

УДК 621.95

В. Крупа

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОРІЦЕВИХ РОЗТОЧНИХ ГОЛОВОК З ПОДІЛОМ ПРИПУСКУ ТА ПОДАЧІ

**Резюме.** Проаналізовано відомі рекомендації та залежності для визначення технологічних і конструкторських параметрів багаторіцевих розточувальних головок (БРГ). Запропоновано, виходячи із того, що параметр шорсткості обробленої поверхні визначиться геометрією інструменту і кінематикою його переміщення, два варіанти конструкторського виконання БРГ, які забезпечують у процесі різання одночасний поділ припуску та подачі. Отримано залежності для визначення подачі на оберт, на окремий чистовий різець та глибин різання на чорновому і чистових різцях залежно від їх геометричних параметрів для обох варіантів, а також формули для визначення кутових положень чорнового та другого і третього чистових різців відносно першого чистового різця. Здійснено оптимізацію геометричних параметрів різців за критеріями максимальної продуктивності оброблення і заданої шорсткості поверхні.

**Ключові слова:** технологічні та конструкторські параметри, багаторіцева розточувальна головка, чорновий та чистові різці, подача, глибина різання, шорсткість обробленої поверхні.

V. Krupa

## DETERMINATION OF DESIGN-MANUFACTURING PARAMETERS OF THE MULTIPLE-TOOL BORE HEADS WITH TOLERANCE AND FEED DISTRIBUTION

**The summary.** Available recommendations and dependencies for defining of manufacturing and design parameters of the multiple-tool bore heads (MTH) are analysed. Taking into account the fact, that the roughness parameter of the work surface is found by the tool geometry and kinematics of its movement, two variants of MBH design implementation which provide simultaneous tolerance distribution and feed, have been proposed. Dependencies for finding revolution feed for the cutting depth by the primary and rough tool, depending on their geometric parameters for both variants, as well as formula for finding angle position of the rough and the primary second and third tools relatively the primary first tool, have been obtained. Optimization parameters of the tools according to the criteria of the maximal working productivity and the available rough surface, has been completed.

**Key words:** manufacturing and design parameters, multiple tool bore head, rough and primary tool, feed, cutting depth worked surface roughness.

### Умовні позначення

$K_\phi$  – поправочний коефіцієнт на головний кут у плані, град;

$P_{y1}$ ,  $P_{y2}$  і  $P_{y3}$  та  $P_{y4}$  – радіальні складові сил різання на першому, другому і третьому чистових і на чорновому різцях відповідно, Н;

$r$  – радіус при вершині різця, мм;

$Rz \approx H$  – висота нерівностей профілю за десятьма точками, мкм;

$s$  – подача на оберт, мм/об;

$s_1$ ,  $s_2$ , та  $s_3$ , – подачі відповідно першому, другому та третьому чистовим різцям, мм/різець;

$t$ ,  $t_4$  – глибини різання на чистових та чорновому різцях відповідно, мм;

$V$ ,  $V_4$  – швидкість різання на чистових та чорновому різцях відповідно;

$z$  – припуск на оброблення, мм;

$\theta_1$ ,  $\theta_2$  і  $\theta_3$  – відповідно центральні кути, що визначають кутові положення другого і третього чистових і чорнового різців відносно першого чистового, град;

$\phi$  і  $\phi'$  – відповідно головний та допоміжний кути в плані 1-го і 2-го чистового різців, град;

$\phi_{3К}$ ,  $\phi'_{3К}$  – відповідно скореговані головний та допоміжний кути в плані 3-го чистового різця;

ПЧР, ДЧР, ТЧР – відповідно перший, другий та третій чистові різці;

ГРК, ДРК – відповідно головна та допоміжна різальні кромки;

ТКП – технологічно-конструкторські параметри;

БРГ – багаторіздеві розточні головки.

**Постановка проблеми.** Розточування є однією з фінішних і найважливіших операцій оброблення у сучасному машинобудуванні, бо від точності розточених отворів, взаємного їх розміщення залежить надійність роботи як окремих механізмів, вузлів, так і машин у цілому.

Для розточування як правило використовують розточні стержневі різці, пластинчасті різці, різці-блоки, розточні блоки та розточні головки.

Найбільша продуктивність при розточуванні досягається використанням (БРГ). Проте використання БРГ при чистовому і тонкому розточуванні отворів є обмеженим унаслідок недостатнього забезпечення високої точності геометричних розмірів, форми та шорсткості обробленої поверхні. Причиною цього є відсутність достатнього наукового обґрунтування методики проектування нових конструкцій БРГ.

Тому розроблення науково-обґрунтованого визначення технологічних і конструкторських параметрів БРГ, а саме: глибин різання на чорнових і чистових різцях; подач на оберт та на окремий чистовий різець; кількість чорнових і чистових різців; їх геометричних параметрів; радіального, осьового і кутового розташування різців, які є основними даними при проектуванні БРГ, експлуатація яких забезпечить необхідні якісні показники розточувальних отворів є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В літературних джерелах [1-9] подаються як технологічні, так і конструкторські параметри розточувальних інструментів, зокрема БРГ, залежно від їх призначення. Проте в більшості літературних джерел відсутні наукові обґрунтування значень технологічних і конструкторських параметрів.

Щодо технологічних параметрів процесу розточування отворів БРГ, то в літературі подані їх кількісні значення, які мають рекомендаційний характер. Наприклад, при використанні розточної головки, поданої в [2], рекомендована глибина різання  $t=0,3...0,7$  мм, а при використанні головки, описаної в [3], рекомендовані значення глибин різання на першому різці  $t_1=0,1...0,5$  мм, а на другому –  $t_2=0,03...0,07$  мм. Головка, яка описана в [4] забезпечує глибину різання, що дорівнює відношенню величини загального припуску до кількості різців. Подача на різець (переміщення головки в напрямку її поздовжньої подачі відносно заготовки за час її повороту на кут між  $i$ -тим та  $i-1$ -шим різцями) для випадку рівномірного розміщення по колу  $n$  чистових різців при використанні БРГ, поданих в [5,6], дорівнює  $s_n = s/n$ .

Аналіз літературних джерел щодо методик встановлення конструкторських параметрів БРГ показує, що їх значення базуються як на основі рекомендацій, що базуються на практичному інженерному досвіді, так і на основі аналітичних залежностей. Показано, що в БРГ може використовуватись від двох [3,6,7] до восьми [1] різців. Визначення таких конструкторських параметрів, як головний –  $\varphi$  та допоміжний  $\varphi'$  кути в плані, радіуса  $r$  при вершині різця здійснюють як на основі практичних рекомендацій [1,2], так і аналітично [8,9]. Наприклад, у [1] запропоновано  $\varphi = 90^\circ$ , а у [2] –  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi' = 10^\circ$ ,  $r = 0,4\dot{i}$ . У [2] для чорнової обробки рекомендують  $\varphi = 60^\circ$ , а для чистової  $\varphi = 45^\circ$ . У [8] подана аналітична залежність для визначення значень головного кута в плані різців  $\varphi_i = R_i/L_i$ , де  $R_i$  – відстань від вершини  $i$ -го різця до осі головки,  $L_i$  – відстань від вершини  $i$ -го різця до переднього торця напрямних, причому виконується умова  $\varphi_i \leq \varphi_{i+1} \leq \varphi_{i+2}$ . В [9] подається БРГ із різними значеннями головних кутів у плані, причому  $\varphi_1 - \varphi_2 = \arctg(t/s)$ . В [4] пропонується різці зміщувати один відносно іншого в осьовому напрямку на 2 мм, а в [7] подано, що осьове зміщення різців визначається за формулою  $\chi = \psi \cdot s/360$ , де  $\psi$  –

кутове зміщення одного різця відносно іншого в площині, перпендикулярній до осі головки. В [6] подана залежність для визначення радіального зміщення різців  $\rho_i = \varepsilon \cdot \cos \psi_i \pm \sqrt{\eta^2 - \varepsilon^2 \cdot \sin^2 \psi_i}$ , де  $\psi_i$  – значення кута, що визначає положення  $i$ -того різця відносно напрямних ( $i=1,2,\dots$ ),  $\varepsilon = l \cdot \operatorname{tg} \alpha + \eta^2 \cdot \sin \alpha / c_1$ ,  $\eta = c_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi$ ,  $\alpha$  – кут перекосу розточної головки,  $c_1 = l' - l \cdot \cos \alpha$ .

Аналіз літературних джерел, присвячених визначенню технологічних і конструкторських параметрів БРГ, показав, що має місце відсутність єдиного підходу у встановленні значень досліджуваних параметрів, а існуючі рекомендації щодо встановлення їх значень базуються на практичних рекомендаціях і часто заперечують одна одній. Аналітичні залежності подані лише для визначення якогось одного із параметрів безвідносно, наприклад, до такого якісного параметра обробленої поверхні, як шорсткість чи умови досягнення максимальної продуктивності.

У даній статті здійснено спробу частково усунути прогалини в цій області, запропонувавши комплексний підхід для розроблення нової методики визначення технологічних і конструкторських параметрів БРГ, використання якої дозволить здійснювати конструювання розточних головок даного типу для забезпечення високої якості обробленої поверхні та продуктивності оброблення.

**Мета роботи** – розробити методику визначення технологічно-конструкторських параметрів БРГ, які у процесі різання забезпечують одночасний поділ припуску та подачі.

**Постановка завдань.** Розробити методику розрахунку визначення конструкторських параметрів БРГ головок, які у процесі різання забезпечують одночасний поділ припуску та подачі. Запропонувати залежності для визначення технологічних і конструкторських параметрів БРГ та провести оптимізацію допустимих значень геометричних параметрів чистових різців з умови забезпечення максимальної продуктивності.

**Результати дослідження.** Дослідження технологічно-конструкторських параметрів здійснено для розточної головки, яка реалізує процес оброблення з одночасним поділом припуску на оброблення та подачі, виходячи з забезпечення заданого якісного параметра оброблюваної поверхні – шорсткості. За усіма методами обробки шорсткість формується від геометрії і кінематики переміщення робочої частини інструменту [10,11], пластичних і пружних деформацій у зоні контакту інструмента й оброблюваного матеріалу [10], пружних коливань технологічної системи [10,12] і копіювання шорсткості інструмента на поверхні деталі [10]. При конструюванні БРГ за запропонованою методикою враховано лише висоту мікронерівностей, утворену геометрією робочої частини інструментів, і прийнято допущення, що величина шорсткості, сформована іншими переліченими вище факторами, приймається однаковою. Суть методики визначення ТКП для БРГ, які працюють з одночасним поділом припуску на оброблення та подачу, полягає у використанні одного чорнового та трьох чистових різців, причому кожен із наступних чистових різців, починаючи з другого, розміщений в такому кутовому положенні, що його вершина суміщена з максимальною мікронерівністю, створеною проходом попереднього різця, а положення чорнового різця визначається з умови забезпечення зрівноваження всіх діючих радіальних складових сил різання. Значення головного  $\varphi$  та допоміжного  $\varphi'$  кутів у плані на чистових різцях приймаємо однаковими  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$  та  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'_3 = \varphi'$ . Нерівномірне розташування чистових різців у свою чергу спричинятиме неоднакову висоту мікронерівностей. Для усунення даного недоліку запропоновано два методи, які будуть визначати два варіанти конструкторського виконання БРГ: перший – коректування  $\varphi$  на ТЧР –  $\varphi_{3K}$ , другий –

коректуванням  $\varphi'$  на ТЧР –  $\varphi'_{3К}$ . Для вирішення поставлених завдань скористаємося загальною схемою формування шорсткості запропонованими БРГ, яка зображена на рис. 1.

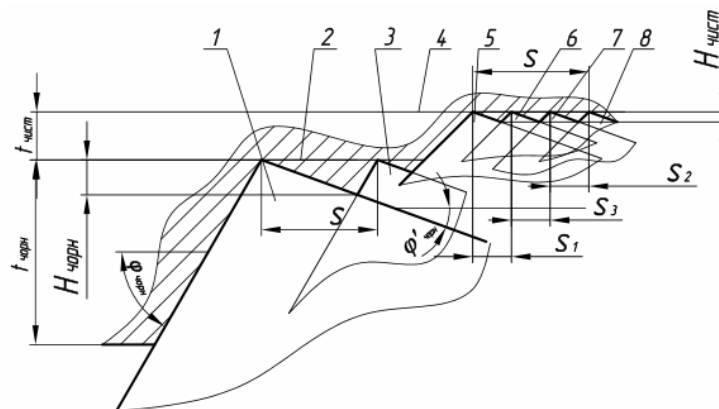


Рисунок 1. Загальна схема формування шорсткості обробленої поверхні БРГ, яка забезпечує в процесі різання одночасний поділ припуску та подачі: 3 і 1 – положення чорнового різця у момент початку здійснення оберту заготовки і у момент закінчення оберту відповідно; 2 і 4 – траєкторія руху вершин чорнового і чистових різців відповідно; 8 і 5 – відповідно положення ПЧР у момент початку здійснення оберту і у момент після закінчення оберту; 6 і 7 – відповідно положення ДЧР і ТЧР після закінчення оберту

Розглянемо схему розміщення чистових різців та формування шорсткості поверхні за I варіантом конструкторського виконання БРГ (рис. 2).

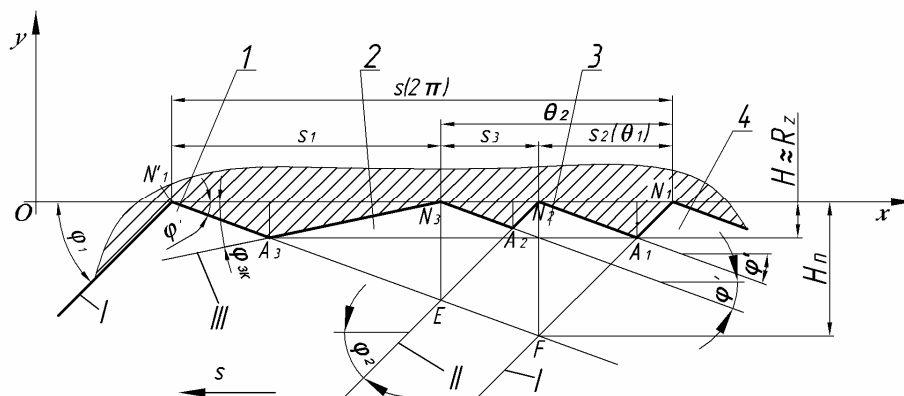


Рисунок 2. Схема розміщення чистових різців за I варіантом і формування шорсткості обробленої поверхні: 1 і 4 – відповідно положення I-го чистового різця у момент початку здійснення оберту і у момент закінчення оберту; 2 – положення II-го різця, зміщеного відносно I-го на кут  $\theta_1$ ; 3 – положення III-го чистового різця, зміщеного відносно I-го на кут  $\theta_2$

Для визначення таких технологічних параметрів, як значення подач на чистових різцях, введемо систему координат  $yOx$ . Вісь  $Ox$  направимо вправо (у напрямку, протилежному напрямку подачі) і вершини всіх чистових різців розмістимо на ній, а  $Oy$  направимо вверх. Виберемо довільну точку на осі  $Ox$  –  $N_1$  і розмістимо в ній вершину ПЧР-4 у момент початку оберту. З  $N_1$  проведемо промені під кутами  $\varphi$  та  $\varphi'$  до осі  $Ox$ . Вони відобразять положення ГРК і ДРК ПЧР у момент початку оберту. Задавшись величиною  $H \approx Rz$  і використавши [13], величина подачі на ДЧР буде

$$s_2 = H \cdot (\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \varphi'). \quad (1)$$

Отримана подача на осі  $Ox$  схематично зобразиться відрізком  $N_1N_2$ . Точка  $N_2$  відповідає вершині ДЧР-3 у момент закінчення оберту. Аналогічно побудовою отримаємо положення ГРК і ДРК ДЧР. Провівши з  $N_2$  пряму, перпендикулярну осі  $Ox$  до перетину з ГРК ПЧР у момент початку оберту, отримаємо точку F і відрізок  $N_2F$ . З F, провівши лінію під кутом  $\varphi'$  до перетину з віссю  $Ox$ , отримаємо положення ПЧР у

момент закінчення оберту – 1, а відповідно і значення подачі на оберт ( $s$ , мм/об), яка дорівнює довжині відрізка  $N'_1N_1 = N_1N_2 + N_2N'_1$  (рис. 2). Враховуючи, що  $N_1N_2 = s_2$ , а  $N_2N'_1 = N_2F \cdot \text{ctg}\varphi'$  (з  $\Delta N'_1N_2F$ ), а  $N_2F = s_2 \cdot \text{tg}\varphi$  (з  $\Delta N_1N_2F$ ), і підставивши значення подачі  $s_2$  з (1), виконавши перетворення, отримуємо

$$s = H \cdot \text{tg}\varphi \cdot (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi')^2. \quad (2)$$

Опустивши з точки  $E$ , утвореної перетином ГРК ДЧР і ДРК ПЧР у момент закінчення оберту, перпендикуляр на вісь  $Ox$ , отримуємо положення вершини ТЧР-2, яка зобразиться точкою  $N_3$ . Провівши пряму через точки  $N_3$  та  $A_3$  (точка перетину прямої паралельної осі  $Ox$ , що проходить через  $A_1$ , з ДРК ПЧР у момент закінчення оберту), отримуємо положення ГРК ТЧР, кут  $\varphi_{3K}$ , а також відрізки  $N'_1N_3$  і  $N'_3N_2$ , довжини яких відповідають значенню подач на ПЧР і ТЧР відповідно  $s_1$  і  $s_3$ .

Подачу на ПЧР –  $s_1$  можна визначити, розглянувши подібні  $\Delta N'_1N_2F$  та  $\Delta N'_1N_3E$ . Врахувавши (з  $\Delta N'_1N_2E$ ), що  $N_3E = (s - s_2) / (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi')$  та склавши пропорцію  $N'_1N_2 / N'_1N_3 = N_2F / N_3E$  і підставивши в неї значення сторін, виражені через  $s$ ,  $s_2$  та кути в плані, отримуємо  $(s - s_2) / s_1 = s_2 \cdot \text{tg}\varphi / (s - s_2 / (\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi'))$ . Спростивши дане рівняння та підставивши значення  $s_2$  з (1), отримуємо

$$s_1 = H \cdot \text{tg}\varphi \cdot (\text{ctg}\varphi')^2. \quad (3)$$

Подача на ТЧР  $s_3$  визначиться із залежності  $s_3 = s - (s_1 + s_2)$ , підставивши в яку (1), (2) та (3), знайдемо

$$s_3 = H \cdot \text{ctg}\varphi'. \quad (4)$$

Розглянувши  $\Delta N'_1N_3A_3$ , знайдемо скореговане значення  $\varphi_{K3}$  на ТЧР

$$\varphi_{K3} = \text{arccctg} \frac{s_1 - H \cdot \text{ctg}\varphi'}{H} = \text{arccctg}((\text{ctg}\varphi')^2 \text{tg}\varphi - \text{ctg}\varphi'). \quad (5)$$

Аналіз впливу  $\varphi$  та  $\varphi'$  на подачу (2) здійснимо з використанням графіків залежностей  $s$  від головного та допоміжного кутів у плані.

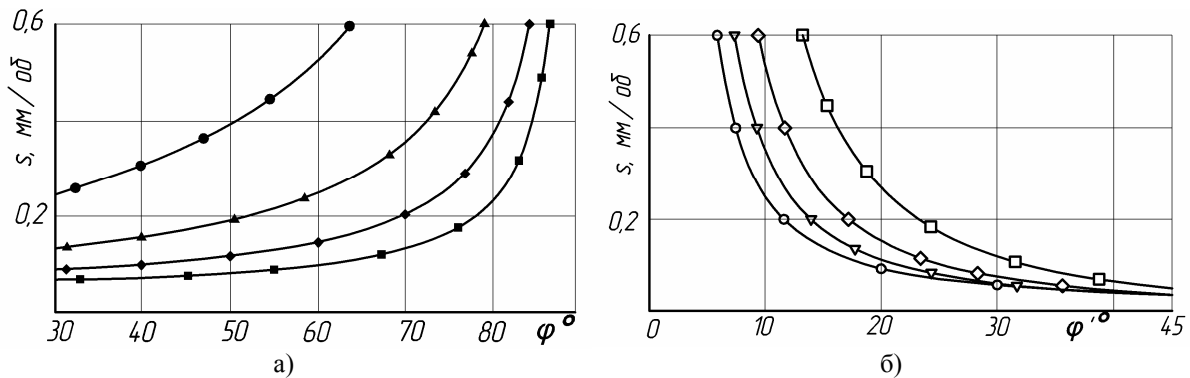


Рисунок 3. Графіки залежностей  $s$  БРГ від  $\varphi$  та  $\varphi'$  при  $H = \text{const}$ : а)  $s = f(\varphi)$  при різних значеннях  $\varphi'$ :  
 ●—●—●—  $\varphi' = 10^\circ$ ; ▲—▲—▲—  $\varphi' = 15^\circ$ ; ◆—◆—◆—  $\varphi' = 20^\circ$ ; ■—■—■—  $\varphi' = 25^\circ$ ; б)  $s = \psi(\varphi')$  при різних значеннях  $\varphi$ : ○—○—○—  $\varphi = 30^\circ$ ; ▽—▽—▽—  $\varphi = 45^\circ$ ; ◇—◇—◇—  $\varphi = 60^\circ$ ; □—□—□—  $\varphi = 75^\circ$

Аналіз графіків, зображених на рис. 3а показує, що зі збільшенням  $\varphi$  збільшується загальна величина подачі БРГ при запропонованому розташуванні різців і  $H \approx Rz = \text{const}$ . Зі збільшенням допоміжного кута в плані  $\varphi'$  (рис. 3б) значення величини  $s$  зменшується. Звідси робимо висновок, що для збільшення подачі при

поданому розміщенні різців і збереженні умови  $H \approx Rz = const$  доцільно збільшувати  $\varphi$  та зменшувати  $\varphi'$  на різцях.

Цікавим є графічне зображення залежностей впливу головного та допоміжного кутів у плані I і II чистових різців на значення скорегованого головного кута в плані ТЧР при  $H \approx Rz = const$ , які зображені на рис. 4.

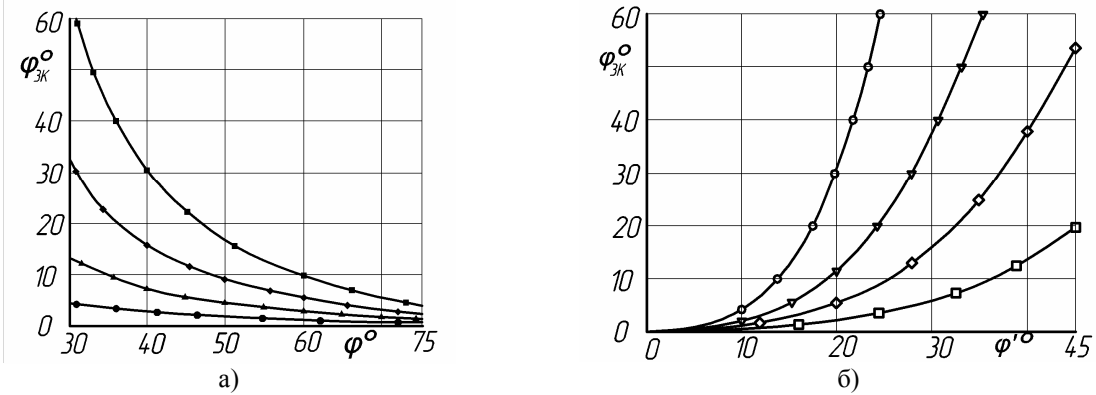


Рисунок 4. Графіки залежностей скорегованого головного кута в плані ТЧР від значень  $\varphi$  та  $\varphi'$ :  
 а)  $\varphi_{3K} = \zeta(\varphi)$  при різних  $\varphi'$ : ● — ● — ● —  $\varphi' = 10^\circ$ ; ▲ — ▲ — ▲ —  $\varphi' = 15^\circ$ ; ◆ — ◆ — ◆ —  $\varphi' = 20^\circ$ ;  
 ■ — ■ — ■ —  $\varphi' = 25^\circ$ ; б)  $\varphi_{3K} = \zeta(\varphi')$  при різних  $\varphi$ : ○ — ○ — ○ —  $\varphi = 30^\circ$ ; ▽ — ▽ — ▽ —  $\varphi = 45^\circ$ ;  
 ◇ — ◇ — ◇ —  $\varphi = 60^\circ$ ; □ — □ — □ —  $\varphi = 75^\circ$

Аналіз вищенаведених графічних залежностей показує, що зі збільшенням  $\varphi$  —  $\varphi_{3K}$  зменшується, зі збільшенням  $\varphi'$  —  $\varphi_{3K}$  збільшується. В цьому випадку характер впливу  $\varphi$  та  $\varphi'$  на  $\varphi_{3K}$  протилежний до їхнього впливу на подачу, тобто має місце технічне протиріччя, розв'язок якого, врахувавши певні обмеження, здійснимо шляхом оптимізації геометричних параметрів I та II чистових різців. Певні технічні обмеження визначаються з таких міркувань:

I. Враховуючи, що значення головного кута в плані має свої межі і не може бути меншим якогось мінімального  $\varphi_{3min}$ , то повинна виконуватись нерівність  $\varphi_{3min} \leq \varphi_3$ . Тоді перше обмеження виразиться залежностями  $\varphi_{3min} \leq \arctg((ctg \varphi')^2 tg \varphi - ctg \varphi')$ , або  $\varphi \leq \arctg \frac{ctg \varphi_{3min} + ctg \varphi'}{(ctg \varphi')^2}$ .

II. Так як значення  $\varphi_{3K}$  завжди менше від  $\varphi$ , то  $\varphi_3 \leq \varphi$ . Підставивши замість  $\varphi_{3K}$  його значення з (5), отримаємо  $\arctg((ctg \varphi')^2 tg \varphi - ctg \varphi') \leq \varphi$ . Розв'язавши дану нерівність відносно  $\varphi$ , отримаємо  $\varphi \geq \arctg 2 / ctg \varphi' (\sqrt{5} - 1)$ .

III. Взяти до уваги, що три чистові різці при такому розміщенні повинні забезпечувати шорсткість оброблення не нижчу чотирирізцевої головки з симетричним розміщенням різців, то подача  $s_2$  на другому чистовому різці  $s_2/s \leq 1/4$ . Підставивши в дану нерівність (1) і (2) і спростивши, отримаємо третє обмеження  $\varphi \leq \arctg(3 \cdot tg \varphi')$ .

IV. Виходячи із конструкторських особливостей головок, зокрема габаритів та розміщення і можливості закріплення різців необхідно, щоб виконувалась умова  $s_{min}/s \geq 1/n$ , де  $n$  — максимально конструктивно можлива кількість рівномірно розміщених різців на розточній головці для даних габаритів. Підставивши в попередню нерівність замість  $s_{min}$  —  $s_3$  (як мінімальна подача з трьох) і  $s$  з (2) та розв'язавши відносно  $\varphi$ , отримаємо четверте обмеження  $\varphi \leq \arctg(ctg \varphi' (n - 2 + \sqrt{n^2 - 2n}) / 2)$ .

Очевидні такі обмеження:

V.  $\varphi_{\min} \leq \varphi$ ;

VI.  $\varphi \leq \varphi_{\max}$ ;

VII.  $\varphi'_{\min} \leq \varphi'$ ;

VIII.  $\varphi' \leq \varphi'_{\max}$ .

Задавшись функцією мети, яка виражається в тому, що продуктивність обробки при забезпеченні заданої шорсткості повинна бути максимальною, тобто  $s \rightarrow \max$ , отримаємо систему рівнянь, яка являє собою математичну модель геометричних параметрів (кутів у плані) різців головки.

$$\left. \begin{aligned} \varphi &\leq \arctg\left(\frac{\text{ctg}\varphi_{\min} + \text{ctg}\varphi'}{(\text{ctg}\varphi')^2}\right) \\ \varphi &\geq \arctg\left(2 / \text{ctg}\varphi'(\sqrt{5}-1)\right) \\ \varphi &\leq \arctg(3 \cdot \text{tg}\varphi') \\ \varphi &\leq \arctg\left(\text{ctg}\varphi'(n-2 + \sqrt{n^2-2n})/2\right) \\ \varphi &\geq \varphi_{\min} \\ \varphi &\leq \varphi_{\max} \\ \varphi' &\geq \varphi'_{\min} \\ \varphi' &\leq \varphi'_{\max} \end{aligned} \right\} H \approx Rz = \text{const}; \quad s \rightarrow \max$$

Розв'язок отриманої системи проілюструємо графічно (рис 5). У системі координат  $\varphi O \varphi'$  зображені обмеження, графіки яких позначені відповідними римськими цифрами.

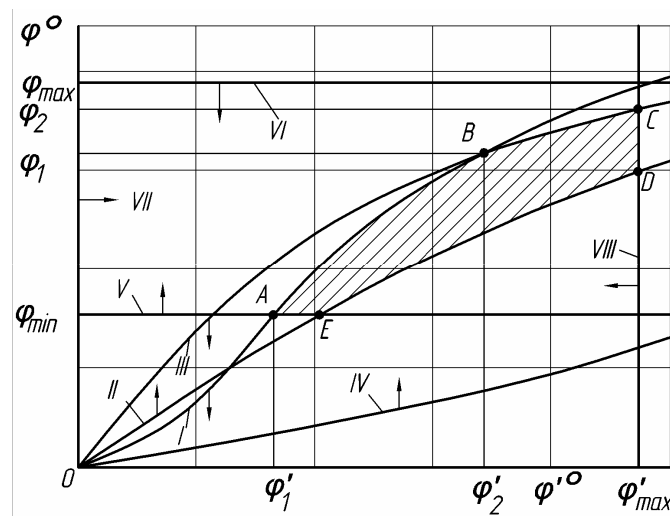


Рисунок 5. Графічна ілюстрація обмежень пошуку оптимальних значень  $\varphi$  та  $\varphi'$  для I варіанта конструктивного виконання БРГ

Аналіз зображених графіків (рис. 5) показав, що множина оптимальних значень  $\varphi = \varphi_{opt}$  та  $\varphi' = \varphi'_{opt}$ , які можна використовувати при проектуванні вищеописаних розточних головок лежить в середині квазіопуклого багатокутника  $ABCDE$  (заштрихована область).

Враховавши функцію мети –  $s \rightarrow \max$  при забезпеченні заданого значення шорсткості і виходячи з рис. 4а,б, задавшись, наприклад,  $\varphi'_{\min} \leq \varphi'_{opt} \leq \varphi'_{\max}$ , – значення  $\varphi_{opt}$  необхідно вибрати на лінії  $ABC$ , яка обмежує оптимальні значення кутів у плані.

Рівняння лінії ABC буде визначатися системою

$$\varphi_{onm} = \begin{cases} \arctg \frac{ctg \varphi_{3min} + ctg \varphi'_{onm}}{(ctg \varphi'_{onm})^2} & \text{при } \varphi'_1 \leq \varphi'_{onm} \leq \varphi'_2 \\ \arctg(3 \cdot tg \varphi'_{onm}) & \text{при } \varphi'_2 \leq \varphi'_{onm} \leq \varphi'_{max} \end{cases} \quad (6)$$

Значення  $\varphi'_1$  та  $\varphi'_2$  знайдемо як абсиси координат точок А і В, які утворюються внаслідок перетину ліній відповідно I і V та I і III обмежень. Отримаємо  $\varphi'_1 = \text{arcctg} \frac{ctg \varphi_{min} (1 + \sqrt{1 + 4ctg \varphi_{3min}})}{2}$  та  $\varphi'_2 = \text{arcctg} \frac{ctg \varphi_{3min}}{2}$ .

Проілюструємо за допомогою графіків залежностей величини подачі  $s$  від  $H$  за (5), при різних значеннях  $\varphi'_{i\omega}$  та  $\varphi_{i\omega} = \psi(\varphi'_{i\omega})$ , визначення максимальної подачі на оберт БРГ.

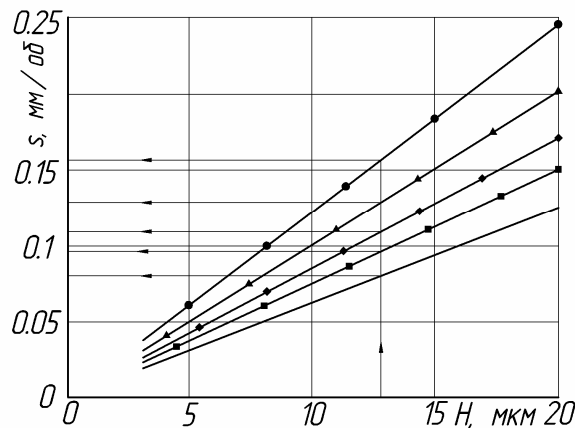


Рисунок 6. Графіки залежностей  $s = \psi(H)$  при оптимізованих значеннях  $\varphi_{onm} = \psi(\varphi'_{onm})$  та різних значеннях  $\varphi'_{onm}$ : ●—●—●—  $\varphi'_{onm} = 20^\circ$ ; ▲—▲—▲—  $\varphi'_{onm} = 25^\circ$ ; ◆—◆—◆—  $\varphi'_{onm} = 30^\circ$ ; ■—■—■—  $\varphi'_{onm} = 35^\circ$ ; — —  $\varphi'_{onm} = 40^\circ$

Практична цінність поданих графіків (рис. 6) полягає в тому, що оптимізувавши значення  $\varphi'_{onm}$  та  $\varphi_{onm}$  за залежністю (6) та рис. 5, можна призначати подачу на оберт, яка б забезпечувала задану теоретичну шорсткість поверхні.

Розглянемо схему розміщення чистових різців та формування шорсткості поверхні за II варіантом конструкторського виконання БРГ (рис. 7).

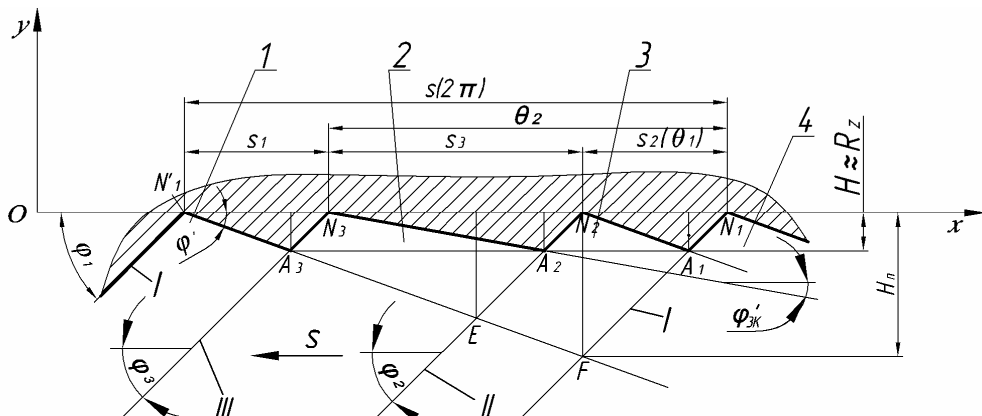


Рисунок 7. Схема розміщення чистових різців і формування шорсткості поверхні за II варіантом: 1 – положення I-го чистового різця у момент початку здійснення оберт; 2 – положення II-го різця, зміщеного відносно I-го на кут  $\theta_1$ ; 3 – положення III-го чистового різця, зміщеного відносно I-го на кут  $\theta_2$ ; 4 – положення I-го різця у момент закінчення оберт



Для визначення таких технологічних параметрів, як значення подач на чистових різцях, введемо систему координат  $yOx$ . Принцип розміщення ПЧР до початку оберту та після закінчення оберту – 1 та 4 відповідно, ДЧР після закінчення оберту – 3 аналогічний до принципу їх розміщення за I варіантом конструкторського виконання БРГ. ТЧР встановлюємо так, щоб висота мікронерівностей, утворених у результаті контактів ГРК ТЧР та ДРК ПЧР дорівнювала  $H \approx Rz = const$ , а шляхом корегування значення допоміжного кута в плані на ТЧР  $\varphi'_{3K}$  добиваємося, щоб висота мікронерівностей, утворених у результаті контактів ГРК ДЧР та ДРК ТЧР, теж дорівнювала заданій  $H \approx Rz = const$ . У цьому випадку  $s_2$  та  $s$  визначаються за формулами (1) та (2) відповідно,  $s_1 = s_2$ , а  $s_3 = s - (s_1 + s_2)$ , або

$$s_3 = H \cdot (\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} \varphi'^2 - \operatorname{ctg} \varphi). \quad (7)$$

Скореговане значення  $\varphi'_{3K}$  визначається за формулою  $\varphi'_{3K} = \operatorname{arccctg}((s_3 - H \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2) / H)$  або

$$\varphi'_{3K} = \operatorname{arccctg}(\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} \varphi'^2 - 2 \operatorname{ctg} \varphi). \quad (8)$$

Враховуючи, що в цьому випадку  $s$  визначається так само, як і в попередньому, то характер впливу  $\varphi$  та  $\varphi'$  на  $s$  буде таким самим, як у I варіанті конструктивного виконання БРГ.

Графічні залежності впливу головного та допоміжного кутів у плані на величину скорегованого допоміжного кута на ТЧР  $\varphi'_{3K}$  зображено на рисунку 8.

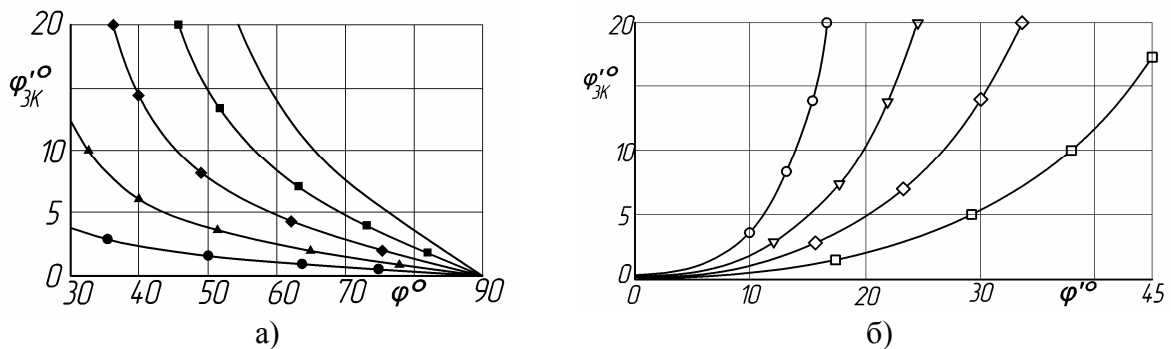


Рисунок 8. Графіки залежностей скорегованого допоміжного кута в плані ТЧР від значень головного та допоміжного кутів у плані:  $\varphi'_{3K} = \rho(\varphi)$  при різних  $\varphi'$ :  $\bullet$  —  $\varphi' = 10^\circ$ ;  $\blacktriangle$  —  $\varphi' = 15^\circ$ ;  $\blacklozenge$  —  $\varphi' = 20^\circ$ ;  $\blacksquare$  —  $\varphi' = 25^\circ$  —  $\text{—}$  —  $\varphi' = 30^\circ$ ; б)  $\varphi'_{3K} = \sigma(\varphi')$  при різних  $\varphi$ :  $\circ$  —  $\varphi = 30^\circ$ ;  $\nabla$  —  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\diamond$  —  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\square$  —  $\varphi = 75^\circ$

З вищенаведених графіків бачимо, що зі збільшенням  $\varphi$  — значення скорегованого допоміжного кута ТЧР  $\varphi'_{3K}$  зменшується, а зі збільшенням  $\varphi'$  — збільшується. Характер впливу  $\varphi$  та  $\varphi'$  на  $\varphi'_{3K}$  протилежний до їх впливу на подачу, тобто має технічне протиріччя, розв'язок якого, врахувавши певні обмеження, здійснимо шляхом оптимізації геометричних параметрів чистових різців. Певні технічні обмеження визначаються з таких міркувань:

I.  $\varphi'_{3K}$  повинен бути більшим якогось мінімального значення, тобто  $\varphi_{3K} > \varphi'_{\min}$ .

II.  $\varphi'_{3K}$  не може бути більшим, ніж  $\varphi'$ , тобто  $\varphi' \geq \operatorname{arccctg}(\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} \varphi'^2 - 2 \operatorname{ctg} \varphi)$ , виразивши  $\varphi$  через  $\varphi'$ , отримаємо  $\varphi \geq \operatorname{arccctg}(\operatorname{ctg} \varphi' / 2)$ .

III. Враховуючи, що 3 чистові різці при такому розміщенні повинні забезпечувати шорсткість не нижчу чотирирізцевої головки з симетричним

розміщенням, то подача  $s_2$  на ДЧР  $s_2/s \leq 1/4$ . Підставивши замість  $s_2$  і  $s$  їх значення з (1) і (2) відповідно та розв'язавши відносно  $\varphi$  отримаємо:  $\varphi \leq \arctg(3 \cdot \operatorname{tg} \varphi')$ .

IV. Враховуючи конструкторські особливості головок, зокрема габарити та можливість закріплення різця, необхідно виконати умову, щоб  $s_{\min}/s \geq 1/n$ . Підставивши замість  $s_{\min}$  значення  $s_2$  з (1), а замість  $s$  значення з (2) та розв'язавши відносно  $\varphi$ , отримаємо  $\varphi \leq \arctg((n-1) \cdot \operatorname{tg} \varphi')$ .

Інші обмеження аналогічні до обмежень конструктивного виконання БРГ за I варіантом.

Задавшись функцією мети, яка виражається в тому, що продуктивність обробки при забезпеченні заданої шорсткості повинна бути максимальною, тобто  $s \rightarrow \max$ , отримаємо систему рівнянь, яка являє собою математичну модель геометричних параметрів (кутів у плані) різців головки.

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{3K} &> \varphi'_{\min} \\ \varphi &\geq \arctg(\operatorname{ctg} \varphi' / 2) \\ \varphi &\leq \arctg(3 \cdot \operatorname{tg} \varphi') \\ \varphi &\leq \arctg((n-1) \cdot \operatorname{tg} \varphi') \\ \varphi &\geq \varphi_{\min} \\ \varphi &\leq \varphi_{\max} \\ \varphi' &\geq \varphi'_{\min} \\ \varphi' &\leq \varphi'_{\max} \end{aligned} \right\} H \approx Rz = \text{const}; \quad s \rightarrow \max$$

Розв'язок отриманої системи проілюструємо графічно (рис. 9). У системі координат  $\varphi O \varphi'$  зображені обмеження, графіки яких позначені відповідними римськими цифрами.

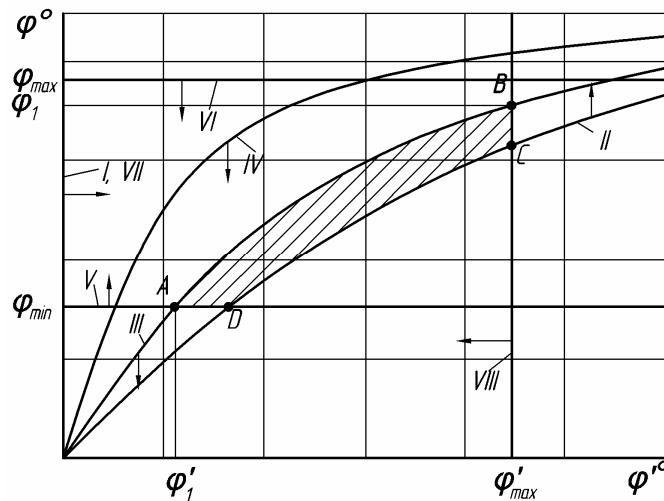


Рисунок 9. Графічна ілюстрація обмежень пошуку оптимальних значень  $\varphi$  та  $\varphi'$  для II варіанта конструктивного виконання БРГ

Аналізуючи подані графіки (рис. 6), бачимо, що множина значень  $\varphi$  та  $\varphi'$ , які можна використовувати при проектуванні БРГ даного типу лежить в середині квазіопуклого багатокутника  $ABCD$  (заштрихована область).

Враховавши функцію мети –  $s \rightarrow \max$ , при забезпеченні заданого значення шорсткості, задавшись, наприклад,  $\varphi'_1 \leq \varphi'_{opt} \leq \varphi'_{\max} - \varphi_{opt}$ , необхідно вибирати на лінії  $AB$ , яка обмежує значення кутів, що задовольняють умови всіх обмежень.

Рівняння лінії АВ запишемо у вигляді

$$\varphi_{onm} = \arctg(3 \cdot \tg \varphi'_{onm}) \quad \text{при} \quad \varphi'_1 \leq \varphi'_{onm} \leq \varphi'_{\max} \quad (9)$$

Значення  $\varphi'_1$  знайдемо як абсцису координат точки А, які утворюються внаслідок перетину ліній III та V обмежень. Отримаємо  $\varphi'_1 = \arctg(\tg \varphi_{\min}/3)$ .

Графіки залежностей величини подачі  $s$  від  $H$  за залежністю (5), при різних значеннях  $\varphi'_{onm}$  та  $\varphi_{onm} = \rho(\varphi'_{onm})$ , зображено на рис. 10.

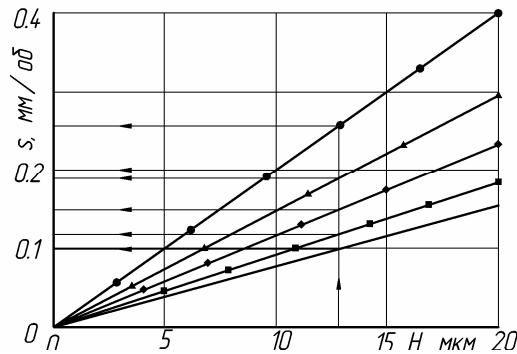


Рисунок 10. Графіки залежностей  $s = \psi(H)$  при оптимізованих значеннях  $\varphi_{onm} = \rho(\varphi'_{onm})$  та різних  $\varphi'_{onm}$ : ●—●—●—●—  $\varphi'_{onm} = 15^\circ$ ; ▲—▲—▲—▲—  $\varphi'_{onm} = 20^\circ$ ; ◆—◆—◆—◆—  $\varphi'_{onm} = 25^\circ$ ; ■—■—■—■—  $\varphi'_{onm} = 30^\circ$ ; —————  $\varphi'_{onm} = 35^\circ$

Практична цінність поданих графіків (рис. 10) полягає в тому, що, визначивши значення  $\varphi'_{onm}$  та  $\varphi_{onm}$  за залежністю (9) та рис. 9, можна призначити подачу на оберт, яка б забезпечувала задану теоретичну шорсткість поверхні.

Знаючи значення подач як для першого так і для другого варіантів, можна визначити такі конструкторські параметри головок, як кути розміщення різців.

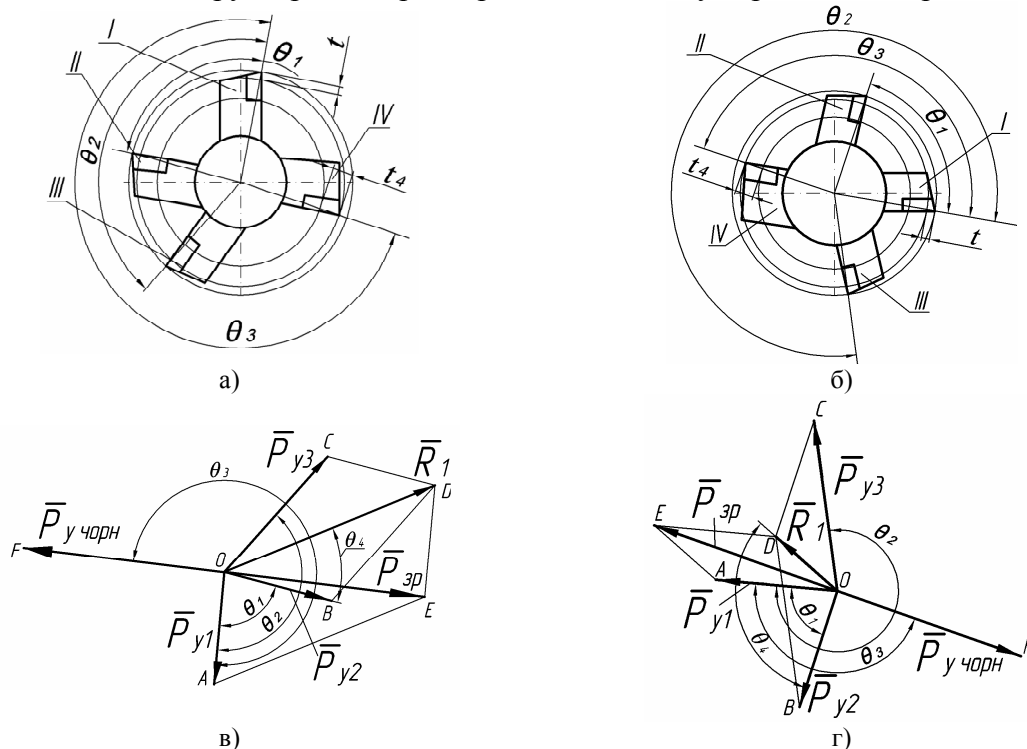


Рисунок 11. Схеми розміщення чорнових та чистових різців за I (а) і II (б) варіантами та розрахункові схеми для визначення кутових положень різців за I (в) та другим (г) варіантами відповідно: I, II, III і IV – відповідно ПЧР, ДЧР, ТЧР і чорновий різець

Такі конструкторські параметри БРГ, як центральні кути, які регламентують кругове положення (розміщення) різців, визначимо, скориставшись рис. 11. Значення кутів  $\theta_1$  і  $\theta_2$ , які забезпечують відповідно кутове зміщення ДЧР і ТЧР відносно ПЧР, визначимо за формулами

$$\theta_1 = 2\pi \cdot s_2 / s, \quad (10)$$

$$\theta_2 = 2\pi \cdot (s_2 + s_3) / s. \quad (11)$$

Для визначення кутового розміщення чорнового різця відносно ПЧР, а також глибин різання на чорновому та чистових різцях з умови зрівноваження складових сил різання чистових різців  $P_{Y_i}$ , скористаємося схемами (рис.12 а,б) та методикою, описаною в [13].

Кутове положення чорнового різця відносно ПЧР визначиться за формулою

$$\theta_3 = \pi + \arcsin \frac{\eta \cdot \sin(\arcsin(s_2^y K_{\varphi_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{\eta}) + \theta_1)}{\sqrt{s_1^{2y} K_{\varphi_1}^2 + \eta + 2s_1^y K_{\varphi_1} \sqrt{\eta} \cos(\arcsin(s_2^y K_{\varphi_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{\eta}) + \theta_1)}}, \quad (12)$$

де  $\eta = s_2^{2y} \cdot K_{\varphi_2}^2 + s_3^{2y} \cdot K_{\varphi_3}^2 + 2s_2^y s_3^y K_{\varphi_2} K_{\varphi_3} \cdot \cos \theta_2$ .

Визначимо глибини різання на чорновому та чистових різцях з умови зрівноваження радіальних сил  $\bar{P}_{\varphi\delta} = \bar{P}_{Y+i\delta}$ , де  $P_{Y+i\delta} = C \cdot t_4^x \cdot s^y \cdot V_4^n \cdot K_{\varphi_x}$  [14]. Врахувавши, що  $V_4 \approx V$ , а  $t_4 = z - t$ , отримаємо величину глибини різання на чистових різцях

$$t = \frac{z}{2} \left( \frac{s^y \cdot K_{\varphi_4}}{s_1^{2y} K_{\varphi_1}^2 + \eta + 2s_1^y K_{\varphi_1} \sqrt{\eta} \cos(\arcsin(s_2^y K_{\varphi_2} \sin(\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{\eta}) + \theta_1)} \right)^{1/x}. \quad (13)$$

Визначення ТКП дає змогу здійснити проектування БРГ для конкретних умов оброблення при відповідних заданих параметрах.

**Висновки.** Розроблена вперше методика визначення технологічно-конструкторських параметрів, які забезпечують у процесі різання одночасний поділ припуску та подачі. Розглянуто, виходячи з геометричних та конструкторських параметрів різців, два можливих варіанти виконання БРГ. Показано переваги другого варіанта, які полягають у тому, що рівність головних кутів у плані на чистових різцях дає можливість одночасного їх перезагострювання, а корегування значення допоміжного кута в плані на ТЧР розширює область застосування БРГ, забезпечуючи більшу продуктивність. Рівність глибин різання на чистових різцях, а також подач на ПЧР та ДЧР забезпечує рівність радіальних складових сил різання, що сприяє зрівноважуванню БРГ. Для проектування таких БРГ отримано залежності, які дають можливість встановлювати технологічні (подачі на оберт та на окремий чистовий різець і глибини різання на чорновому та чистових різцях), а також конструкторські (взаємне розташування різців) параметрів БРГ. Проведено оптимізацію геометричних параметрів чистових різців з умови забезпечення максимальної продуктивності оброблення й подано графічні залежності, за якими можна визначити подачу на оберт головки залежно від параметра шорсткості обробленої поверхні та значення кутів у плані.

**Література**

1. Семенченко И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М.Матюшин, Г.Н. Сахаров. – М.: Машгиз, 1963. – 952с.
2. Кочеровский Е.В. Расточная головка для тонкого растачивания отверстий / Е.В. Кочеровский, Г.М.Лихицер, В.А. Ухачев // Станки и инструмент. – 1984. – №9. – С. 15–16.
3. Карпусь В.Е. Эффективное растачивание основных отверстий двухрезцовой оправкой / В.Е.Карпусь, Д.А. Миненко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – Вып. 76. – С 63–66.
4. Железнов Г.С. Расточной инструмент / Г.С Железнов, Ю.А. Голоднова, С.Г. Железнова //Станки и инструмент. – 2004. – №8. – С. 39–41.
5. А. с. 1814986 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 В 29/03. Расточная головка / Ю.Я. Жидеев (СССР). – № 4772085/08; заявл. 21.12.89; опубл. 15.05.1993, Бюл. №18.
6. Григорьев В.В. Расточная головка для обработки глубоких отверстий / В.В. Григорьев, А.М.Емельянов, Е.Я. Самсонов // Станки и инструмент. – 1980 – №9. – С. 22–23
7. Пат. 2104827 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В23 В31/03. Расточная головка / Самыкин В.Н., Волков А.Н., Бурмистров Е.В.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. – №94025997/02; заявл. 12.07.1994; опубл. 20.02.1998.
8. А. с. 1565595 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 В 29/03. Многорезцовая расточная головка для обработки глубоких отверстий / В.В. Григорьев, К.В. Воскобой (СССР). – № 4300551/31-08; заявл. 01.06.87; опубл. 23.05.1990, Бюл. №49.
9. А. с. 1053973 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 В 29/03. Расточная головка / Н.Ф. Уткин, В.В. Григорьев, Н.С.Силин, М.Н. Коростелев (СССР). – № 3317409/25-08; заявл. 15.07.81; опубл. 15.11.1983, Бюл. №42.
10. Сулов А. Теоретическое описание параметров шероховатости поверхностей при механической обработке / А. Сулов // Труды Второй международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы фундаментальных наук»: в 7 т.; под ред. И.Б. Федорова, К.С. Колесникова, А.О. Карпова. – М.: Техносфера-Информ, 1994. – Т.5. Симпозиум «Промышленные технологии в современной техносфере». – С 107–109.
11. Кривий П.Д. Геометричні та математичні моделювання формування шорсткості поверхні при точінні та розточуванні /П.Д. Кривий, В.В. Крупа // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2010. – №2. – С. 44–55.
12. Луців І.В. Формування шорсткості і хвилястості поверхні при багатолезовій адаптивній обробці / І.В. Луців // Вісник ТДТУ. – 1999. – Том 4, № 3. – С. 135–138.
13. Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів / П.Д. Кривий, В.В. Крупа, В.І. Продан // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15, № 1. – С. 147–156. (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).
14. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т.; под. ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т2. – 496с.

*Отримано 08.12.2010*