

І.М. Піжов, д-р техн. наук, Харків, В.Г. Клименко, Полтава, Україна

## **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛОЩІ КОНТАКТУ РІЗАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ КРУГУ З ДЕТАЛЛЮ ПРИ ПЛОСКОМУ ТОРЦЕВОМУ ШЛІФУВАННІ З ПОПЕРЕДНІМ НАХИЛОМ ОСІ ШПИНДЕЛЯ**

*Розглянуто питання, пов'язані з підвищенням ефективності процесу плоского торцевого шліфування за рахунок створення теоретичних передумов управління площею контакту круга з деталлю, а, отже, і теплонпруженістю процесу обробки в цілому. Стосовно до окремих випадків характеру контакту круга з деталлю запропоновані аналітичні залежності, які пов'язують значення площі з умовами обробки.*

**Ключові слова:** *плоске торцеве шліфування, температура шліфування, торцевий круг, кут нахилу осі шпинделя, площа контакту, ріжуча поверхня круга, схема шліфування, параметри зони контакту*

*Рассмотрены вопросы, связанные с повышением эффективности процесса плоского торцевого шлифования за счет создания теоретических предпосылок управления площадью контакта круга с деталью, а, следовательно, и теплонпряженностью процесса обработки в целом. Применительно к частным случаям характера контакта круга с деталью предложены аналитические зависимости, которые связывают значение площади и условиями обработки.*

**Ключевые слова:** *плоское торцевое шлифование, температура шлифования, торцовый круг, угол наклона оси шпинделя, площадь контакта, режущая поверхность круга, схема шлифования, параметры зоны контакта*

*The problems associated with the increase of efficiency of process of flat face grinding by creating the theoretical preconditions management area of contact with the workpiece range, and hence the thermal stress of the whole process of processing. With regard to individual cases the nature of the contact circle detail Analytical dependencies that tie the value of the area and the processing conditions.*

**Keywords:** *flat mechanical grinding, grinding temperature, allen circle, the angle of the spindle axis, the contact area, the surface of the cutting wheel, grinding circuit, the parameters of the contact zone*

**Постановка проблеми.** У машинобудуванні до 20% деталей мають плоскі поверхні значна частина яких потребують операцій шліфування [1]. Однією з ефективних схем обробки слід вважати шліфування торцем круга. Відомо, що шліфування торцем круга характеризується відносно великою величинами дуги контакту і поверхні взаємодії круга з деталлю, що обумовлює високі температури в зоні шліфування [2-4]. Тому площа контакту може бути прийнята у якості параметру для керування теплонпруженістю процесу шліфування. Одним з найбільш ефективних технологічних прийомів регулювання площі контакту РПК з деталлю є попередній нахил осі шпинделя верстата [5, 6]. Аналіз літературних джерел інформації показав, що дані, стосовно аналітичного визначення площі контакту торцевого круга з

деталлю в умовах попереднього нахилу осі шпинделя відсутні. А це не дозволяє технологю у повній мірі використовувати переваги такої схеми обробки. Таким чином, питання, пов'язане з теоретичним встановленням площі контакту різальної поверхні торцевих кругів з деталлю є актуальним.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

При плоскому торцевому шліфуванні часто користуються прийомом, коли шліфувальний круг на етапах попередньої та чистової обробки нахилиють на певний кут, а на етапі остаточного шліфування повертають у вихідне положення [2, 3]. При цьому можливі три характерні випадки контакту різальної поверхні круга (РПК) з оброблювальною деталлю У першому випадку, коли значення кута  $\alpha$  достатньо велике (від десятка хвилин до декілька градусів), у контакт з поверхнею деталі знаходиться тільки частина РПК (з одного його боку), при цьому сліди від зерен круга мають чітко виражений вигляд у формі дуг, які зрушені відносно один одного у напрямку поздовжньої подачі (рис. 1, а). У другому випадку, коли кут  $\alpha$  має невеликі значення (близькі до нуля), в контакт з поверхнею деталі вступає протилежна частина РПК. При цьому сліди від зерен круга також мають чітко виражений вигляд у формі дуг, які зрушені відносно один одного у напрямку поздовжньої подачі, але дуги, утворені лівою частиною круга, мають протилежний напрям (рис. 1, б) і перетинаються з дугами, утвореними правою частиною. У третьому випадку маємо класичний варіант, коли кут  $\alpha$  дорівнює нулю і в контакт з поверхнею деталі бере участь вся РПК. Звісно, що у першому та другому випадках позитивним моментом є можливість управління площею зони контакту РПК з оброблювальною поверхнею, а отже і термосиловою напруженістю процесу шліфування [2, 7]. Але при цьому неминуче підвищення відхилення форми поверхні деталі (у даному випадку має місце її окремих випадок – увігнутість). Тому величину кута  $\alpha$  треба зменшувати на етапі чистового шліфування і при прецизійному шліфуванні приймати рівною нуля. Це стає можливим тому, що при чистових і остаточних операціях шліфування використовуються достатньо ошадливі режими різання у наслідок чого вірогідність негативного впливу температурного фактору значно зменшується. Особливості формування плоских поверхонь при застосуванні схем обробки «на прохід» та в умовах багатопрохідного шліфування детально розглянуто у роботах [5] та [6]. Вони отримані шляхом комп'ютерного геометричного моделювання. Але не зважаючи на це існує необхідність в аналітичних залежностях, які відображали б зв'язок площі контакту різальної поверхні круга з деталлю з умовами шліфування.

### **Мета дослідження**

Метою представленої роботи є встановлення аналітичних залежностей, які відображають зв'язок площі контакту різальної поверхні круга з деталлю з умовами плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі обертання шпинделя.

### **Основні матеріали досліджень**

Площа контакту РПК з деталлю залежить від ряду факторів [5], [6]. До них в першу чергу треба віднести кут нахилу  $\alpha$ , діаметр круга  $d_k$  і глибину обробки  $t$  які визначають такі лінійні параметри зони контакту РПК з деталлю як довжина  $W'$  та ширина  $B'$  (рис. 1).

При певних умовах, як обмежувальний фактор, можуть виступати, наприклад, ширина РПК, ширина деталі та схема обробки (симетрична, несиметрична).

Для визначення площі контакту РПК з деталлю приймемо допущення, що довжина контакту не перевищує ширину РПК, тобто  $W' \leq W$ , а  $d_{\min} \leq B \leq d_k$ . В цьому випадку зона контакту уявляє собою частину круга, обмежену дугою  $FN$  і хордою  $FN$ , тобто сегмент. Як видно з рисунка 1, хорда  $FN = B'$ , а дуга  $FN = L$ .

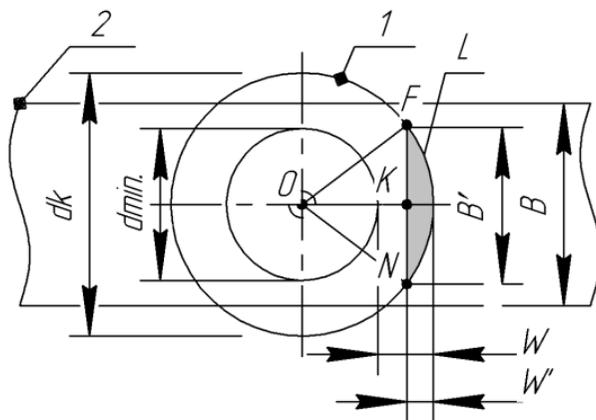


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при умові, що  $d_{\min} \leq B \leq d_k$ ,  $B' < B$ , а  $W' \leq W$

Існують декілька способів визначення площі сегменту [7]. Скористаємося тим з них, який заснований на використанні даних, що були отримані нами раніше [8].

Це ширина  $B'$  ( $B$ ), довжина  $W'$  та довжина дуги  $L$  ( $L_{\Delta}$ ) зони контакту РПК з деталлю.

Розглядаючи площу сегменту  $S_{\text{сегм.}}$  як частину площі сектора запишемо [7]:

$$S_{\text{сегм.}} = S_{\text{сект.}} - S_{\text{трик.}},$$

де  $S_{\text{сект.}}$  - площа сектора  $OFN$ ;  $S_{\text{трик.}}$  - площа трикутника  $OFN$ .

Тоді на заставі рис. 1 маємо, що:

$$S_{\text{сегм.}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{d_k}{2} - \frac{1}{2} \cdot FN \cdot OK.$$

Або після перетворень:

$$S_{\text{сегм.}} = \frac{1}{2} \cdot \left[ L \cdot \frac{d_k}{2} - B' \cdot \left( \frac{d_k}{2} - W' \right) \right]. \quad (1)$$

Параметри  $W'$ ,  $B'$  та  $L$ , які входять до рівняння (1), розраховуються за виразами наведеними в [8].

Схема, представлена на рис. 1, справедлива як для випадку багатопрохідного шліфування, так і шліфування «на прохід» коли по мірі збільшення числа проходів (при здійсненні вертикальної подачі) зберігається умова, що  $B' < B$ . Але при цьому треба враховувати, що з моменту, коли круг повністю захоплює поверхню деталі по ширині (рис. 2),  $B' = B$ , а  $L = L_{\Delta}$  (див. залежність (1)).

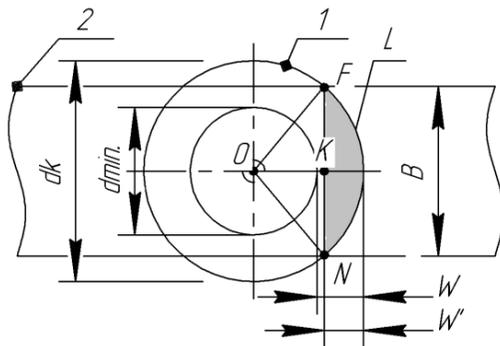


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при  $B' = B$

У випадку, коли  $W \leq W' \leq (d_k - W)$ , РПК може зазнати суттєвих змін. Справа в тому, що внутрішня кромка круга перестає бути захищеною і на ній буде утворюватися забірний конус розмір якого буде залежати з одного боку від умов обробки, а з другого від частоти правки РПК, наприклад, алмазним олівцем. Зона контакту буде мати більш складний вид. Наприклад, на рис. 3 показано проміжний варіант, коли  $W' = \frac{d_k}{2}$ , а  $d_{\min} \leq B < d_k$ .

З рис. 3 площу контакту можна визначити як:

$$S_{\text{зк.}} = S_{\text{кіл.}} - S_{\text{сегм.}}$$

Площа зони контакту  $S_{\text{зк.}}$  (затемнена) буде дорівнювати половині площі кільця ( $S_{\text{кіл.}}$ ) за винятком площі двох напівсегментів (заштриховано), тобто одного повного сегмента ( $S_{\text{сегм.}}$ ), який окреслений дугою  $\overset{\frown}{AB}$  та хордою  $AB$ .

Тоді можна записати, що:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} (d_k^2 - d_{\min}^2) - S_{\text{сегм.}} \tag{2}$$

Як було показано раніше (див. формулу (1)), для визначення площі сегменту треба знати довжини дуги  $L_{\text{сегм.}}$ , та хорди  $AF$ .

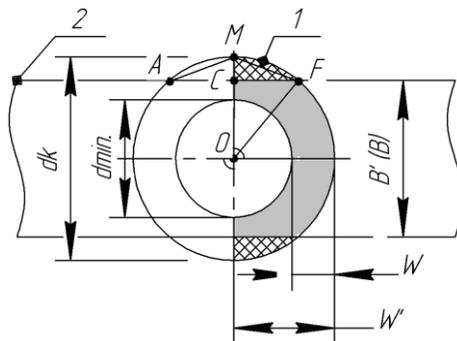


Рисунок 3 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при умові, що  $W' = 0,5 \cdot d_k$ , а  $d_{\min} \leq B (B') < d_k$

На заставі рис. 2 маємо наступне вираження формули Гюйгенса для визначення  $L_{\text{сегм.}}$ .

$$L_{\text{сегм.}} = A\check{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF). \quad (3)$$

Для визначення довжини дуги сегменту треба знати відрізки  $AM$  та  $AF$ . З прямокутного трикутника  $AMC$  маємо, що:

$$AM = \sqrt{AC^2 + MC^2}. \quad (4)$$

Відрізок  $MC$  можна визначити як:

$$MC = \frac{d_k}{2} - \frac{B}{2}. \quad (5)$$

Скористаємося канонічним рівнянням окружності:

$$X^2 + Y^2 = R^2.$$

В нашому випадку координати точки  $F$  дорівнюють:

$$X = AC = \frac{AF}{2}; Y = \frac{B}{2}; R = \frac{d_k}{2}.$$

Тоді канонічне рівняння окружності можна записати як:

$$X^2 + \frac{B^2}{4} = \frac{d_k^2}{4}.$$

Звідси:

$$X^2 = \frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4},$$

Або:

$$AC = CF = X = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}. \quad (6)$$

Після підстановки рівнянь (5) та (6) в формулу (4) маємо, що

$$AM = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \left(\frac{d_k}{2} - \frac{B}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \frac{d_k^2}{4} - \frac{1}{2} \cdot d_k \cdot B + \frac{B^2}{4}}.$$

Розкриваючи рівняння маємо, що:

$$AM = \sqrt{\frac{d_k^2}{2} - \frac{1}{2} \cdot d_k \cdot B} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)}.$$

Тоді на основі (3) можна записати, що довжина дуги сегменту буде дорівнювати:

$$L_{\text{сегм.}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)} + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - 2 \cdot X).$$

Або:

$$L_{\text{сегм.}} = \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}).$$

В кінцевому стані маємо, що:

$$L_{\text{сегм.}} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}.$$

Тоді вираз (2) прийме вид:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{мін.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - 2 \cdot X \cdot B \right].$$

Або:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{мін.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right].$$

Кінцевий стан цього рівняння має вигляд:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{мін.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right]. \quad (7)$$

Треба мати на увазі, що формула (7) справедлива тільки для випадку, коли  $W' = 0,5 \cdot d_k$ , а  $d_{\text{мін.}} \leq B (B') < d_k$ .

У разі, коли ширина деталі менша за внутрішній діаметр круга, в сегменті з дугою  $K\bar{L} = L_{\text{сегм.}}$ , знаходиться «пустий» сегмент (рис. 4, заштриховано) з дугою  $A\bar{F} = L_{n.\text{сегм.}}$ . Тому в рівнянні (7) треба враховувати

площу «пустого» сегмента, яка визначається за рівнянням (1). Для її визначення треба знайти довжину дуги цього пустого сегменту:

$$L_{\text{п.сегм.}} = A\check{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF).$$

З трикутника  $AOC$  маємо, що:

$$AM^2 = AC^2 + MC^2.$$

$$AC^2 = AO^2 - OC^2.$$

З рис. 4 витікає, що:

$$AO = \frac{d_{\text{min.}}}{2}; \quad OC = \frac{B}{2}; \quad MC = MO - CO = \frac{d_{\text{min.}}}{2} - \frac{B}{2}.$$

Відрізок  $AC$  можна визначити як:

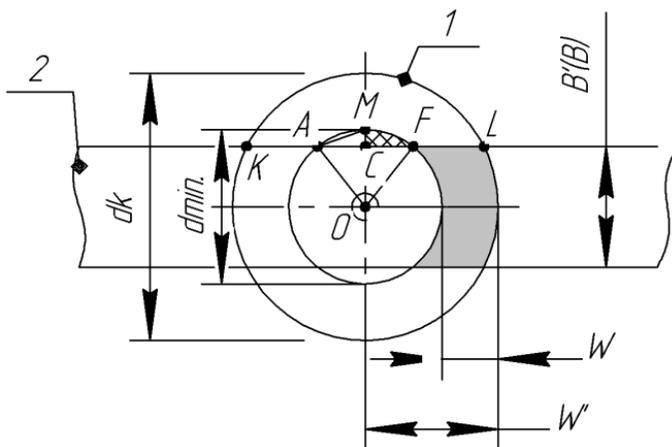


Рисунок 4 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при умові, що  $W' = 0,5 \cdot d_k$ , а  $B (B') < d_{\text{min}}$

$$AC^2 = \frac{d_{\text{min.}}^2}{4} - \frac{B^2}{4} = \frac{1}{4} \cdot (d_{\text{min.}}^2 - B^2).$$

Звідси:

$$AC = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)}.$$

Тоді можна записати, що:

$$AM^2 = \frac{d_{\min}^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \left(\frac{d_{\min}}{2} - \frac{B}{2}\right)^2.$$

Розкриваючи останнє рівняння маємо:

$$AM = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)}.$$

Визначаємо довжину дуги при умові, що  $AF = 2 \cdot AC$ :

$$L_{n.сегм.} = A\check{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF).$$

$$L_{n.сегм.} = \sqrt{2 \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)} + \frac{1}{3} \cdot (\sqrt{2 \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)}).$$

В кінцевому стані можна записати, що:

$$L_{n.сегм.} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_{\min}^2 - d_{\min} \cdot B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)}. \quad (8)$$

Тоді площа «пустого» сегменту буде дорівнювати:

$$S_{n.сегм.} = \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{n.сегм.} \cdot \frac{d_{\min}}{2} - \sqrt{(d_{\min}^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right]. \quad (9)$$

Тоді формула для визначення площі зони контакту РПК з деталлю буде мати вид:

$$S_{зк.} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{сегм.} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] + S_{n.сегм.}.$$

Або з урахуванням (9) остаточно маємо:

$$S_{зк.} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min.}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{сезм.} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] + \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{н.сезм.} \cdot \frac{d_{\min.}}{2} - \sqrt{(d_{\min.}^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] \cdot K_{н.с.} \quad (10)$$

Незважаючи на те, що для визначення довжин дуг сегментів була використана наближена формула Гюйгенса, похибка визначення площі контакту РПК з деталлю на перевищує 5% навіть для рівняння (10), в якому вона зустрічається двічі. При малих значеннях ширини деталі рівняння може давати значні похибки. Але це не визиває особливих побоювань бо, по-перше, при обробці деталей з малою шириною площа не є великою, а, по-друге, такі деталі зазвичай оброблюються у пакетах і в цілому складають широкі деталі.

Таким чином, рівняння (10) є універсальним, тобто його можна використовувати для випадків, які наведено на рис. 3-4, з урахуванням того, що в першому разі  $K_{н.с.} = 0$ , а в другому  $K_{н.с.} = 1$ .

Якщо використовується схема обробки «на прохід», коли при незмінних значеннях  $t$  та  $\alpha$  довжина  $W' = const$ , а сам процес здійснюється без застосування поперечної подачі, площа  $S_{прох.}$  на кожному проході буде різною завдяки збільшенню ширини  $B'$  та довжини дуги  $L$  зони контакту. Для визначення  $S_{прох.}$  треба оперувати поняттям сумарної глини обробки на проходах, або величиною увігнутості  $\Delta_i$  (рис. 5 – 6). В цьому випадку розраховують площі по одній з наведених вище формул припускаючи, що глибина на кожному проході є величиною сумарною і дорівнює відповідному значенню увігнутості.

На першому проході площа розраховується як звичайно (як при багатопрохідній обробці), а для подальших проходів як різницю між сумарною площею на даному проході і сумарною площею попереднього проходу:

$$S_{прох.i} = S_{прох.i} / t_{\Sigma i} = \Delta_i / - S_{прох.i-1} / t_{\Sigma i-1} = \Delta_{i-1} / \quad (11)$$

Стосовно рис. 5 та рис. 6 можна записати, що  $S_{прох.1} = S_{\Delta 1}$ ;  $S_{прох.2} = S_{\Delta 2} - S_{\Delta 1}$ ;  $S_{прох.3} = S_{\Delta 3} - S_{\Delta 2}$  і т.д.

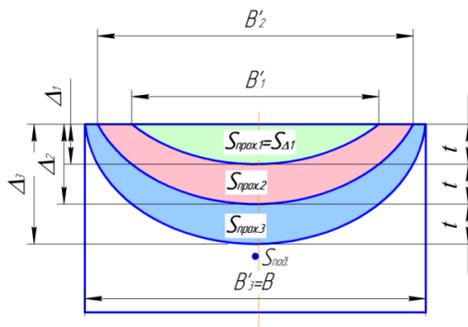


Рисунок 5 – Схема для визначення площі контакту РПК з деталлю при шліфуванні «на прохід» ( $t = const$  та  $W' = const$ )

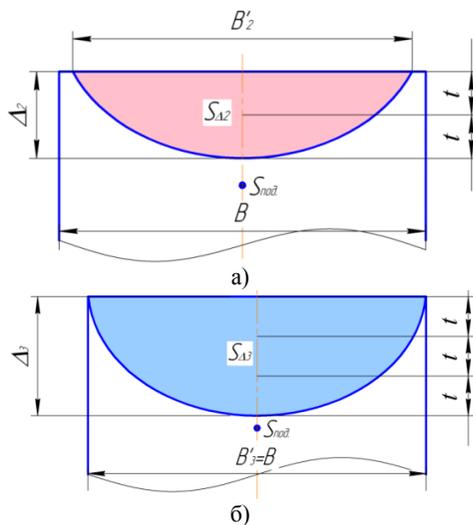


Рисунок 6 – До особливостей визначення площі контакту РПК з деталлю при шліфуванні «на прохід»

Наприклад, якщо весь припуск знімається за три проходи, а для розрахунку площі справедлива залежність (1), то при розрахунках параметрів  $B'$  та  $L$  [8] для першого проходу використовуємо глибину  $t = \Delta_1$ , для другого  $2 \cdot t = \Delta_2$  (рис. 6 а), третього  $3 \cdot t = \Delta_3$  (рис. 6 б) і т.д. Треба мати на увазі, що при розрахунку параметру  $W'$  [8] глибина обробки постійна і дорівнює  $t = \Delta_1$ . В цьому і полягає сенс обмеження площі контакту РПК з деталлю.

## **Висновки та перспективи розвитку**

Таким чином, аналіз глибинної схеми торцевого шліфування «на прохід» (з нахилом осі шпинделя) показав, що в разі обробки широких деталей площа контакту РІК з оброблюваною поверхнею може мати достатньо великі значення, особливо при використанні кругів із суцільним робочим шаром. Тому керування значенням площі за рахунок попереднього нахилу осі обертання шпинделя може забезпечити основні передумови для розширення технологічних можливостей процесу плоского торцевого шліфування.

**Список використаних джерел:** 1. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин - Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 2. Лурье Г. Б. Шлифовальные станки и их наладка / Г. Б. Лурье., В. Н. Комиссаржевская. – М.: Высшая школа, 1972. – 416с. 3. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003.–912 с. 4. Антонюк В. С. Теплові явища при обробці різанням: Навч. посібник / В. С. Антонюк, С. Ан. Клименко, С. А. Клименко. – К.: НТУ України «КПІ», 2014. – 156 с. 5. Піжов І. М. Деякі особливості багатопрохідного плоского торцевого шліфування / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2014.- Вып. 84.-С. 201-210. 6. Піжов І. М. Дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Журнал інженерних наук : наук. журн. / Сум. держ. ун-т. – Суми: Вид-во СумДУ. Том 2. №2. – 2015. – С. А1-А6.- ISSN 2312-2498. 7. Формулы, интерактивный справочник по математике, геометрии, физике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fxyz.ru/>. 8. Піжов І. М. Теоретичні дослідження лінійних параметрів зони контакту різальної поверхні круга із деталлю та увігнутості при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя Журнал інженерних наук : наук. журн. / І. М. Піжов, В. Г. Клименко // Сум. держ. ун-т. – Суми: Вид-во СумДУ. Том 3. № 1. -2016. - С. А9-А14.- ISSN 2312-2498.

**Bibliography (transliterated):** 1. Matalin A. A. Tehnologija mashinostroenija / A. A. Matalin – L.: Mashinostroenie, 1985. – 496 s. 2. Lur'e G. B. Shlifoval'nye stanki i ih naladka / G. B. Lur'e., V.N. Komissarzhevskaja. – M.: Vysshaja shkola, 1972. – 416s. 3. Spravochnik tehnologa mashinostroitelja. V 2-h t. T.1 / Pod red. A.M. Dal'skogo, A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova, A.G. Suslova. – 5-e izd., ispravl. – M.: Mashinostroenie-1, 2003.–912 s. 4. Antonjuk V.S. Teplovi javishha pri obrobci rizannjam: Navch. posibnik / V.S. Antonjuk, S.An. Klimenko, S.A. Klimenko. – K.: NTU Ukraini «KPI», 2014. – 156 s. 5. Pizhov I.M. Dejaki osoblivosti bagatoprohidnogo ploskogo torcevoogo shlifuvannja / I.M. Pizhov, V.G. Klimenko // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2014.- Vyp. 84.-S. 201-210. 6. Pizhov I.M. Doslidzhennja ploshti kontaktu rizal'noi poverhni krugu z detallju pri ploskomu torcevoemu shlifuvanni z poperednim nahilom osi shpindelja / I.M. Pizhov, V.G. Klimenko // Zhurnal inzhenernyh nauk : nauk. zhurn. / Sum. derzh. un-t. – Sumi: Vid-vo SumDU. Tom 2. №2. – 2015. – S. A1-A6. – ISSN 2312-2498. 7. Formuly, interaktivnyj spravochnik po matematike, geometrii, fizike [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.fxyz.ru/>. 8. Pizhov I.M. Teoretichni doslidzhennja liniynih parametrov zoni kontaktu rizal'noi poverhni kruga iz detalju ta uvignutosti pri ploskomu torcevoemu shlifuvanni z nahilom osi shpindelja Zhurnal inzhenernyh nauk: nauk. zhurn. / I.M. Pizhov, V.G. Klimenko // Sum. derzh. un-t. – Sumi: Vid-vo SumDU. Tom 3. № 1. – 2016. – S. A9-A14. – ISSN 2312-2498.