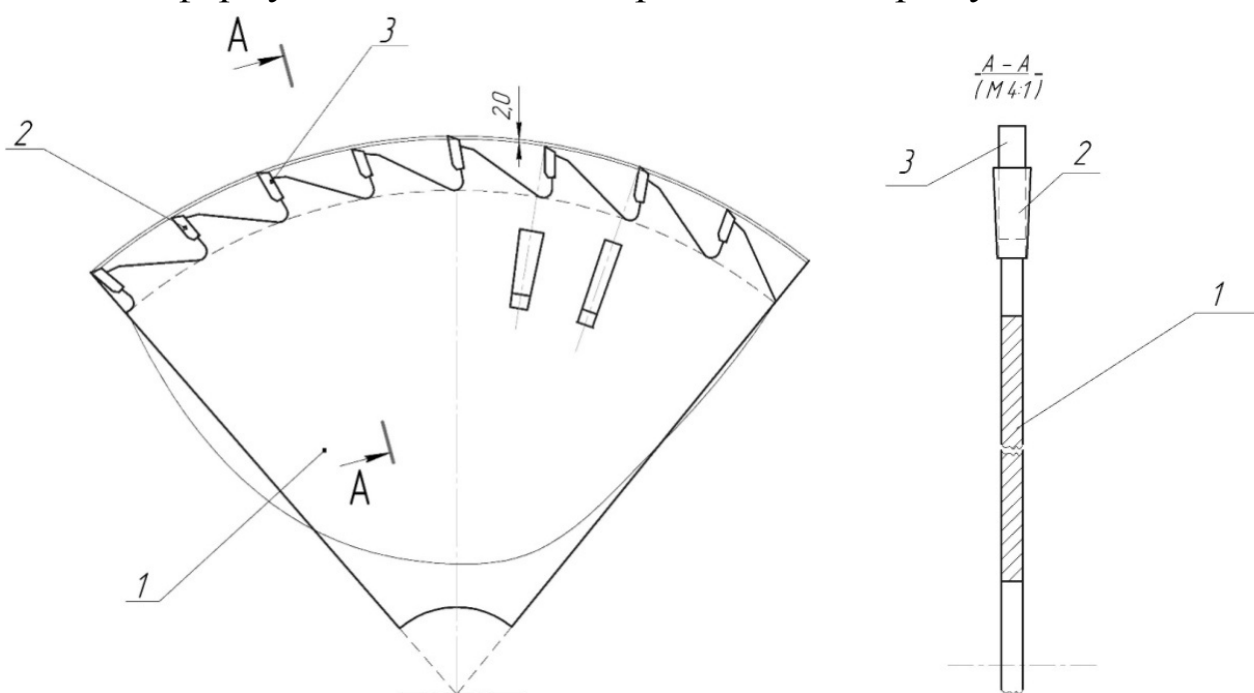


Рисунок 3.12 – Загальний вигляд круглої пилки *FZ1/FZ2*

Така конструкція твердосплавної круглої пилки забезпечує підвищення точності розпилювання і періоду стійкості зубців проти спрацювання, а також зменшення трудомісткості підготовки пилки до роботи.

Обґрунтування конструкційних параметрів пилки. Діаметр пилки визначено з врахуванням товщини пиломатеріалів у вигляді дощок, що розпилюються на деревообробних підприємствах України [49]. Для поздовжнього розпилювання дощок на круглопилкових верстатах з верхнім або нижнім розміщенням пилки відносно стола, оптимальним є мінімально допустиме значення діаметра круглої пилки, який попередньо визначили, що становить 315 мм.

Кількість зубців пилки впливає як на точність розпилювання, так і на потужність різання [7]. На основі попередніх експериментальних досліджень точності розпилювання трьома пилками однакового діаметру із різною кількістю зубців [34] встановлено, що пилка із загальною кількістю зубців $z_{заг} = 36$ шт., забезпечує найвищу точність пиляння (у межах $\pm 0,5$ мм), тому саме таку кількість зубців прийнято за оптимальну, тобто $z_{заг} = 36$ ($FZ1/FZ2 = 18/18$) шт.

Величина виступу зубця FZ_1 забезпечує стійкість пилки у пропилі за умови, коли подача на зубець S_z буде меншою за величину його виступу [39]. Для дослідного взірця пилки $FZ1/FZ2$ прийнято величину виступу зубця FZ_1 , яка становить 1,5 мм, оскільки згідно проведених експериментальних досліджень [7], збільшення величини виступу на 0,5 мм забезпечує підвищення жорсткості в 1,2–1,5 рази. Відповідно для використання круглої пилки з мінімальною товщиною диска, з метою забезпечення достатньої робочої жорсткості пилки та отримання максимального корисного виходу пилопродукції, необхідно використовувати пилки із комбінованим зубчастим вінцем, величина виступу яких становить 1,5 мм.

Товщина диска пилки впливає на точність розпилювання через жорсткість тіла пилки. Провідні українські та європейські виробники виготовляють круглі пилки діаметром 315 мм, товщиною 1,6 ... 3,0 мм [13, 14, 18, 19]. Товщина дослідного взірця пилки ($FZ1/FZ2 = 18/18$) відповідає мінімальному значенню, тобто $S = 1,6$ мм. Ширина зубчастого вінця пилки формується двома зубцями, а саме: зубець FZ_1 рівний товщині тіла пилки, а зубець FZ_2 ширший від товщини тіла пилки на величину $S_1 = 0,5$ мм. Загальна ширина зубчастого вінця

пилки становить 2,6 мм. Така конструкція пилки може застосовуватись для розпилювання як м'яких (сосна, ялина, модрина) порід деревини, так і твердих (дуб, бук, ясень).

Лінійні та кутові параметри розроблених конструкцій круглих пилок з комбінованим зубчастим вінцем наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Лінійні та кутові параметри розроблених конструкцій круглих пилок з комбінованим зубчастим вінцем

Профіль та кількість зубців	Лінійні параметри, мм								Кутові параметри, °		
	D	d	B	S	b	b_1	S_1	m_e	γ	α	λ_1
FZ/2WZ (12/24)	315	50	3,4	2,4	2,4	3,4	0,5	1,0	20	15	10
FZ1/FZ2 (18/18)	315	50	2,6	1,6	1,6	2,6	0,5	1,0	20	15	-

Отже, конструкція дослідного взірця круглої пилки *FZ1/FZ2* [93] має такі параметри: $D = 315$ мм, $S = 1,6$ мм, $z_{заг} = 36$ (*FZ1/FZ2* = 18/18) шт, $b_{np} = 2,6$ мм, $m_e = 1,5$ мм.

3.4 Особливості технології виготовлення пилок з комбінованим зубчастим вінцем

Аналіз креслення деталі. За своїм технологічним призначенням деталь є твердосплавною круглою пилкою для розпилювання деревини, що виготовлена із гарячекатаної листової сталі [52].

Дана заготовка має розміри 325x325x2,6 мм. Діаметр готової пилки $\varnothing 315$ мм, а товщина 2,4 мм. На корпусі пилки напаяно твердосплавні пластини двох видів, перші з яких мають пряму грань і є вищими від наступних на 1,0 мм, а за шириною рівні товщині тіла пилки, другі мають скошену грань, а за шириною рівні ширині пропилу. Під час взаємодії з розпилюваним матеріалом перший зубець зарізає в деревині слід товщиною 2/3 товщини пропилу, а два інші зубці розширюють пропил та здійснюють зачищення.

Шорсткість бокових та передніх поверхонь твердосплавних пластин становить $R_a = 0,4$ мкм.

Вибір заготовки. Заготовка – предмет виробництва, з якої зміною форми, розмірів, шорсткості поверхні та властивостей матеріалу виготовляють деталь. Для виготовлення пилки вибираємо лист гарячекатаної сталі 75 Cr1 (DIN EN 10029) [53].

Хімічні властивості та параметри термічного оброблення легованої сталі 75 Cr1 наведено в табл. 3.2 і табл. 3.3 відповідно.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сталі 75 Cr1 згідно DIN EN 10029

C, (%)	Si, (%)	Mn, (%)	P, (%)	S, (%)	Cr, (%)
0,70-0,80	0,25-0,50	0,60-0,80	max 0,030	max 0,030	0,30-0,40

Таблиця 3.3 – Параметри термічного оброблення сталі 75 Cr1

Твердість Гаряче- катаної сталі, HBS	Твердість Холодно- катаної сталі, HBS	Темпера- тура по- переднього нагрівання, °C	Температура гартування, °C		Час витрим- ки, хв	При темпе- ратурі °C	Твер- дість після від- пуску, HRC
			соля- ними	повіт- рям			
235	262	788	1191	1204	5-15	522	60

Механічні властивості сталі 75 CR1 згідно DIN EN 10029:

- границя текучості $\sigma_T = 415$ МПа;
- границя міцності $\sigma_B = 520$ МПа.

На сьогодні сталь 75Cr1 широко застосовується для виготовлення круглих, рамних і стрічкових пилок такими провідними виробниками дереворізального інструменту, як FABA, Walter (обидва Польща), Swedex (Швеція), Pilana (Чехія), Leitz (Німеччина) та інші.

Для виготовлення круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем FZ/2WZ вибираємо лист гарячекатаної сталі 75 Cr1 (DIN EN 10029).

Дана заготовка має розміри 325x325x2,6 мм.

Хімічні властивості та параметри термічного оброблення легової сталі 75 Cr1 наведено в табл. 3.2 і табл. 3.3.

Припуск на вирізання диска Ø 325 мм пилки складає 10 мм по його радіусу. Припуск на шліфування диска становить 0,1 мм.

Вибір баз. У процесі виготовлення твердосплавної круглої пилки на різних операціях бази будуть різними (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Вибір баз на різних етапах виготовлення

Операція	База
1. Вирізання диска лазером	Одна із площин заготовки
2. Вальцювання диска	Посадковий отвір
3. Шліфування диска	Одна із площин диска
4. Контроль площинності диска	-
5. Термічне оброблення диска	-
6. Напаювання твердосплавних пластин	Посадковий отвір
7. Піскоструминне оброблення	-//-
8. Калібрування зубців пилки	-//-
9. Загострювання зубців пилки	-//-
10. Проковування диска	Одна із площин диска
11. Контроль площинності диска пилки	-
12. Контроль кутових параметрів зубців пилки	-
13. Візуальний контроль якості виготовлення круглої пилки	-
14. Маркування пилки	Посадковий отвір

Маршрут оброблення деталі.

Вибираємо послідовність технологічних операцій, інструменти та пристрої.

Технологічний процес виготовлення твердосплавної круглої пилки наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Технологічний процес виготовлення круглої пилки

№ п/п	Назва операцій	Обладнання	Оснащення	Робочий інструмент
005	1. Вирізання диска лазером			
005	Встановити заготовку на столі верстата для лазерного різання 1. Вирізання посадкового і кріпильних отворів 2. Вирізання радіальних отворів 3. Нарізання зубчастого вінця пилки	Верстат для лазерного різання марки LTC75 (фірми LIMO, Німеччина)	Стіл магнітний	Лазерний промінь $N_{пр}=1000$ Вт
010	2. Вальцювання диска			
	Встановити диск на шпindelь верстата 1. Вальцювання диска на відстані 80-100 мм від периферії на всій довжині кола.	Верстат для вальцювання круглих пил марки ПВ28М	Змінний шпindelь	Вальцювальний ролик $d=70$ мм
015	3. Шліфування диска			
	Покласти диск на стрічковий конвеєр верстата 1. Шліфування диска по всій площині з обох боків.	Двосторонній шліфувальний верстат	-	Шліфувальна шкурка
020	4. Контроль площинності диска			
	Однією рукою нахилити диск під кутом 45° , а іншою прикласти перевірну лінійку.	-	-	Лінійка перевірна ЛД-1-450 ДСТУ8982:2020

продовження табл. 3.5

№ п/п	Назва операцій	Обладнання	Оснащення	Робочий інструмент
025	5. Термічне оброблення диска			
	Покласти диск у електропіч камерного типу для термічного оброблення 1. Охолодження диска у охолоджуючій рідині.	Камерна електропіч СНЗ-7.12.5/12	-	Охолоджуюча рідина: олива (t=50...60 С);
030	6. Напаювання твердосплавних пластин			
	Установ А Встановити і закріпити диск на валу верстата. 1. Напаювання твердосплавних паластин довжиною 10 мм на різальні зубці пилки. 2. Напаювання твердосплавних пластин довжиною 9 мм на проміжні зубці Установ Б Встановити диск на столі 1. Напаювання твердосплавних пластин довжиною 60 мм у радіальних прорізах пилки.	Верстат для напаювання твердосплавних пластин на зубці круглих пил марки SEK (фірми Arti Bileme) -//-	Вал для встановлення пилки; стіл для напаювання пластин Спеціальний стіл для встановлення пилки	Індуктор Рухомий індуктор

№ п/п	Назва операцій	Обладнання	Оснащення	Робочий інструмент
035	7. Піскоструминне оброблення зубчастого вінця			
	Встановити і закріпити диск на валу піскоструминної установки 1. Зачищення швів напаявання твердосплавних пластин.	Піскоструминна установка УГПМ	-	Спеціальний пісок, стиснуте повітря
040	8. Калібрування твердосплавних різальних пластин			
	Встановити і закріпити диск на валу верстата. 1. Калібрування по ширині різальні пластини.	Верстат для загострення круглих пил марки СНСесо (фірми Vollmer)	Вал для встановлення пили; система подачі охолоджуючої рідини.	Алмазний круг, Тип 12А2 (20°) 125*6*20, АС4 125/100 100% В2-01 ГОСТ 17123-90
045	9. Загострення твердосплавних різальних пластин			
	Встановити і закріпити диск на валу верстата. 1. Загострювати різальні пластини по передній поверхні. 2. Загострювати різальні пластини по задній поверхні.	Верстат для загострення круглих пил марки СНСесо (фірми Vollmer)	Вал для встановлення пили; система подачі охолоджуючої рідини.	Алмазний круг, Тип 12А2 (20°) 125*6*20, АС4 125/100 100% В2-01 ГОСТ 17123-90
050	10. Проковування диска пилки			
	Встановити на ковадло. 1. Наносити удари правильним молотком згідно схеми проковування.	-	Ковадло для правлення круглих пил ВЗ-479.90.02	Правильний молоток ПИ-41

продовження табл. 3.5

№ п/п	Назва операцій	Обладнання	Оснащення	Робочий інструмент
055	11. Контроль площинності диска пилки			
	Встановити пилку в горизонтальному положенні на трьохопорний пристрій. 1. Прикласти зверху перевірну лінійку і заміряти щупами величину зазору.	-	Трьохопорний пристрій	Лінійка перевірна ЛД-1-450 ДСТУ8982:2020; Набір щупів №4
060	12. Контроль кутових параметрів зубців пилки			
	Покласти пилку на стіл 1. Приставити кутомір до зубця і виміряти передній і задній кути трьохп'яти зубців пилки.	-	-	Кутомір універсальний 127 (УН)
065	13. Візуальний контроль якості виготовлення пилки			
065	Візуально перевірити наявність дефектів на виготовленій деталі.	-	-	-
070	14. Маркування пилки			
	Встановити пилку на лазерний верстат. 1. Гравіювання основних технічних параметрів пилки.	Верстат лазерного гравіювання LTG5 фірми LIMO	-	-

На основі розробленої технології виготовлення круглих пилок із комбінованим зубчастим вінцем *FZ/2WZ* та *FZ1/FZ2* для поздовжнього розпилювання деревини було виготовлено дослідні взірці таких пилок на ПП “Іннатекс” (м. Кам’янець-Подільський,

Україна) , що забезпечило проведення експериментальних досліджень процесу пиляння для підтвердження ефективності застосування пилок із комбінованим зубчастим вінцем.

3.5 Висновки до третього розділу

1 Розроблено нові конструкції круглих пилок з комбінованим зубчастим вінцем *FZ/2WZ* та *FZ1/FZ2* для поздовжнього розпилювання деревини, що забезпечують підвищення точності та зниження енергоємності процесу пиляння.

2 Розроблено технологію та виготовлено дослідні взірці двох круглих пилок з комбінованим зубчастим вінцем, що дозволило провести експериментальні дослідження з метою підтвердження ефективності їхнього застосування на круглопилкових верстатах.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПИЛЯННЯ ПИЛКАМИ ІЗ КОМБІНОВАНИМ ВІНЦЕМ

4.1 Дослідження точності процесу пиляння пилкою *FZ/2WZ*

4.1.1. Розроблення плану експерименту з багатьма чинниками

Метою проведення експериментальних досліджень є підвищення точності поздовжнього розпилювання деревини шляхом вдосконалення конструкції круглої пилки. За методикою [55, 56] визначено основні чинники впливу на точність розпилювання деревини круглими пилками. На основі аналізу чинників впливу на точність поздовжнього пиляння круглими пилками та результатів попередніх досліджень точності розпилювання пиломатеріалів у вигляді дощок на круглопилкових верстатах [23], вибрано такі змінні чинники: швидкість подавання (V_s , м/хв); висота пропилу (H , мм), порода деревини, що характеризується коефіцієнтом породи (k).

Показниками оцінювання прийнято величину поля розсіювання розмірів ширини виготовлених брускових деталей. Під час проведення експериментальних досліджень треба встановити залежність

$$\pm \omega = f(V_s, h, k_n); \quad (4.1)$$

На основі аналізу області визначання кожного з чинників визначено області інтересу зміни їх значень, які наведено в табл. 4.1.

Розроблення математичного плану експерименту з багатьма чинниками здійснюємо з урахуванням вибору загального вигляду математичної моделі [57]. В більшості випадків під час дослідження процесів механічного оброблення деревини зв'язок між чинниками і вихідними параметрами з достатньою точністю можна описати рівнянням другого порядку.

Таблиця 4.1 – Визначення області інтересу основних чинників впливу на точність пиляння

Назва чинника	Позначення	Одиниця виміру	Значення			
			Область визначення		Область інтересу	
			min	max	min	max
Швидкість подавання	V_s	м/хв	8	24	8	24
Висота пропилу	h	мм	20	60	20	60
Коефіцієнт породи деревини	k	-	1,0	1,5	1,0	1,5

Загальний вигляд рівняння регресії другого порядку в кодових значеннях із трьома чинниками має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2, \quad (4.2)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Для планування експерименту вибираємо ортогональний план другого порядку, оскільки він має порівняно високі характеристики точності коефіцієнтів рівняння регресії. Особливістю ортогонального плану є те, що зоряне плече у всіх випадках дорівнює одиниці (1).

Загальна кількість дослідів ортогонального плану визначається за формулою

$$N = 2^k + 2k + 1, \quad (4.3)$$

де k – кількість чинників.

Зв'язок між кодовими і натуральними значеннями чинників можна описати залежністю

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (4.4)$$

де X_i – кодове значення чинника; x_i – натуральне значення чинника; x_{0i} – натуральне значення чинника на середньому рівні; Δx_i – інтервал зміни чинника, який визначають як половину різниці між натуральними значеннями верхнього та нижнього рівнів чинника.

Отже, для отримання регресійної залежності величини поля розсіювання та потужності на різання від трьох визначених чинників впливу, експеримент спланований за ортогональним планом другого порядку для трьох чинників, який передбачає проведення 16 дослідів.

З метою встановлення достовірності отриманих результатів методом статистичного оброблення [56] було визначено, що кожен з дослідів потрібно повторити три рази.

Оброблення результатів реалізації математичного плану експерименту виконувалось за допомогою застосовної програми КоefRR 7.0 [57]. Програма розроблена в середовищі MS Excel, призначена для оброблення результатів експерименту із трьома чинниками, виконаного на основі математичного планування за ортогональним планом другого порядку. На початку програми розміщено матрицю ортогонального плану другого порядку для $k=3$ в кодових значеннях, виділено комірки для вводу вхідних даних і трьох значень дублювання кожного дослідів. Далі програма розраховує і показує значення коефіцієнтів рівняння регресії для чинників у кодових і натуральних значеннях та відображає результати перевірки відновленості результатів дослідів за допомогою критерію Кохрена, оцінки значимості кожного із коефіцієнтів рівняння регресії та перевірки адекватності рівняння шляхом порівняння розрахункового значення критерію Фішера із табличним.

Застосовна програма КоefRR 7.0 дозволяє в автоматичному режимі виконувати оброблення результатів експерименту із багатьма чинниками з метою одержання рівняння регресії та графічних залежностей у вигляді діаграм «Поверхня». Забезпечення програмою графічного відображення результатів дослідження у вигляді діаграм забезпечує наочність та можливість детального аналізу отриманих функціональних залежностей.

4.1.2 Експериментальна установка і вимірювальні прилади

Дослідження проводили у лабораторних умовах на круглопилковому верстаті ЦДК4-2 (рис. 4.1 а) із застосуванням дослідного взірця круглої пилки типу *FZ/2WZ* (12/24) (рис. 4.1 б).



а

б

а – верстат ЦДК4-2; б – кругла пилка типу *FZ/2WZ* (12/24)

Рисунок 4.1 – Експериментальна установка

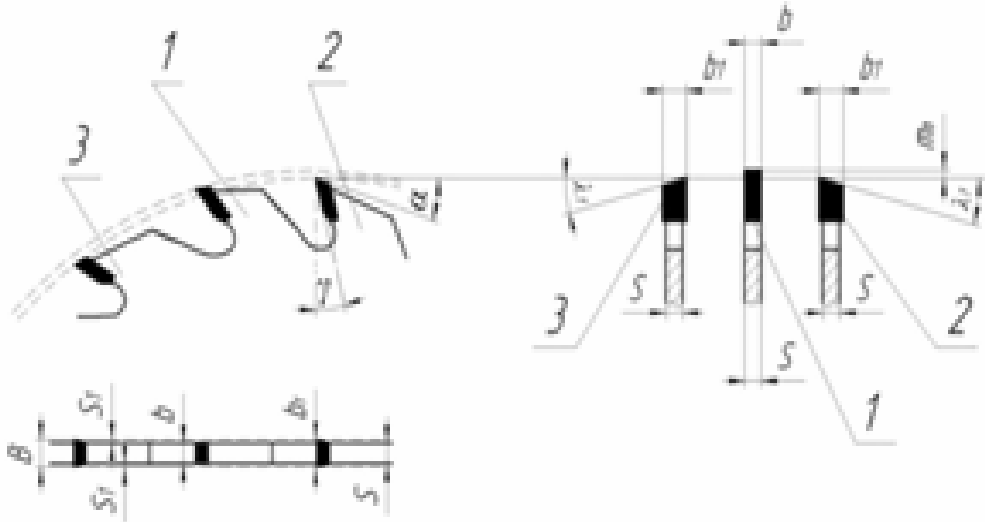
Дослідний взірець пилки (рис.4.2) виготовлено на основі розроблених технічних рішень, на ПП “Іннатекс” (м. Кам’янець-Подільський, Україна).

Перед проведенням експерименту виконано перевірку лінійних та кутових параметрів дослідного взірця пилки, результати якої засвідчили, що дані показники відповідають нормативним технічним умовам [38]. Експериментальні дослідження проведено за наступних умов. Постійними чинниками виступали, вологість деревини, яка становила 20% та швидкість різання, рівна 50 м/с.

Засоби вимірювання вибирали залежно від величини допуску на оброблення та допуску похибки вимірювання встановленої ДСТУ ГОСТ 8.051:2009, згідно якого допуск похибки вимірювання не повинен перевищувати 20 % від допуску на оброблення [58].

Оскільки згідно ДСТУ EN 336:2003 допуск поперечних розмірів пиломатеріалів становить $\pm 1,0$ мм, то допуск похибки вимірювання

повинен бути меншим за 0,2 мм. Отже, для забезпечення якісного проведення експерименту для вимірювання можна застосовувати електронний штангенциркуль марки ШЦЦ-1-125 з похибкою вимірювання 0,01 мм.



a

Профіль та (к-сть) зубц.	Лінійні параметри, мм								Кутові параметри, °		
	D	d	B	S	b	b ₁	S ₁	m ₂	γ	α	λ ₁
FZ /2WZ (12/24)	315	50	3,4	2,4	2,4	3,4	0,5	1,0	20	15	10

б

a – ескіз зубчастого вінця пилки FZ/2WZ; б – кутові та лінійні параметри; S – товщина полотна пилки, S₁ – виступ твердосплавних пластин відносно торця корпусу, b – ширина прорізного зубця, b₁ – ширина зачисного зубця, B – ширина пропилу, γ – передній кут, α – головний задній кут, λ₁ – кут нахилу головної задньої поверхні по відношенню до торцевої поверхні корпусу, 1 – прорізний зубець (Fz); 2 – зачисний лівий зубець (Wz); 3 – зачисний правий зубець (Wz)

Рисунок 4.2 – Дослідний взірець пилки FZ/2WZ

Для вимірювання розмірів пиломатеріалів з високою точністю, розроблено конструкцію спеціального пристрою (рис. 4.3 а), із застосуванням цифрового індикатора ТИП ИЧЦ(3)-25 фірми Мікротех (рис. 4.3 б), що також містить цифровий відліковий пристрій, з похибкою вимірювання 0,01 мм [59].



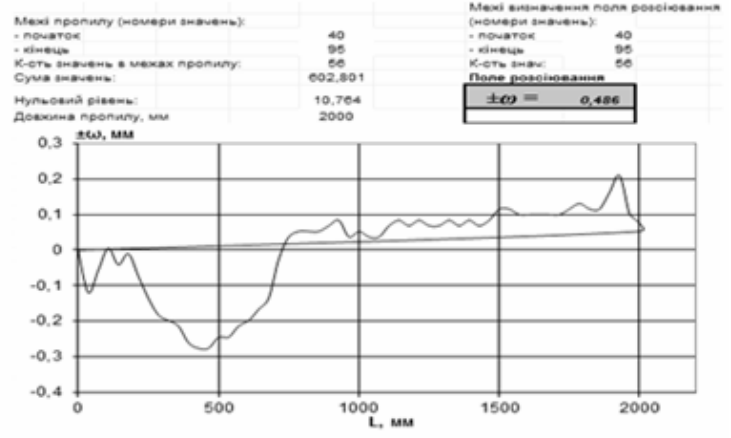
а

б

в



г



д

а – дослідна установка; б – індикатор числовий трикнопковий з дискретністю підрахунку 0,01 мм, ИЧЦ(3)-25-0,01; в – спеціальна ніжка індикатора із роликком; г – програмне забезпечення фірми МІКРОТЕХ типу УИС-Р1-СОМ; д – результати поля розсіювання розмірів

Рисунок 4.3 – Вимірювання точності розмірів бруска

Пристрій для вимірювання точності працює таким чином. Під час переміщення по базовій поверхні стола, пиломатеріал у вигляді брускової деталі, далі брусок, притискають ролики, а електронний індикатор фіксує зміну розміру його ширини. Перед вимірюванням точності пиляння брусок подається до контакту з вимірювальним приладом, де ніжка індикатора із закріпленим спеціально розробленим роликом (рис.4.3 в) опускається на вимірювальну (оброблену) поверхню бруска (див. рис. 4.3, а). Перед початком вимірювання точності пиляння, на екрані монітора запускається функційна кнопка «прочитати» і всі значення автоматично виставляються на нульовий рівень, тобто на величину розмірного налагодження.

Визначення величини параметра оцінки у кожному досліді експерименту виконували у два етапи: вимірювання відхилень обробленої площини (бокової поверхні бруска) на всій довжині за допомогою цифрового індикатора ТИП ИЧЦ(3)-25 фірми Мікротех та реєстрація результатів замірів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення ТИП УИС-Р1-СОМ (рис. 4.3, з) [60].

Результати замірів величини поля розсіювання розмірів отриманих пиломатеріалів наведено у вигляді графіків (рис. 4.3, д).

Результати замірів розмірів брускових деталей кожного досліді багаточинникового експерименту обробляли за допомогою застосовної програми GrafOrt [47]. Вимірювання швидкості подавання здійснювали шляхом замірів часу випилювання бруска. Час фіксували секундоміром з моменту початку процесу пиляння і до його завершення. Величину швидкості подавання [7] визначають за формулою

$$V_s = \frac{60 \cdot L}{1000 \cdot t} , \quad (4.5)$$

де L – довжина заготовки, мм; t – час пиляння, с.

Величину потужності на різання визначали шляхом вимірювання сили струму та напруги. Вимірювання сили струму проводили цифровим приладом УТ-231 (рис. 4.4), яким охоплювався один

провід зі знаком “+” у електричному щиті верстата. Таким чином спостерігали зміну сили струму в процесі пиляння, фіксуючи її значення. Вимірювання напруги здійснювали вольтметром, який підключали фазами до мережі живлення.



Рисунок 4.4 – Вимірювання сили струму під час виконання дослідів експерименту

Повну потужність визначали за формулою

$$N_{заг} = 3 \cdot U_{p.x.} \cdot I_{p.x.}, \quad (4.6)$$

де $U_{p.x.}$ – напруга, виміряна під час пиляння, B ; $I_{p.x.}$ – сила струму, виміряна під час пиляння, A .

Втрати потужності визначали за даними холостого ходу за формулою

$$N_{x.x.} = U_{x.x.} \cdot I_{x.x.}, \quad (4.7)$$

де $U_{x.x.}$ – напруга, виміряна під час холостого ходу верстата, B ; $I_{x.x.}$ – сила струму, виміряна під час холостого ходу, A .

Потужність на різання визначали за формулою

$$N_{різ.} = N_{заг.} - N_{x.x.}, \quad (4.8)$$

Виконання експерименту згідно наведеної методики забезпечило ефективне виконання дослідження процесу пиляння, і дало змогу отримати результати із необхідною точністю.

4.1.3 Результати точності пиляння пилкою *FZ/2WZ* та їх аналіз

Застосовуючи удосконалену конструкцію пилки з комбінованим зубчастим вінцем *FZ/2WZ* досліджено залежність точності поздовжнього розпилювання дощок від трьох основних чинників: швидкості подавання, висоти пропилу і коефіцієнта породи деревини та отримано рівняння регресії у кодових значеннях змінних чинників, що має вигляд:

$$\omega = 0,468 + 0,138X_1 + 0,053X_2 + 0,105X_3 + 0,016X_1X_3 + 0,076X_1^2 + 0,021X_2^2 + 0,0401X_3^2 \quad (4.9)$$

На основі аналізу одержаного рівняння регресії слід відмітити наступне:

- у рівняннях точності пиляння для пилки *FZ/2WZ* всі коефіцієнти лінійних членів b_1 , b_2 , b_3 мають додатне значення, отже із збільшенням величини будь-якого з трьох чинників величина поля розсіювання зростатиме, тобто точність пиляння буде знижуватись із збільшенням величин;

- порівнюючи співвідношення величин лінійних коефіцієнтів, слід відмітити, що найбільше значення має коефіцієнт $b_1 = 0,468$, тобто перший чинник – швидкість подавання, має найбільший вплив на точність пиляння.

Коефіцієнт $b_3 = 0,105$ має менший вплив всього на 24 %, тобто порода деревини також має значний вплив на точність пиляння. А коефіцієнт $b_2 = 0,053$ менший від b_1 і b_3 відповідно у 2,5 і 2,0 рази, тобто висота пропилу має найменший вплив на точність пиляння під час її зміни у межах 20...60 мм;

- якщо значення всіх чинників будуть на нульовому рівні, то величина поля розсіювання відповідає значенню вільного члена рівняння, тобто під час пиляння пилкою *FZ/2WZ* рівна $\pm 0,468$ мм;

- мінімального значення поля розсіювання під час процесу поздовжнього пиляння можна досягти за умови мінімальних значень усіх чинників впливу. Із зростанням величини кожного з чинників точність пиляння знижується;

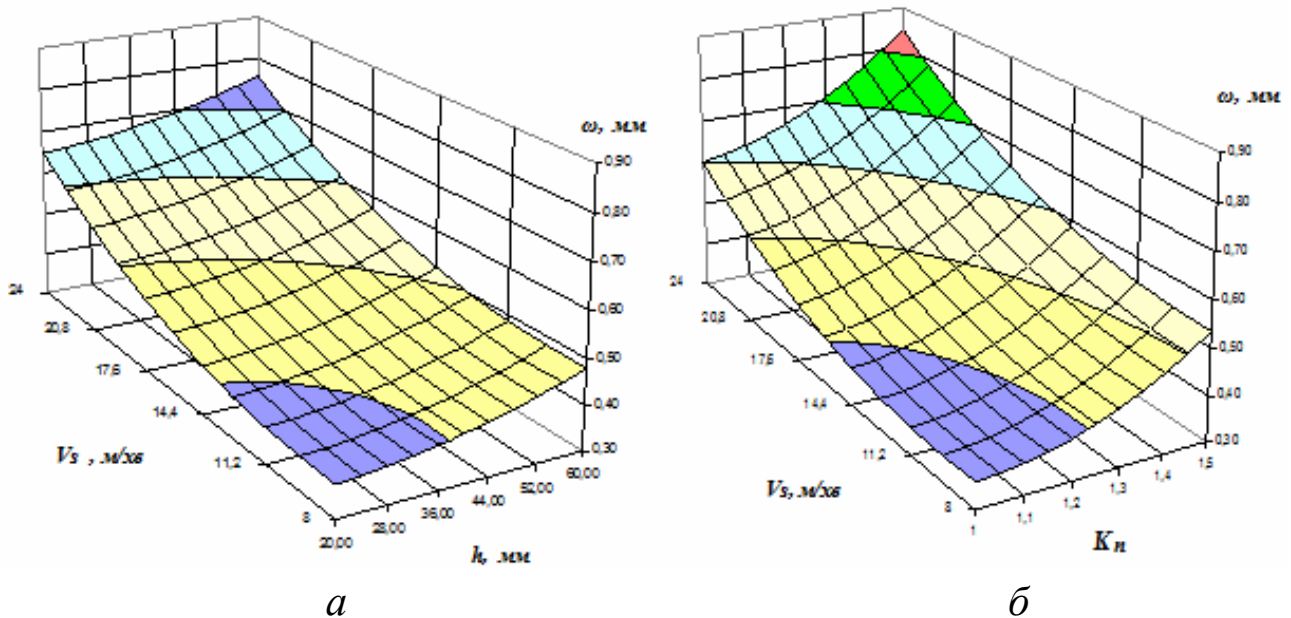
- наявність у рівнянні додатних коефіцієнтів b_{11} , b_{22} , b_{33} свідчить про увігнуту параболічну залежність поля розсіювання від кожного з чинників;

- наявність коефіцієнта парної взаємодії b_{13} свідчить про існування взаємовпливу чинників, тобто збільшення швидкості подавання (X_1) або породи деревини (X_3) від -1 до $+1$ призводить до збільшення їх впливу на величину коефіцієнта $b_{13} = 0,053$.

За допомогою програми КоefRR 7.0 [57] отримано також регресійну модель точності пиляння у натуральних значеннях чинників, що має вигляд:

$$\omega = 1,122 - 0,031V_s - 1,31E^{-3} \cdot h - 1,334k_n + 8,21E^{-3} \cdot V_s \cdot k_n + 1,19E^{-3} \cdot V_s^2 + 4,936E^{-5} \cdot h^2 + 0,649k_n^2 \quad (4.10)$$

На основі рівняння регресії (4.10) побудовано тривимірні графічні залежності точності пиляння від трьох чинників впливу (рис. 4.5 а, б), які дозволяють наочно аналізувати характер впливу кожного із чинників.



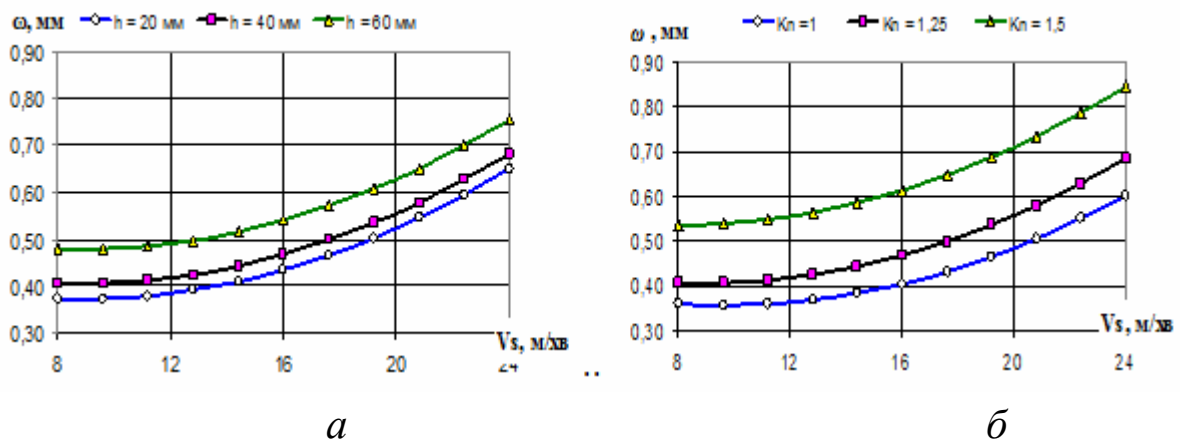
a – для $k_n = 1,25$ (береза); $б$ – для $h = 40$ мм

Рисунок 4.5 – Залежності точності пиляння від швидкості подавання висоти пропилу та породи деревини

Для детального аналізу одержаного рівняння регресії (4.10) побудовано графічні залежності точності пиляння від кожного із чинників впливу. На рис. 4.6 *а* наведені графіки залежності $\pm\omega = f(V_s)$ для трьох рівнів значень висоти пропилу, яка має чітко виражений квадратичний характер. Збільшення висоти пропилу призводить до збільшення поля розсіювання, проте характер залежності точності розпилювання від швидкості подавання при цьому не змінюється.

На рис. 4.6 *б* наведені графіки залежності $\pm\omega = f(V_s)$ для трьох рівнів значень породи деревини. Вплив породи деревини на точність розпилювання, як і висоти пропилу, має параболічний характер. Під час розпилювання м'якої породи ($k_n=1$), точність підвищується і навпаки: твердої ($k_n=1,5$) – знижується.

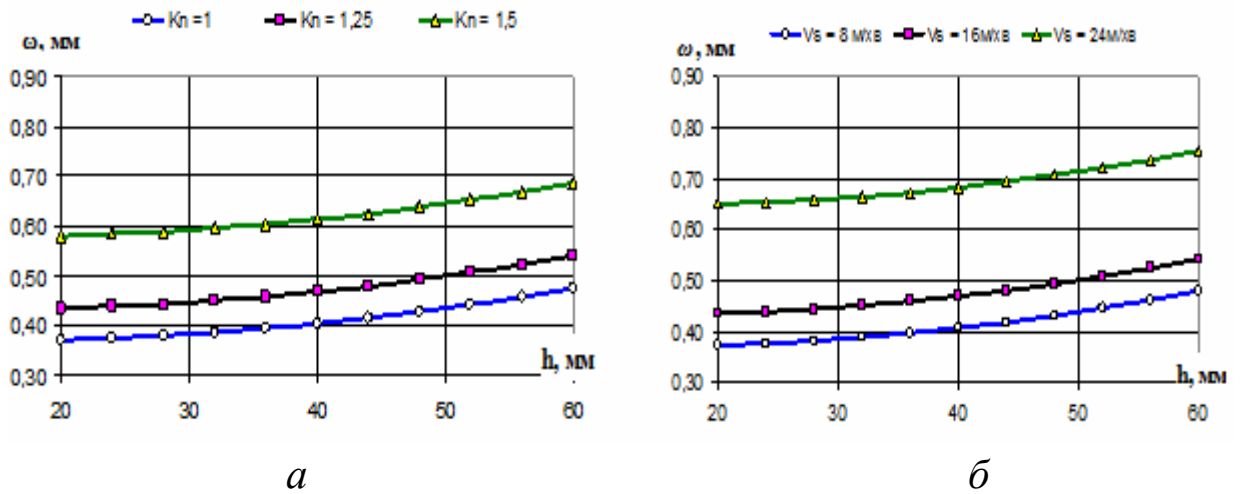
Порода деревини має у 1,3 рази менший вплив на величину поля розсіювання розміру обробляння, ніж швидкість подавання, проте майже у 2,0 рази має більший вплив ніж висота пропилу.



а – для $k_n = 1,25$ (береза); *б* – для $h = 40$ мм

Рисунок 4.6 – Залежність точності пиляння від швидкості подавання

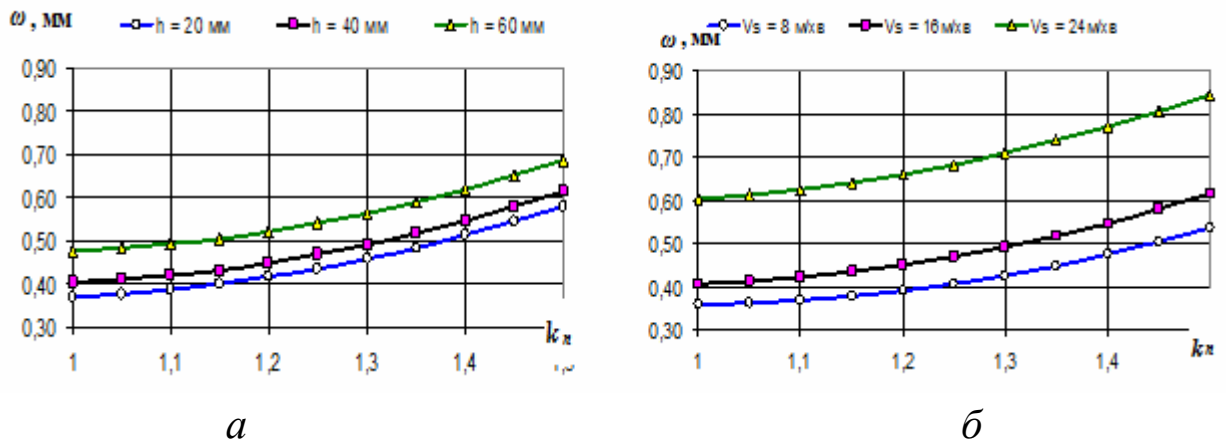
Залежність величини поля розсіювання розмірів від висоти пропилу також має квадратичний характер (рис. 4.7 *а, б*), при чому ступінь впливу цього чинника залежить від дії швидкості подавання. Під час збільшення швидкості подавання в межах 8 – 24 м/хв (див. рис. 4.7 *б*), точність знижується у 2,3 рази, тобто поле розсіювання збільшується від 0,35 до 0,75 мм і має пряму параболічну залежність.



a – для $V_s = 16$ м/хв; *б* – для $k_n = 1,25$

Рисунок 4.7 – Залежність точності пиляння від висоти пропилу

На рис. 4.8 *a, б* наведено графічні залежності $\pm\omega=f(K_n)$ для трьох рівнів значень швидкості подавання і породи деревини. Із збільшенням твердості деревини поле розсіювання збільшується від 0,38 до 0,85 мм і має пряму параболічну залежність, при чому ступінь впливу цього чинника також залежить від дії швидкості подавання. Під час збільшення швидкості подавання в межах 8–24 м/хв (див. рис. 4.8 *б*) поле розсіювання збільшується до 0,85 мм, тобто точність знижується у 2,3 рази і має пряму параболічну залежність.



a – для $V_s = 16$ м/хв; *б* – для $h = 40$ мм

Рисунок 4.8 – Залежність точності пиляння від породи деревини

Результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність застосування круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$, а також свідчать, що точність розпилювання знаходиться у межах $\pm 0,35 \dots 0,85$ мм, що відповідає вимогам діючих стандартів ($\pm 1,0$ мм).

На основі отриманих результатів дослідження встановлено, що для забезпечування високої точності поздовжнього пиляння $\pm 0,5$ мм; за умови висоти пропилу $h_{np} = 60$ мм і породи сосни, раціональними будуть режими роботи верстата на швидкості подавання $V_s = 10$ м/хв.

4.1.4 Результати енергоємності процесу поздовжнього пиляння пилкою $FZ/2WZ$

Результатом експерименту дослідження енергоємності процесу поздовжнього пиляння пилкою $FZ/2WZ$, виконаного за ортогональним планом другого порядку отримано регресійну залежність потужності різання від трьох змінних чинників у кодових значеннях, що має вигляд:

$$N_p = 1,882 + 0,549 X_1 + 0,135 X_2 + 0,437 X_3 + 0,064 X_1 X_3 + 0,264 X_1^2 + 0,0223 X_2^2 + 0,165 X_3^2 \quad (4.11)$$

На основі аналізу рівнянь регресії (4.11) для потужності різання слід відмітити:

- коефіцієнти лінійних членів b_1, b_2, b_3 мають додатне значення, отже із збільшенням величини будь-якого з чинників величина потужності різання зростатиме;

- найбільший вплив на потужність різання має швидкість подавання ($b_1 = 0,54$), трохи менший вплив має порода деревини ($b_3 = 0,437$) і найменший – висота пропилу ($b_2 = 0,135$);

- якщо значення всіх чинників знаходитимуться на основному рівні, величина потужності різання під час пиляння становитиме

відповідно 1,9 кВт, що відповідає значенню вільного члена одержаного рівняння;

- мінімального значення потужність різання може досягти при мінімальних значеннях всіх чинників: швидкості подавання, висоти пропилю та породі сосни, а максимальне значення потужності буде відповідно при максимальних значеннях швидкості подавання, висоти пропилю та породі дуб;

- наявність коефіцієнта b_{12} свідчить про існування взаємовпливу чинників, тобто зміна швидкості подавання призводить до підсилення впливу висоти пропилю, так як коефіцієнт b_{12} із знаком «плюс»;

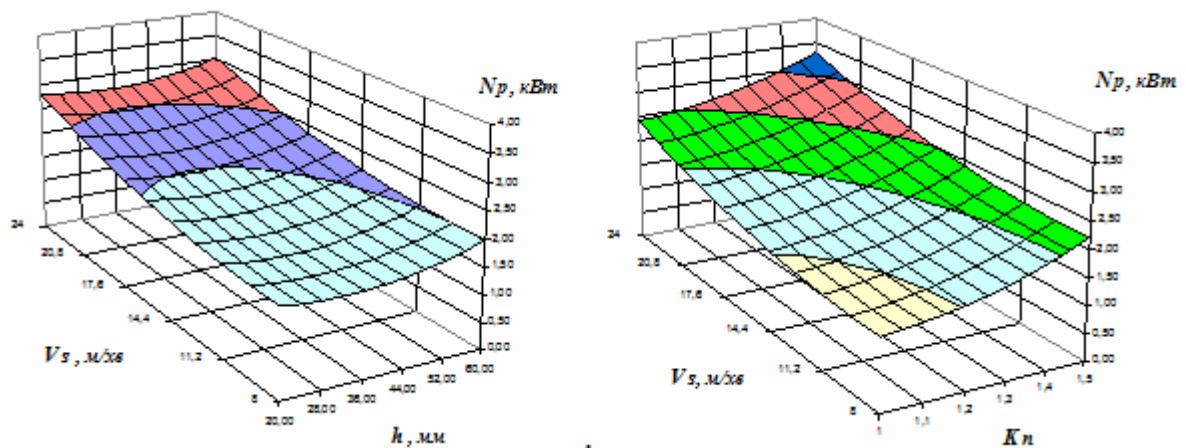
- наявність у рівняннях коефіцієнтів b_{11} , b_{22} , b_{33} свідчить про незначну параболічну залежність потужності на різання від всіх трьох чинників.

Регресійна залежність потужності на різання від змінних чинників у натуральних значеннях має вигляд:

$$N_p = 4,655 - 0,079V_s - 0,044h - 4,852k_n + 4,01E^{-4} \cdot V_s h + 0,004 \cdot V_s^2 + 5,57E^{-4} \cdot h^2 + 2,640k_n^2 \quad (4.12)$$

Рівняння регресії в натуральних значеннях чинників дають можливість побудувати діаграми залежності потужності різання від чинників впливу (рис. 4.9), за якими можна провести наочний аналіз результатів дослідження.

Аналізуючи наведені графічні залежності варто зазначити, що потужність на різання під час процесу пиляння вдосконаленою конструкцією круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$ порівняно із звичайною пилкою із зубцями FZ [103] є до 30% нижчою.



a *б*
a – для $k_n = 1,25$ (береза); *б* – для $h = 40$ мм

Рисунок 4.9 – Залежності потужності на різання від швидкості подавання, висоти пропилу та породи деревини

Також варто зазначити, що під час пиляння пилкою *FZ/2WZ* характер залежності впливу всіх трьох чинників зберігається порівняно із класичними конструкціями пилок, тобто із зростанням швидкості подавання, висоти пропилу і твердості деревини потужність на різання зростає, а точність пиляння знижується.

4.2 Результати дослідження точності пиляння пилкою *FZ1/FZ2*

Результати експерименту, виконаного за ортогональним планом другого порядку згідно розробленої методики (див. п. 4.1.1), оброблено за допомогою застосовної програми *GrafOrt* [47], що дає змогу отримати рівняння регресії в кодових і натуральних значення змінних чинників, а також графічні залежності у вигляді діаграм *3D* і графіків *2D*. Отримано рівняння регресії залежності величини поля розсіювання розмірів брусківих деталей у кодових значеннях, що має вигляд:

$$\omega = 0,69 + 0,25X_1 + 0,12X_2 + 0,04X_1X_2 + 0,10X_1^2 - 0,04X_2^2 \quad (4.13)$$

Рівняння регресії в натуральних значеннях чинників має наступний вигляд:

$$\omega = 0,566 - 0,037V_s + 0,008h + 0,001V_s^2 - 0,9 \cdot 10^{-4}h^2 + 0,2 \cdot 10^{-3}V_s h \quad (4.14)$$

Рівняння регресії в натуральних значеннях чинників дають можливість побудувати графічні залежності поля розсіювання розмірів виготовлених деталей від змінних чинників впливу, за якими можна провести більш детальний аналіз.

Використовуючи рівняння регресії у натуральних значеннях, отримане за допомогою застосовної програма GrafOrt [47], побудовано графіки 2D впливу швидкості подавання та висоти пропилю на величину поля розсіювання під час пиляння круглою пилкою FZ_1/FZ_2 (рис. 4.10, 4.11).

Із графіків залежності величини поля розсіювання розмірів брусків деталей, виготовлених під час пиляння пилкою нової конструкції від швидкості подавання (див. рис. 4.10) видно:

- тільки за мінімальних значень чинників впливу (висоти пропилю і швидкості подавання) забезпечується допустима похибка розсіювання розмірів $\pm 0,5$ мм і становить 0,43мм, а зі збільшенням швидкості подавання від 24 до 36 м/хв похибка зростає до 0,86 мм та знаходиться у межах $\pm 1,0$ мм.

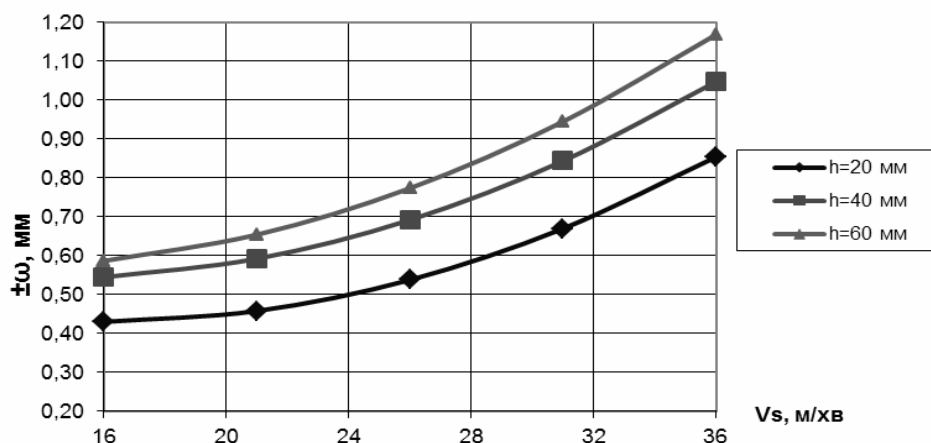


Рисунок 4.10 – Залежність величини поля розсіювання від швидкості подавання під час пиляння пилкою FZ_1/FZ_2

При збільшенні будь якого з факторів параметр поля розсіювання лише зростатиме і при максимальних значеннях більш ніж у два рази перевищує допустиме значення допустимої похибки розмірів $\pm 0,5$ мм.

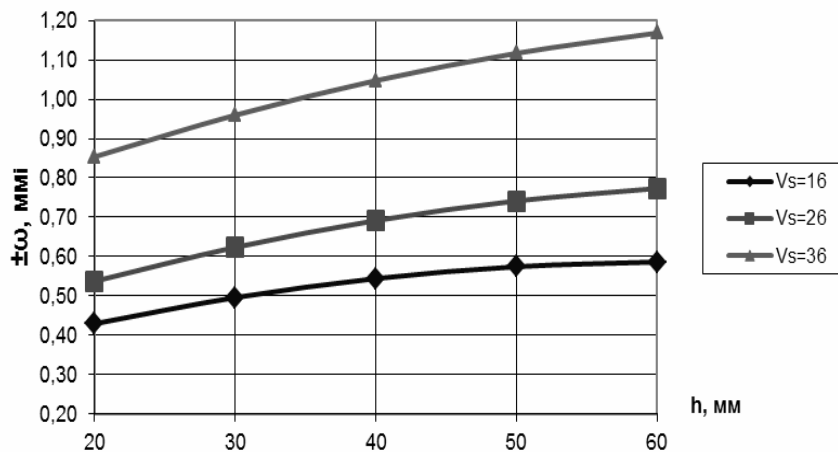


Рисунок 4.11 – Залежність величини поля розсіювання від висоти пропилу під час пиляння пилкою із комбінованим з вінцем FZ_1/FZ_2

Із графіків залежності величини поля розсіювання розмірів брускових деталей, виготовлених під час пиляння пилкою FZ_1/FZ_2 , від висоти пропилу (див. рис. 4.11) встановлено:

- за мінімального значення швидкості подавання 16 м/хв і зміні висоти пропилу у межах 20...30 мм забезпечується допустима похибка розсіювання розмірів ($\pm 0,5$ мм), але далі за найменшого збільшення будь-якого із чинників впливу значення параметра поля розсіювання перевищуватиме значення допустимої похибки;

- за максимального значення швидкості подавання 36 м/хв і зміні висоти пропилу у межах 20...35 мм забезпечується похибка розсіювання розмірів $\pm 1,0$ мм, що не відповідає вимогам;

- за максимальних значень двох чинників впливу параметр поля розсіювання розмірів перевищує значення похибки $\pm 0,5$ мм у 2,4 рази.

За рівнянням регресії у натуральних значеннях побудовано залежності впливу швидкості подавання та висоти пропилу на величину потужності різання під час пиляння пилкою з комбінованим зубчастим вінцем FZ_1/FZ_2 (рис. 4.12 та рис. 4.13).

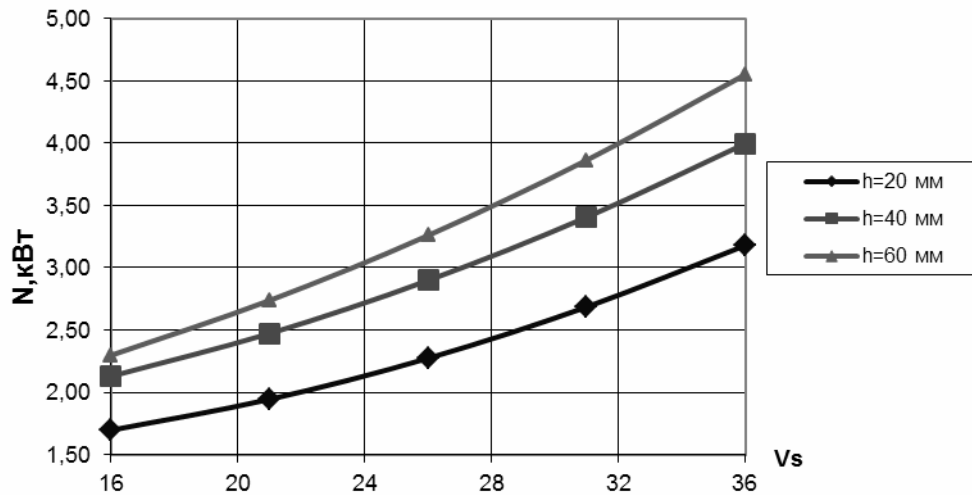


Рисунок 4.12 – Залежність величини потужності на різання від швидкості подавання під час пиляння круглою пилкою FZ₁/FZ₂

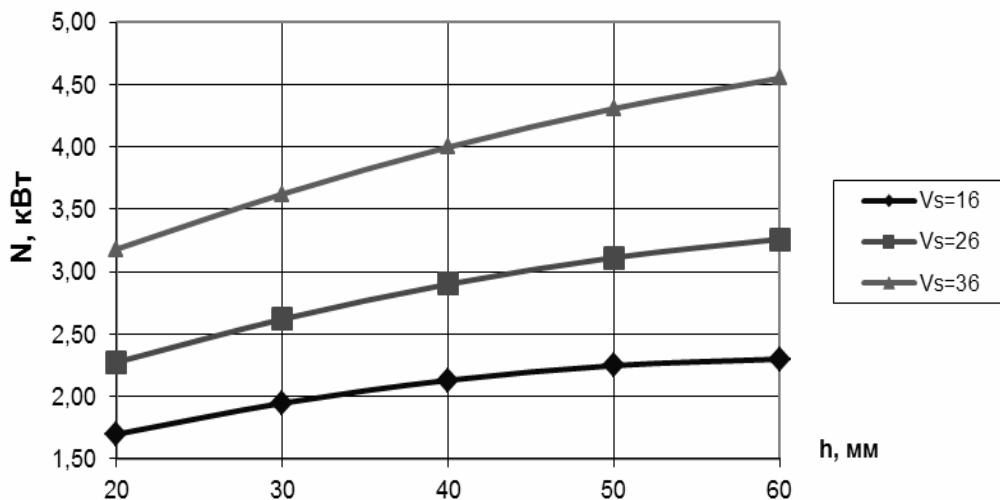


Рисунок 4.13 – Залежність величини потужності на різання від висоти пропилу під час пиляння круглою пилкою FZ₁/FZ₂

На основі аналізу графічних залежностей величини потужності різання від чинників впливу (швидкості подавання та висоти пропилу) встановлено, що вплив швидкості подавання майже у два рази більший ніж висоти пропилу, а потужність різання збільшується зі збільшенням кожного із чинників у межах 1,5 – 4,4 кВт.

Залежності потужності різання мають таку само закономірність зміни, що і поле розсіювання розмірів деталей, тобто підтверджується

теза про відповідність зміни точності пиляння зміні величини складових сили різання [61]. та існує пряма залежність цих параметрів процесу пиляння.

Із вищенаведеного аналізу видно, що нова конструкція пилки FZ_1/FZ_2 із мінімальною товщиною диска 1,6 мм та двома типорозмірами прямозагострених зубців (прорізними та формувальними), що чергуються, за мінімальних значень чинників впливу, забезпечує точність пиляння $\pm 0,5$ мм і потребує менших затрат потужності до 30 %.

Отже, результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність застосування круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем FZ_1/FZ_2 , а також доводять, що точність розпилювання знаходиться у межах $\pm 0,35 \dots 0,85$ мм, а за мінімальних значень швидкості подавання та висоти пропилу ($V_s = 16$ м/хв, $h = 30$ мм) можна досягнути точності у межах $\pm 0,5$ мм.

4.3 Дослідження зміни точності пиляння упродовж періоду тривкості пилки $FZ/2WZ$ щодо спрацювання

4.3.1 Методика дослідження точності пиляння упродовж періоду тривкості пилки щодо спрацювання

Залежність точності пиляння від ступеня затуплення різальних кромки зубців пилки досліджено за допомогою статистично-аналітичного методу, який забезпечує встановлювання величини поля розсіювання розмірів деталей.

Період тривкості щодо спрацювання для круглих пилок визначається допустимим ступенем затуплення різальних кромки зубців пилки у процесі пиляння, що оцінюється радіусом закруглення різальних кромки і становить максимум 60 мкм [7].

Дослідження проводились на круглих пилках з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$, діаметром 315 мм, з кількістю зубців $z = 36$ (12/24), кут загострювання зубців $\beta = 55^\circ$, передній кут $\gamma = 20^\circ$, задній кут $\alpha = 15^\circ$, зубці з ламаною задньою поверхнею.

Експериментальні дослідження проводились на верстаті ВК-40 для поздовжнього розпилювання дощок у виробничих умовах ТОВ „Термінал Вуд” (м. Калущ, Івано-Франківська область). Розпилювали дубові дошки товщиною, $h = 40$ мм; зі швидкістю подавання, $V_s = 16$ м/хв; частота обертання пилки, $n = 3000$ об/хв; довжина заготовки, $L = 2,5$ м; вологість деревини, $W = 25\%$; ширина пропилу, $b = 3,8$ мм.

Для встановлювання величини поля розсіювання розмірів деталей, виготовлених протягом заданого шляху різання (часу пиляння), з партії деталей відбирались бруски у кількості 10 шт., на кожному з яких проводили десять замірів, тобто отримували вибірку із 100 значень товщини брусків.

Експериментальні дослідження проводили у виробничих умовах фірми «Термінал-Вуд» (рис. 4.14) на двох однакових верстатах ВК-40 [62], на кожному з яких було встановлено гострі пилки: перша, що постійно застовується на виробництві і друга – пилка з комбінованим зубчастим вінцем $FZ/2WZ$ [48]. Шлях різання одним зубцем для круглопилкового верстата визначали за формулою:

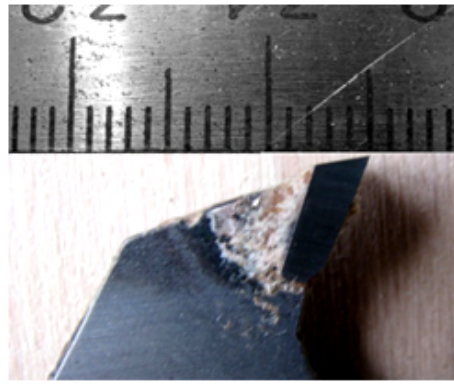
$$L_p = \frac{L \cdot l_k \cdot n \cdot 10^6}{V_s}, \quad (4.15)$$

де L – довжина заготовки, м; l_k – довжина дуги контакту, мм; n – частота обертання пилкового валу, хв^{-1} ; V_s – швидкість подавання, м/хв.

Довжину дуги контакту визначали за формулою

$$l_k = R \cdot \varphi_k, \quad (4.16)$$

де R – радіус пилки, мм; φ_k – кут контакту, рад.



a

б

a – верстат моделі ВК-40; *б* – зубець пилки

Рисунок 4.14 – Дослідження у виробничих умовах
ТОВ «Термінал-Вуд»

Кут контакту зубця пилки з матеріалом визначали за формулою

$$\varphi_{\kappa} = \arccos \varphi_{\text{вих}} - \arccos \varphi_{\text{вх}}, \quad (4.17)$$

де $\varphi_{\text{вх}}$ – кут входу зубця у матеріал, рад; $\varphi_{\text{вих}}$ – кут виходу зубця з матеріалу, рад.

Значення кутів входу і виходу визначали за відомими залежностями [2]:

$$\varphi_{\text{вх}} = \frac{x}{R}; \quad (4.18)$$

$$\varphi_{\text{вих}} = \frac{x-h}{R}, \quad (4.19)$$

де R – радіус пилки, мм; x – відстань від осі пилки до базової поверхні заготовки, мм; h – товщина матеріалу, мм.

Кут контакту круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем із заготовкою (пиломатеріалом) визначали за залежностями:

$$\varphi_{k(1)} = \arccos \varphi_{вих(1)} - \arccos \varphi_{вх(1)}, \quad (4.20)$$

$$\varphi_{k(2)} = \arccos \varphi_{вих(2)} - \arccos \varphi_{вх(2)}, \quad (4.21)$$

де $\varphi_{вх(1)}, \varphi_{вх(2)}$, – кут входу (*прорізного, зачисного*) зубця у матеріал, рад; $\varphi_{вих(1)}, \varphi_{вих(2)}$, – кут виходу (*прорізного, зачисного*) зубця з матеріалу, рад.

Значення кутів входу і виходу для прорізних і зачисних зубців рівні:

$$\varphi_{вх(1)} = \frac{x}{R + m_g}; \quad \varphi_{вх(2)} = \frac{x}{R}, \quad (4.22)$$

$$\varphi_{вих(1)} = \frac{x - h}{R + m_g}, \quad \varphi_{вих(2)} = \frac{x - h}{R}, \quad (4.23)$$

де R – радіус пилки, мм; x – відстань від осі пилки до базової поверхні заготовки, мм; h – товщина матеріалу, мм; m_g – величина виступу прорізного зубця, мм.

Для проведення дослідів пилки загострені відповідно до вимог нормативних документів. Перед початком роботи зубці на кожній пилці були пронумеровані через кожен п'ятий зубець, щоб в подальшому вимірювати радіус заокруглення одних і тих самих зубців пилки.

Для кількісного оцінювання спрацювання леза зубця пилки прийнято радіус заокруглення різальної кромки, який періодично вимірювали після виконання заданого шляху різання. Пилку знімали з верстата, вершину зубця фотографували під мікроскопом (рис. 4.15 а, б) і знову встановлювали на верстат для подальшого пиляння.



a



б

a – об'єкт-мікрометра ОМП №652295 ГОСТ 7513-55 ціна поділки 0,01мм; *б* – вершина дослідного зубця під мікроскопом

Рисунок 4.15 – Вимірювання радіуса закруглювання зубців круглої пилки

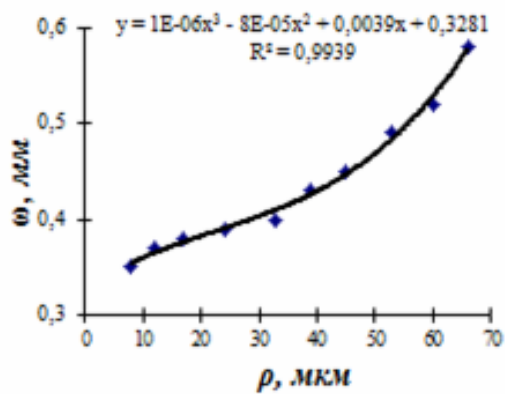
Одночасно з фотографуванням зубців пилки фотографували мікроштрих, який має відстань між поділками 0,01 мм, що дозволяє визначати розміри зубця пилки з точністю до 10 мкм. Спрацювання зубця вимірювали за одержаним фото, застосовуючи комп'ютерну програму КОМПАС [41].

4.3.2 Результати точності пиляння упродовж періоду тривкості пилки *FZ/2WZ* щодо спрацювання

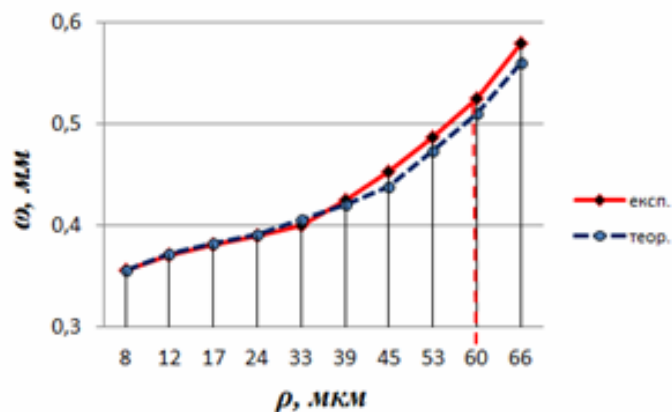
Досліджено вплив ступеня затупленості зубців пилки *FZ/2WZ* на точність пиляння та на основі регресивного аналізу отримано рівняння у вигляді полінома третього порядку, що дає змогу визначати точність обробляння впродовж періоду тривкості щодо спрацювання зубців пилки (рис.4.16 *a*).

$$\omega = 0,3281 + 0,0039\rho - 8 \cdot 10^{-5} \rho^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^3, \quad (4.24)$$

Зіставлення результатів теоретичних і експериментальних досліджень (рис. 4.16, *б*) підтверджує правильність теоретичних положень, оскільки похибка є меншою 10 %.



a



б

a – експериментальна; *б* – експериментальна і теоретична

Рисунок 4.16 – Залежність точності пиляння пилкою *FZ/2WZ* від ступеня затупленості зубців пилки

Аналізуючи отримані результати треба відзначити, що застосування нової конструкції круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем *FZ/2WZ* для поздовжнього розпилювання дощок забезпечує високу точність ($\pm 0,5$ мм) випилювання брусків завтовшки 40 мм породи сосна зі швидкістю подавання 16 м/хв упродовж всього періоду тривкості щодо спрацювання зубців пилки ($\rho \leq 60$ мкм). Забезпечення точності пиляння $\pm 0,5$ мм (тринадцятий клас підвищеного класу точності) дощок завтовшки 60 мм породи дуб можливе за умови швидкості подавання 8 м/хв.

4.4 Висновки до четвертого розділу

1 Розроблено методику експериментальних досліджень з багатьма чинниками, яка забезпечує встановлення впливу основних чинників на точність пиляння у вигляді рівняння регресії, а також перевірення ефективності застосування пилок з комбінованим зубчастим вінцем з метою підвищення точності та зниження енергоємності процесу поздовжнього розпилювання дощок.

2 Розроблено методику для вимірювання точності брускових деталей з похибкою до 0,01мм, за допомогою якої проведено

вимірювання розмірів брусків, отриманих під час проведення основного експерименту.

3 Отримано регресійні моделі для визначання точності пиляння та потужності різання пилками з комбінованим зубчастим вінцем залежно від швидкості подавання, висоти пропилю та породи деревини, які дають змогу прогнозувати точність пиляння та встановлювати раціональні режими за точністю обробляння.

4 Досліджено вплив ступеня затупленості зубців пилки *FZ/2WZ* на точність пиляння та отримано рівняння регресії у вигляді полінома третього порядку, що дає змогу визначати точність обробляння впродовж періоду тривкості щодо спрацювання зубців пилки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі теоретичних узагальнень та експериментальних досліджень розв'язано науково-прикладне завдання, що полягає у підвищенні точності поздовжнього розпилювання деревини застосуванням нової конструкції круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем. У прикладному плані розв'язання цього завдання підвищує точність розпилювання деревини круглими пилами та знижує енергоємність процесу пиляння.

1 Розроблено нові конструкції круглих пилок з комбінованим зубчастим вінцем *FZ/2WZ* та *FZ1/FZ2*, що забезпечує підвищення робочої жорсткості пилки та дає змогу розпилювати з точністю $\pm 0,5$ мм пиломатеріали завтовшки до 60 мм зі швидкістю подавання 8–24 м/хв, а також знизити енергоємність процесу пиляння на 32 % та підвищити корисний вихід деревини на 29 % (пат. № 40481, № 117606).

2 Отримано математичні моделі для визначання точності розпилювання деревини пилами з комбінованим зубчастим вінцем залежно від швидкості подавання, висоти пропилю та породи деревини, які дають змогу прогнозувати та встановлювати раціональні режими за точністю пиляння в межах $\pm 0,5$ мм.

3 Результати експериментальних досліджень засвідчили, що застосування запропонованих технічних рішень дає змогу забезпечувати точність поздовжнього розпилювання деревини $\pm 0,5$ мм, за умови роботи верстата на раціональних режимах ($V_s \leq 16$ м/хв, $H \leq 60$ мм – для породи сосна, береза; $V_s \leq 8$ м/хв, $H \leq 60$ мм – для породи дуб) у продовж всього періоду тривкості пилки щодо спрацювання зубців ($\rho \leq 60$ мкм).

4 Технічну новизну конструкційних розробок захищено двома патентами на корисну модель. Результати досліджень упроваджено ПП «Іннатекс» (м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл.) ТОВ «ФАКРО Львів» (м. Львів) та ТОВ „Термінал Вуд” (м. Калуш). – конструкції круглих пилок з комбінованим зубчастим вінцем. Економія від упровадження результатів досліджень на круглопилковому верстаті позиційного типу марки ВК-40 [62] становить 54938 грн/рік.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пінчевська, О. О. (2016). Актуальні напрями розвитку деревообробної промисловості в Україні. [Електронний ресурс]. Національний університет водного господарства та природокористування. – Режим доступу: <https://bit.ly/3KBwITS> (21.01.2022). – Назва з екрану.
2. Кірик М. Д. Механічне оброблення деревини та деревних матеріалів. Підручник для вищих навчальних закладів. Львів: Кольорове небо, 2006. 412 с.
3. Новітні технології обробки деревини – якість меблевого щита. [Електронний ресурс]. Сайт компанії ДП «Стрийлісопродукт». – Режим доступу: <https://bit.ly/3rLE6Dr> (21.01.2022). – Назва з екрану.
4. Коширець С. І., Грицюк Ю. І. Аналіз технологій виготовлення заготовок клеєного бруса для потреб столярного виробництва. *Наук. вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. праць. Львів: 2010. Вип. 20.2. 87 – 91с.
5. Розкрій масиву: одна пилка – добре, а багато – краще. [Електронний ресурс]. Інформаційний портал деревообробної галузі, 2008. – Режим доступу до статті: <https://bit.ly/3KFuJy3> (21.01.2022). – Назва з екрану.
6. Білецький М. О., Сірко З. С. Визначення якості обробленої поверхні пиломатеріалів. *Наук. вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. Вип. 185(2). 111–114 с. – Режим доступу: <https://bit.ly/32imdU7> (21.01.2022). – Назва з екрану.
7. Тарас В. І. Підвищення точності поздовжнього розпилювання деревини на круглопилкових верстатах: дис. канд. техн. наук: 05.05.04. Львів, 2019. 264 с.
8. Шостак В. В., Савчук Я. І., Григор'єв А. С. та ін. За ред. В. В. Шостака. *Деревообробні верстати загального призначення*. Київ: Знання, 2007. 279 с.
9. Бурдяк М. Р. Підвищення технологічної точності круглопилкових верстатів для ортогонального пиляння колод: дис. канд.

техн. наук: 05.05.04. Львів, 2014. 225 с.

10. ДСТУ 19917-2016 (ГОСТ 19917-2014, IDT) Меблі для сидіння та лежання. Загальні технічні умови. [З наданням чинності від 2016-10-01]. – Режим доступу: <https://bit.ly/3fMfYuR> (21.01.2022). – Назва з екрану.
11. Піломатеріали конструкційні із хвойних порід та тополі. Розміри. Допустимі відхилення: ДСТУ EN 336: 2003. Київ: Держстандарт України, 2004. 8 с.
12. Піломатеріали Київ. Піломатеріали європейської якості за українськими цінами. [Електронний ресурс]. Сайт компанії «Sosna.ua». – Режим доступу: <https://bit.ly/3KxR4gU> (21.01.2022). – Назва з екрану.
13. Ляйтц Лексикон. Видання 4. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bit.ly/3КАЕzкx> (21.01.2022). – Назва з екрану.
14. Інструменти для деревообробки. Каталог продукції фірми Pilana, 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bit.ly/3qPQW4C> (21.01.2022). – Назва з екрану.
15. Firma Walter. Katalog maszyn i pil tarczowych. Pily do weilopil bez pozy zgarniajacych, 2022. 16 с.
16. Інструмент для розпилювання, обробки дерева і ДСП, МДФ. Каталог фірми GASS, 2007. 63 с.
17. Інструменти для деревообробки. Каталог продукції фірми Kanefusa. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bit.ly/3Ky5FJe> (21.01.2022). – Назва з екрану.
18. Група підприємств ІНТЕКС плюс. Каталог продукції. Пили дискові по дереву. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bit.ly/3KvSokl> (21.01.2022). – Назва з екрану.
19. Freud. General Catalogue. Circular sawblades, 2006. 104 с.
20. LEUCO ОНЛАЙН-КАТАЛОГ. Дискові пили LEUCO, якість, широкий асортимент, інновації. [Електронний ресурс]. Сайт фірми LEUCO, 2022. – Режим доступу: <https://bit.ly/3rG0yhk> (21.01.2022). – Назва з екрану.
21. Вибираємо дискові пилки. [Електронний ресурс]. Інформаційний портал деревообробної галузі, 2009. – Режим

доступу: <https://bit.ly/35blbdP> (21.01.2022). – Назва з екрану.

22. Кірик М. Д., Григор'єв А. С. Підготовка дереворізальних інструментів до роботи та їх експлуатація: підручник для ВНЗ Львів: НЛТУ України. 2013. 342 с.
23. Пилипчук М. І., Тарас В. І. Конструкція твердосплавної круглої пилки з груповим розміщенням різальних елементів. *Вісник ХНТУ СГ ім. П. Василенка*: зб. наук.-техн. праць. Харків: КП «Міська друкарня». 2015. Вип. 160. 35 – 40 с.
24. Кірик М. Д., Тарас В. І. Аналіз конструкцій та параметрів круглих пилок із пластинами твердого сплаву для поздовжнього розпилювання деревини. *Наук. вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. праць. Львів: НЛТУ України, 2009. Вип. 19.2. 95 – 97 с.
25. Abrao A. M., Moreira M. C., Faria P. E., et al. High-performance circular sawing of AISI 1045 steel with cermet and tungsten carbide inserts. *JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY* №10, 2014. P. 4275 – 4282.
26. Martin P., Michael R. Piezoelectric shunt damping of a circular saw blade with autonomous power supply for noise and vibration reduction. *Journal of Sound and Vibration*. 2016. P. 20 – 31.
27. Xinpei X., Chengyong W., Jiayan C., et al. Effect of Roll Tensioning and Clamping Ratio on Natural Frequency of Circular Saw Blade for Wood Cutting Process. 13th International Conference on Tools (ICT 2012). Miskolc. 2012. P. 89 – 94.
28. Zhang M., Zhang Y., Ke J., et al. The Influence of Tangential Roller Pressure on the Stability of Circular Saw Blade. International Conference on Machinery, Electronics and Control Simulation (ICMECS). Weihai. 2014. P. 32 – 35.
29. Wang X., Yin Z., Li Y. The Stress Analysis of Different Circular Saw Structures During Cutting. International Academic Conference on Machinery, Materials Science and Engineering Applications. Wuhan. 2011. P. 471 – +.
30. Thunell B. Stability of the Band Saw Blade II Holz als Roh- und Werkstoff. 1970. № 9. P. 343 – 348.
31. Walker K. S. Cutting Speed and Cutting Forces. *Wood*. 1957. №

22. Р. 43 – 48.
32. Fischer R., Troger J., Lauter G. Die Bestimmung der Zerspankraft und ihrer Komponenten. *Holztechnologie*, № 31, 1976. Р. 7.
33. Савчук Я. І. Підвищення стійкості дискових пил при обробленні деревостружкових плит нанесенням покриття нітриду титану: дис. канд. техн. наук: 05.06.02. Львів, 1984. 231 с.
34. Пилипчук М. І., Тарас В. І. Дослідження точності пиляння деревини круглою пилкою з груповим розміщенням різальних елементів. *Вісник ХНТУ СГ ім. П. Василенка*: зб. наук.-техн. праць. Харків: КП «Міська друкарня». 2016. Вип. 178. С. 55 – 61.
35. Кірик М. Д. Підготовлення дереворізальних інструментів до роботи та їх експлуатація: навч. посібник. Львів: Ахіл, 2002. 408 с.
36. Sommer H. J. Spanungslehre, Maschinen und Maschinenwerkzeuge für die Holzbearbeitung. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1962. Р. 32.
37. Пилипчук М. І., Тарас В. І. Аналіз конструкцій круглопилкових верстатів для поздовжнього розпилювання дощок. *Наук. вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. праць. Львів: НЛТУ України, 2015. Вип. 25.10. С. 242 – 249.
38. ГОСТ 9769-94. Пили дискові з твердосплавними пластинами для обробки деревних матеріалів. Технічні умови. 15 с.
39. Тарас В. І., Пилипчук М. І., Саловський С. А., Лисак А. В. Обґрунтування конструкційних параметрів круглої пилки з комбінованим зубчастим вінцем. *Наук. вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. праць. Львів: НЛТУ України, 2018. Вип. 28.10 С. 242 – 249.
40. Пат. №40481 Україна, МПК В27 В33/00. Кругла пилка. М. Д. Кірик, В. І. Тарас, А. С. Григор'єв; заяв. і власн. НЛТУ України; опубл. 10.04. 2009, Бюл. № 7.
41. Особливості використання КОМПАС-3D. [Електронний ресурс]. Сайт компанії “АСКОН”. – Режим доступу: <https://bit.ly/3fQuOR2> (21.01.2022). – Загол. з екрану.
42. SolidWorks Standard [Electronic resource]. Site of kompany “SolidWorks”. – Access mode: <https://bit.ly/33XdpUc> (21.01.2022). – The name is from a screen.

43. Легостаєв А. Д. Метод скінченних елементів: конспект лекцій. Київ: КНУБА, 2004. 112 с.
44. АРМ FEM: Керівництво користувача. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://bit.ly/3Amvc3o> (21.01.2022). – Загол. з екрану.
45. Ponton Ch. B. Finite element analysis of industrial circular sawblade with respect to tensioning, rotating, cutting, and expansion slots. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of. Blacksburg, Virginia. 2007. P. 195.
46. Кірик М. Д., Пилипчук М. І., Григор'єв А. С., Волошинський О. О., Павлюк Р. В. За редакцією проф. М. Д. Кірика. Різання деревини та дереворізальні інструменти: лабораторний практикум для ВНЗ. Львів: НЛТУ України, 2008. 84 с.
47. Панасюк М. М. Програма для оброблення результатів багатофакторного експерименту за допомогою ЕОМ. Матеріали 67-ої наук.-техн. конф. студентів НЛТУ України. Львів: НЛТУ України, 2015. С. 166 – 167.
48. Taras V. I., Kutsyk A. S. (2016): Methodic of research of face runout of circular saw in the process of wood sawing. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. №42. P. 59 – 64.
49. Україна сьогодні. Каталог провідних підприємств України. Лісова промисловість, деревообробка. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bit.ly/3tR6975> (21.01.2022). – Назва з екрану.
50. Круглопилкова техніка – за і проти. [Електронний ресурс]. Інформаційний портал деревообробної галузі, 2008. – Режим доступу: <https://bit.ly/3tOASBM> (21.01.2022). – Назва з екрану
51. Пат №117606 Україна, МПК В27 В33/08. Твердосплавна кругла пилка для поздовжнього розпилювання деревини. Пилипчук М. І., Тарас В. І., Воронюк Б. В., Пихней Б. В.; заяв. і власн. НЛТУ України. № u201701569; заявл. 20.02.2017; опубл. 20.06.2017, Бюл. №12.
52. Мункфорс Б. Редінг. “Сталі для виготовлення дискових пил”. Серпень, 1973.
53. DIN EN 10029-2011 (МКС77.140.50). Листи сталеві гарячокатані

- товщиною 3 мм і більше. Допуски на розміри і форму. (Hot-rolled steel plates 3 mm thick or above - Tolerances on dimensions and shape; German version EN 10029:2010) – [з наданням чинності від 01.02.2011]. 2011. 15 с.
54. Степанчук С. П. Підвищення точності процесу розпилювання деревини на горизонтальних стрічкопилкових верстатах: дис. канд. техн. наук: 05.05.04. Львів, 2012. 234 с.
 55. Пилипчук М. І. Підвищення точності калібрування-шліфування деревостружкових плит абразивними кругами: дис. канд. техн. наук: 05.06.02. Львів, 1984. 206 с.
 56. Пилипчук М. І., Григор'єв А. С., Шостак В. В. Основи наукових досліджень: підручник для ВНЗ. Київ, 2007. 270 с.
 57. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 44106. «Оброблення результатів експерименту за В-планом» («КоefRR7.0») / М. І. Пилипчук, С. П. Степанчук; влас. НЛТУ України; зареєстровано 05.06.2012.
 58. ДСТУ ГОСТ 8.051:2009 (ГОСТ 8.051-81, ІДТ) ГСИ. Похибки, що допускаються при вимірюванні лінійних розмірів до 500 мм. [з наданням чинності від 2009-02-01]. – Режим доступу: <https://bit.ly/3tZ9Pnw> (21.01.2022). – Назва з екрану.
 59. Індикатор с цифровим відліковим пристроєм трьохкноповий тип ИЦЦ(З)-25-0,005. Клас точності І. Паспорт. Харків: Приватне науково-виробниче підприємство «МИКРОТЕХ», 2008. 8 с.
 60. Електронна програма «МИКРОТЕХ». Українські вимірювальні системи v.2.0. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bit.ly/33KDhCV> (21.01.2022). – Назва з екрану.
 61. Пилипчук М. І. Розвиток науково-технічних основ забезпечування точності обробляння деревини на верстатах: дис. док. техн. наук: 05.05.04. Львів, 2021. 443 с.
 62. Верстат моделі ВК-40. Паспорт і Керівництво з експлуатації. Івано-Франківськ: ПП «Імекс», 2002. – 15 с.

Наукове видання

**ДЕРЕВОРИЗАЛЬНІ КРУГЛІ ПИЛКИ
ІЗ КОМБІНОВАНИМ ЗУБЧАСТИМ ВІНЦЕМ**

МОНОГРАФІЯ

ISBN 978-617-7926-35-0

Віддруковано з готового макету замовника

Підп. до друку 11.05.2022 р.
Формат 60x84 1/16. Умовн. друк. арк. 6,97.
Папір офсетний. Гарнітура “Times New Roman”.
Друк цифровий. Зам. № 682.
Наклад 100 примірників.



Видавець Кушнір Г.М.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції: серія ІФ №31 від 26.01.2009 р.
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шота Руставелі, 1,
тел. (099) 700-47-45, e-mail: kgm.print@i.ua