ВИСША АТЕСТАЦИОННА КОМИСИЯ СПЕЦИАЛИЗИРАН НАУЧЕН СЪВЕТ ПО ТЕХНОЛОГИЯ НА МАШИНОСТРОЕНЕТО И МЕТАЛОРЕЖЕЩИ МАШИНИ

Инж. Красимир Атанасов Иванов

РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА НОВА КОНСТРУКЦИЯ РЕЖЕЩО-ДЕФОРМИРАЩИ РЕЗБОНАРЕЗНИ ПЛАШКИ

Дисертация за присъждане на образователна и научна степен "ДОКТОР"

> Русе 2010 г.

ВЪВЕДЕНИЕ

Ефективността на механичното обработване е комплексен показател, който наред с всички останали условия, отчита и ролята на режещите инструменти, тяхното влияние върху производителността, икономичността и металоемкостта. Като съставна част от системата, режещите инструменти оказват решаващо въздействие върху нейната ефективност, върху условията на протичане на процеса рязане и качеството на получаваните повърхнини на детайлите. В това си качество инструментите са неотменима част от технологичната система, в която всички съставни части са взаимосвързани и е необходимо хармонично да се съчетават и допълват. Това е особено важно за установено производство, когато внедряването на нови усъвършенствани видове инструменти често не може да обезпечи ефективното им използване без модернизиране на другите съставни части на системата.

При избор на инструмент за обработване на конкретни изделия в определени условия на експлоатация, от гледна точка на подобряване на производителност, работоспособност и качество на обработването, в болшинството от случаите поподходящ ще бъде този инструмент, който е специално създаден за такива условия на работа. В тази връзка като критерий за приложимост на инструментите може да бъде способността им да се адаптират към различните условия на експлоатация чрез промяна на геометричните и други параметри преди използването им. Възможността да се трансформират е една от задължителните особености на инструментите с широко приложение.

За нуждите на проектно-конструкторските дейности, а също и за условията на оптимална експлоатация на инструменталната екипировка от решаващо значение са параметрите на силовото натоварване на технологичната система. Ако за определянето на експлоатационни те условия е по-удобно силите да се представят като функция на технологични параметри – елементите на режима на рязане, то в останалите случаи и като по-универсален метод се налага използването на специфичната сила, представена като зависимост само от елементите и площта на срязвания слой. Този подход е особено удачен в случаите на резбонарязване, когато част от работните движения и елементите на режима на рязане са заложени в конструктивните и геометрични параметри на използваните инструменти. По такъв начин оптимизирането на конструкцията непосредствено се отразява на ефективната експлоатация и води до подобряване на качеството на обработваните повърхнини.

1. Развитие на резбонарязването с режещи плашки

1.1. Методи за обработване на резби

Голямото многообразие и широкото практическо приложение на резбовите съединения са предпоставка за възникването и развитието на множество методи за тяхното формообразуване. Според класификациите, представени в литературните източници [22,50,51,52,59], те се разпределят в три основни групи (фиг.1.1): методи за първично формообразуване, резбонарязващи методи и методи за формообразуване чрез пластично деформиране.



Фиг.1.1. Методи за резбообработване [50,59].

Първата група методи не са характерни за точното машиностроене. Получените посредством тях резби в последствие най-често се дообработват.

Към втората група се отнасят методите, при които резбовите повърхнини се формират чрез стружкоотнемане. Тази група методи се реализират с инструменти с геометрично определени режещи ръбове.

Третата група включва методите за формиране на резбите чрез пластично деформиране на обработвания материал в ненагрято състояние. Чрез използваната при тях инструментална екипировка и оборудване се осигурява висока производителност, поради която основно се прилагат в едросерийното и масовото производство при формиране резбите на скрепителни елементи [51].

Довършващото обработване се включва в технологичния процес, когато към резбите [63] се предявяват завишени изисквания за точност и грапавост. Към него спадат шлифоването и притриването, както и редица електро-физични и електрохимични методи. Последните намират приложение за фино обработване, първично резбоформиране на сложни и недостъпни повърхнини на детайли от трудно обработваеми материали с твърдост по Бринел HB > 330, якост на опън $R_m \ge 1200$ МРа и относително удължаване $A \le 5\%$.

1.2. Конструкции плашки

Кръглите плашки се използват за ръчно или машинно нарязване на външни резби, попадащи в широк диапазон от диаметри и стъпки. Инструменталното тяло наподобява гайка, на която са оформени стружкови отвори (канали), образуващи режещи гребени [49]. Всеки гребен притежава две режещи части с еднакви параметри – от двете челни страни и калиброваща част, разположена между режещите части (фиг. 1.3). Съществуващите конструкции на този тип инструменти не се различават по принцип на работа и по основните си конструктивни елементи и параметри независимо от фирма производител, предназначение и област на приложение. Широко разпространени са, [23,43, 79, 85]:

- кръглите плашки (фиг.фиг. 1.4, 1.5, 1.6 а) и техните разновидности с шестостенен корпус (фиг. 1.6 б) и квадратен корпус (фиг. 1.6 в);

- тръбните плашки (фиг. 1.6 г);

- тръбни за ситни резби (фиг. 1.6 д);

- шлосерски призматични (за шлосерски клуп) плашки (фиг. 1.6 е) [43].

Режещите части са формирани по конусна инструментална повърхнина, в резултат на което, изрязването на прибавката (впадините на резбата) се разпределя

между определен брой зъби и се реализира генераторната схема на работа на инструмента.

Основните конструктивни и геометрични елементи на цилиндричните плашки са (фиг. 1.3):



Фиг. 1.3 Конструкция на класическа кръгла плашка [43]

- външен диаметър *D*, *mm*;
- широчина *В, тт*;
- брой на стружковите отвори *z* (съответно брой на режещите гребени);
- режеща *l_p* и калиброваща *l_k* части, *mm*;
- широчина на гребените *b, mm*;
- диаметър и разположение на стружковите отвори, *mm*;
- геометрични параметри на режещата част: задни *α_p* и предни *γ_p* ъгли, главен установъчен ъгъл *κ_r*, в градуси;
- конусни отвори и канал за закрепване и регулиране на плашката;
- параметри на резбата това са външният d, средният d₂ и вътрешният d₁
 диаметри, стъпката на резбата P и профилният ъгъл α.



Фиг. 1.4 Кръгла цяла нерегулируема плашка



Фиг. 1.5 Кръгла цяла регулируема плашка с конусен радиален или тангенциален регулиращ винт

Външните размери *D*, *B* и диаметрите на стружковите отвори зависят от размерите на нарязваната резба. С тяхното нарастване се подобряват условията за отвеждане на стружките и възможностите за поместване на достатъчно навивки в режещите и калиброващата части. Прекомерното им увеличаване, обаче води до преразход на инструментален материал, нарастване на номенклатурата на инструментите и на технологичната екипировка, използвана при производството и експлоатацията им, появяват се и технологични затруднения при изработването им.

Унифицирането на тези параметри и регламентирането им в стандарти, позволява за няколко близки по размер резби, да се изработват плашки с еднакви диаметри *D* и широчини *B*.

Броят на стружковите отвори при плашките се определя в зависимост от диаметъра на резбата (от 2 до 52 mm) и се колебае в границите от 3 до 7 [38, 43, 49]. По-малкият брой отвори води до увеличаване на натоварването на всеки отделен режещ гребен, но същевременно и до намаляване на специфичната сила на рязане поради нарастващата дебелина на срязвания слой [43]. При плашки за резби с диаметри 2 – 5 mm, а също така и за подобряване на геометричните параметри, понякога се изработват допълнителни отвори за разширяване на съществуващите (фиг. 1.6 в).



б)



a)









д)



- Фиг. 1.6 Разновидности на плашките:
- а) кръгла
- б) шестостенна
- в) квадратна
- г) тръбна
- д) тръбна за ситни резби
- е) шлосерска призматична

Броят, разположението и диаметрите на стружковите отвори влияе съществено върху работата на плашките и чрез широчината на режещите зъби (гребени) *b* и широчината на просвета *c* (фиг. 1.3.). Не съществува определена закономерност при определянето на съотношението *b/c*. От много фирми - производители на плашки е прието да се спазва препоръката b/c = (0,65 – 0,7), по-рядко 0,6 или 0,8 [23,43, 79, 85].

Основната част от прибавката при нарязване на резби с кръгли плашки се изрязва от режещите им части, формирани по вътрешни конусни производящи повърхнини, най-често с ъгъл при върха на конуса $2\kappa_r = 50^\circ$, което осигурява дебелини на срязвания слой 0,063 до 0,375 mm при различните съчетания от стъпки и брой на режещите гребени. При тези стойности на установъчните ъгли се осигурява дължината на режещите части l_p да обхваща две, две и половина навивки от резбата на плашката. В зависимост от обработваните материали се препоръчват плашки с различни установъчни ъгли [38, 43, 49]. При формиране на резби на детайли от високояки материали - $2\kappa_r = 20 - 40^\circ$, при материали със средна или малка твърдост - $2\kappa_r = 50^\circ$. Увеличаването на стъпката води до намаляване на установъчните ъгли. Така например, при ситни метрични резби или при тръбни резби със стъпки до 2 mm - $2\kappa_r = 50^\circ$, при стъпки 2 – 3 mm - $2\kappa_r = 40^\circ$, а при стъпки над 3 mm - $2\kappa_r = 30^\circ$. В случаите, когато се изисква скъсяване на недонарязаният участък на резбата, или за изработване на резби близо до челна повърхнина, се допуска установъчните ъгли да достигнат стойности $2\kappa_r = 90 - 100^\circ$.

Като правило плашките се изработват двустранни, т.е. с режещи части, оформени откъм двете им челни страни, но за определени случаи могат да бъдат и с едностранно изработена режеща част.

За дооформяне и калиброване на резбата и за по-добро ориентиране на плашката по време на работа, служи калиброващата част, обхващаща 3 - 6 навивки с пълен профил на резбата. Поради технологични затруднения калиброващите части не се затиловат. Увеличаването на дължината на калиброващата част l_k над посочените стойности не се препоръчва, защото нараства триенето по профила на резбата при работа и нарастват деформациите на резбата и ъгловото положение на режещите гребени при закаляването на плашките.

Обикновено резбовите повърхнини на плашките се изработват със степен на точност *6g* и по-рядко *6h*.

Предните ъгли γ_p и задните ъгли α_p (фиг. 1.3) определят формата, размерите и



Фиг. 1.7 Увеличаване на предните ъгли чрез подточване [43]

якостта на режещия клин. Предният ъгъл се избира в зависимост от обработвания материал: за твърди материали 10 - 15°, а за материали с по-ниска твърдост 20 - 25°. В особености резултат ОТ някои на технологичния процес на изработване и заточване на плашките и при увеличаване на диаметъра на стружковите отвори, действителните предни ъгли са около или помалки от 10°. За подобряване на условията на

рязане се препоръчва [43] предният ъгъл на режещата част е по-голям от този на калиброващата част. Реализира се чрез допълнително обработване на част от стружковите отвори по предната повърхнина (подточване) с конусни режещи или абразивни инструменти, чиято ос е установена под ъгъл 15° спрямо оста на плашката (фиг.1.7). При изпълнението на тази операция обикновено ъглите на наклона на режещите ръбове са с нулеви стойности - $\lambda_s = 0^\circ$. Отместването на конусния инструмент към оста на плашката води до получаването на положителни стойности на λ_s , което от своя страна благоприятства отвеждането на отделените при работа стружки извън стружковите отвори и предпазва от попадането им под следващите режещи гребени.

За осигуряване на нужните за нормална работа на плашките задни ъгли α_p , режещите части на плашките се оформят чрез осово затиловане по върховете на зъбите с конусни абразивни инструменти. Оформените задни повърхнини са с образуваща линия в равнина, перпендикулярна на оста на плашката близка до архимедова спирала. Височината на радиално затиловане K_r , отнесена към точка от режещия ръб с диаметър

 d_{l} е: $K_{r} = \frac{\pi d_{1}}{z} tg \alpha_{p}$, а височината на осовото затиловане в същата точка е: $K_{oc} = \frac{\pi d_{1}}{z} tg \alpha_{p} tg \kappa_{r}$. Във всяка друга точка от режещия ръб, задните ъгли са с различни стойности, зависещи от диаметъра на окръжността, минаваща през разглежданата точка. Стандартните кръгли плашки се изработват със задни ъгли от 6 до 9°. Този начин на оформяне на главните задни повърхнини не засяга страничните повърхнини на профила на резбата. Препоръчва се при обработване на по-пластични материали

задните ъгли да се увеличават, за да не се получава накъсване на навивките на резбата. Формирането на предните и главните задни повърхнини на плашките се извършва с абразивни инструменти и е най-бавната, сложна и трудоемка операция от технологичния процес на изработването им, която ограничава производителността и увеличава технологичната себестойност на плашките.

Като технологична база при установяване на плашките се използват външните цилиндрични повърхнини, изработвани с точност f10 [23, 83], а за опорна база служи една от челните повърхнини на инструмента, като при това другата, активна челна повърхнина отстои на разстояние В Js12. За закрепване на плашките служат изработените по външния цилиндър през 90° 4 конусни гнезда, в които се затягат крепежните винтове на приспособленията – въртоци, втулки и др. За закрепване може да бъде използван и централният канал на плашките, но основното му предназначение е да служи за базова повърхнина при точното ориентиране на плашката на някои от технологичните операции в процеса на изработването им. При шестостенните и квадратните плашки тези гнезда и канали не се изработват, тъй като многостенната форма е достатъчна за предаване на нужния въртящ момент при работа.

За изработването на плашките се използва бързорежеща стомана – преди всичко марка P6M5 (HSS) и по-рядко P6M5K5 (HSSE) или легирани инструментални стомани 9XC или ШХ15 (WS).

1.3. Технологични възможности

Кръглите плашки се използват за ръчно или машинно нарязване на външни цилиндрични или конусни резби с неголеми изисквания за точност и качество повърхнините на един проход [38,58]. Формообразуването се реализира чрез две работни движения – главно въртеливо, осигуряващо скоростта на рязане и праволинейно подавателно движение, съгласувано с въртеливото. Подаването се осигурява в началото на обработването с цел начално врязване на първите 1 – 2 навивки на плашката, след което се осигурява самоподаване (самонавиване) върху току-що нарязаните навивки. Ръчното изработване на резби с кръгли плашки е възможно до диаметри 30 – 35 mm и стъпки до 4



mm [58]. По-големите размери плашки се използват за калиброване на предварително формирани с други инструменти резби.

Фиг. 1.8 Автономна установка за нарязване на резби с плашки

При машинното нарязване на резби с кръгли плашки се използват две технологични схеми – със закрепване на плашката в плаващо приспособление и втората – с твърдо закрепване на плашката. В първият случай се цели самоцентроване на инструмента спрямо обработваната заготовка, а във вторият е задължително постигането на съосност между инструмента и заготовката преди нарязването на резбата. За реализирането на първата схема се използват универсални или револверни стругове, а втората - на стругови автомати, притежаващи възможност за промяна посоката на въртене на вретеното. В противен случай се използват допълнителни резбонарезни вретена със собствен превод. Опростената кинематична схема на метода позволява да се използват отделни резбонарезни установки с електрическо или хидравлично задвижване фиг. 1.8 [58].

В специализираната литература се препоръчва скоростта на рязане, при работа с кръгли плашки, метчици и резбонарезни глави, да се пресмята по зависимостта [46, 47]:

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m s^y} k_v, m/min,$$
където (1.1)

където C_v е трайностна константа, определяна от табл. 1.1;

D – външен диаметър на нарязваната резба, *mm*;

Т – средна трайност на плашката с препоръчвана стойност 90 мин.;

s – подаване (стъпка на резбата), *mm/об*;

т – показател на относителна трайност;

q, *y* – степенни показатели, отразяващи влиянието на съответните фактори диаметър и стъпка на резбата върху допустимата скорост;

 $k_v = k_m . k_u . k_m$ - общ поправъчен коефициент, където k_m , $k_u u k_m$ са коефициенти, отчитащи съответно вида и характеристиките на обработвания, инструменталния материали и точността на нарязваната резба, (табл. 1.2).

Таблица 1.1 Стойности на константата и степенните показатели при определяне на скоростта на рязане

| Обработван материал | Инструментален материал | Cv | у | q | m | T, min |
|--|----------------------------|-----|-----|-----|------|-----------|
| Въглеродна конструкционна стомана, σ _в =750 МРа | 9ХС, У12А | 2,7 | 1,2 | 1,2 | 0,50 | 90 |

В други източници [21], поправъчният коефициент *k_v* е обобщен и се дава само в зависимост от обработвания материал (табл. 1.3).

| | Поправъчни коефициенти за скоростта на рязане в зависимост от | | | | | |
|--|---|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|--|
| Обработван материал | обработвания | инструменталния материал К., | | точността на нарязваната резба К. | | |
| | материал, К _м | P6M5 (HSS) | 9XC, Y10A, Y12A (WS) | точна | средно точна | |
| Стомана | | · · · · · | , í | | | |
| въглеродна: | | | 0.7 | | | |
| $\sigma_{\rm B}$ < 600 MPA | 0,7 | | 0,7 | | | |
| $\sigma_{\rm B} = 600 - 800 \text{MPA}$ | 1,0 | 1,0 | | 0,8 | 1,0-1,25 | |
| легирана: | | | | | | |
| $\sigma_{\rm B}$ < 700 MPA | 0,9 | | 0,7 | | | |
| $\sigma_{\rm B} = 700 - 800 \rm MPA$ | 0,8 | | | | | |

Таблица 1.2 Поправъчни коефициенти за скоростта на рязане в зависимост от условията на работа

Таблица 1.3 Обобщен поправъчен коефициент в зависимост от обработвания материал

| Обработван материал | Поправъчен коефициент k _v | | |
|---------------------|--------------------------------------|--|--|
| Стомана 20 | 0,7 | | |
| Стомана 35 | 1,0 | | |
| Стомана 45 | 1,0 | | |
| Стомана 40Х | 0,8 | | |
| Стомана 20ХН | 0,9 | | |

Нужно е да се отбележи, че различните източници подчертават, че при резбонарязване скоростта на рязане, определяна по посочените трайностни зависимости, може да се окаже твърде висока, и да не се удовлетворяват изискванията за качество на резбата [21, 46]. Опитът показва, че най-добро качество на резбата на заготовки от стомани с повишена пластичност, може да се получи чрез кръгли плашки при скорости на рязане по-малки от 2 *m/min*, а при обработване на по-твърди стомани с малка пластичност при V = 4 - 5 *m/min*.

За обработването на резби с кръгли плашки са присъщи две характерни особености, силно влияещи на протичането на технологичния процес и на качеството на резбите [58]. Първата особеност е, че профилът на резбата, получаван след врязването, поема изцяло натоварването от подаването, в резултат на което могат да възникнат деформации на профила и грешки в стъпката, несъосност и лоша грапавост на резбата. Втората особеност се свързва с това, че отвеждането на плашката се осъществява чрез развиване от току-що нарязаната повърхнина, в резултат от което се увеличава спомагателното време и се създават предпоставки за повреждане, а триенето по задните повърхнини на инструмента намалява трайността му.

1.4. Силови характеристики на процеса рязане

1.4.1 Общи положения

Силите на рязане са едни от най-важните параметри на процеса. От тях зависи мощността, необходима за рязането. Силите се използват като изходни данни при конструиране и якостна проверка на металорежещи инструменти, приспособления, детайли и възли. Въпросите свързани с определянето им са разгледани в източници [2,3, 9,10,13,21,28,40,45,50, 61].



Фиг. 1.9. Система от сили, действаща на режещия клин при резбонарязване [9].

Системата от сили, действащи върху режещия клин на инструмента при резбонарязване е показана на фиг.1.4. [9]

Превръщайки се в стружка, срязваният слой действа върху предната повърхнина с нормалните сили – F', F'', F'''. При движението на стружката възникват и сили на триене - F_{τ} , F_{τ}'' , F_{τ}''' . Вследствие на еластичното възстановяване на деформираните слоеве се формират нормалните сили по задната повърхнина – F_{1}' , F_{1}'' , F_{1}''' , пораждащи от своя страна сили на триене - F_{T1}' , F_{T1}'' , F_{T1}''' . Стойността им зависи основно от еластичните свойства на обработвания материал.

Векторната сума от силите, действащи върху режещия клин, определя

равнодействащата сила на рязане - *F_R*.

$$\vec{F}_R = \sum \vec{F} + \sum \vec{F}_T + \sum \vec{F}_1 + \sum \vec{F}_{T1}$$
 .

В такъв вид зависимостта за определяне на равнодействащата сила е неприложима за практически цели. Поради това е прието $\overrightarrow{F_R}$ да се разлага по три взаимно перпендикулярни направления :

$$\vec{F}_R = \sqrt{\vec{F}_x^2 + \vec{F}_y^2 + \vec{F}_z^2} , \qquad (1.2)$$

където *Fz* е главна съставляваща на силата на рязане, имаща най-висок относителен дял при формиране на равнодействащата;

Fy - радиална сила;

Fx - осова сила.

Съществуват различни подходи за определяне на главната сила Fz. При някои от тях [13], за нарязване със стругарски ножове се използват опитни зависимости от степенен вид :

$$F_z = C_{F_z} \left(\frac{l}{i}\right)^{xF_z} s^{yF_z} K_{F_z} , \qquad (1.3)$$

където C_{Fz} е константа определена при дадени условия на обработване, зависеща от механичните свойства на обработвания материал, свойствата на инструменталния материал, елементите на режима на рязане, геометричните параметри на инструмента, износването, МОТ и др.;

i – брой проходи (посредством l/i се изразява дълбочината на рязане t);

s – подаване, mm;

x_{Fz}, у_{Fz} - степенни показатели;

K_{Fz} – общ поправъчен коефициент, определен като произведение от частни корекционни коефициенти.

Зависимостите от този вид са удобни за използване при определен метод на обработване, не отразяват пряко физическата същност на процеса и не отчитат вида на резбата и формата на сечението на срязвания слой.

В [10] са представени степенни функции, изведени по експериментален път, приложими за конкретни случаи на резбонарязване с резбонарезни ножове:

- при нарязване на метрична резба върху детайли от закалена стомана, степенната функция има вида :

$$F_z = 218t^{0,9} . s^{0,7} r^{0,3} . \sigma_B^{0,7} , N .$$
(1.4)

- при упорна резба със стъпка 2 мм на детайли от никелманганови стомани със $\sigma_B = 834 Mpa$ е получена зависимостта:

$$F_z = \frac{4580s^{0.32}}{v^{0.2}}, N.$$
(1.5)

При фрезоване [4], зависимостта за определяне на Fz е от вида :

$$F_z = C_{F_z} t. s^{0.75}, N.$$
(1.6)

Други автори [46, 47] предлагат степенни зависимости за определяне и на въртящия момент на рязане :

$$M = C_{\mathcal{M}} D^q s^{\mathcal{Y}} K_{\mathcal{M}}, \qquad (1.7)$$

където q, y са степенни показатели, вариращи в диапазона съответно $q = 1, 1 \div 2$ и $y = 1, 5 \div 1, 8$ или

$$M = M_T K_{DM} K_{MM} , N.m , \qquad (1.8)$$

където M_T е таблична стойност на момента, N.m;

*К*_{DM} – коефициент, отчитащ влиянието на диаметъра на нарязваната резба;

К_{ММ} – коефициент, зависещ от механичните свойства на обработвания материал.

1.4.2 Специфична сила на рязане

Друг подход, предложен за първи път от Кинцле (Kienzle O.) [71], определя главната сила F_c и момента на рязане М посредством зависимости от вида:

$$k_c = \frac{F_c}{A} , N / mm^2; \qquad (1.9)$$

$$M = F_c \cdot r = 10^{-9} k_c A \frac{d_{cp.}}{2}, N.m$$
(1.10)

където k_c е специфичната сила на рязане, необходима за срязване на сечение с определена площ (най-често $l mm^2$).

*F*_c е главната сила на рязане, *N* ;

A - площ на сечението на срязвания слой, mm^2 .

Например при струговане, при ширина на срязвания слой *b* и дебелина h(A = b.h), главната сила на рязане се определя по формулата [8]:

$$F_{c} = b.h.k_{c}.\prod_{i=1}^{n} k_{ci} , \qquad (1.11)$$

където k_{ci} , i = 1, 2,, n са поправъчни коефициенти, отчитащи влиянието на различните фактори върху специфичната сила на рязане. Зависимостите от този тип са универсални и в голяма степен отразяват физическата същност на процеса [14,15,16].

В [63] е приет подход, при който силите на рязане при другите процеси на обработване чрез рязане се пресмятат по същия начин, като се ползват едни и същи данни за главната специфична сила на рязане за различните обработвани материали. При такъв подход, без да се отчитат специфичните особености на процеса, не може да

се очаква получаването на точни резултати. Такива зависимости за определяне на главната сила на рязане и въртящия момент са:

$$F_{z} = k_{c} . h^{y} . f_{Gs} . K_{ver} , N ; \qquad (1.12)$$

$$M_{Fz} = F_z. \frac{(D+d_v)}{2}, N.m,$$
 (1.13)

където *D* е външен диаметър на резбата, mm;

 d_v – вътрешен диаметър, mm.

Тъй като коефициентът f_{Gs} в (1.12) зависи от механичните показатели на обработваните материали, повърхностното налягане, деформирането на стружката, предния ъгъл, скоростта на рязане и др., е прието стойностите на f_{Gs} да са различни. Така например при нарязване на резби в чугуни $f_{Gs}=1,1$, а при стомани стойността на коефициента се определя съобразно показаната на фиг.1.6 диаграма. Степенните показатели, отчитащи влиянието на дебелината варират в сравнително тесни граници $y = 0.17 \div 0.3$ mm. Коефициентът за износването при резбонарязване приема стойности $K_{ver}\approx 1.5$



Фиг.1.10. Коефициент отчитащ метода и условията на рязане в зависимост от външния диаметър на резбата [63].

Опитно е установено [29], [78] и др., че основен фактор, влияещ на специфичната сила на рязане е дебелината на срязвания слой. Чрез математично обработване на опитните данни е установен и математичният модел на тази зависимост, степенната функция от вида:

$$k_c = k_{c.1.1} / h^z , \qquad (1.14)$$

където $k_{c.1.1}$ е основната (стандартна) стойност на специфичната сила на рязане при сечение на срязвания слой $A = b.h = 1.1 = 1 mm^2$;

z - показател, характеризиращ степента на влияние на дебелината на срязвания слой.

Стойностите на $k_{c.1.1}$ и *z* зависят от вида и механичните свойства на обработвания материал и за различните материали се дават в справочниците [59], [63], [65].

Екстраполацията при прилагането на формула (1.14) извън интервала на вариране на h при опитите за нейното получаване към по-малки или по-големи дебелини може да доведе до значителни грешки (фиг.1.11) [58]. От проведени изследвания, резултати от които са дадени в [58], е установено, че при намаляване на дебелината на срязвания слой интензивността на нейното влияние върху специфичната сила на рязане нараства, което се изразява в увеличаването на стойността на степенния показател z. Затова е предложено диапазонът от дебелини на срязвания слой от 1 до 1000 μm да се раздели на три области, като за всяка от тях се определя $k_{c.1.1}$ и z в зависимост (1.14).





Предлагани са и други емпирични математични модели за изразяване на зависимостта на k_c от h. Например в [77] зависимостите на нормалната k_n , радиалната k_r и тангенциалната k_t специфични сили на рязане $k_{n,t,r} = f(f_t, h_d)$, където f_t е подаването на зъб, а h_d - твърдостта на материала,

при сферично фрезоване на алуминиеви сплави, са апроксимирани с полином от трета степен. При $h_d = const$ той има вида

$$k_i = C_{1i} + C_{2i}f_t + C_{3i}f_t^2 + C_{4i}f_t^3, \quad i \in \{n, t, r\}.$$
(1.15)

В [82] зависимостите на тангенциалната k_t и радиалната k_r специфични сили на рязане $k_{t,r} = f(f_t, v_c, a_r, a_a)$, където f_t е подаването на зъб, v_c - скоростта на рязане, a_r - дълбочина на рязане, a_a - ширина на фрезоването, при челноцилиндрично фрезоване на

алуминиева сплав с фреза от бързорежеща стомана, са апроксимирани с линейна функция с отчитане ефекта на взаимодействие. При $v_{c,a_{r,a_a}} = const$ тя има вида:

$$k_{tr} = a_0 - a_1 f_t \ . \tag{1.16}$$

В случая апроксимацията е достатъчно точна, тъй като при опитите факторите варират в много тесни граници. В последните два модела дебелината на срязвания слой е в неявна форма. При фрезоване тя е променлива, но средната дебелина при дадени условия е пропорционална на подаването.

Нормалната специфична сила k_n при челно-цилиндрично фрезоване на алуминиева сплав, в зависимост от т.н. нормализирана дебелина на срязвания слой [14,15,16]

$$h_{cn} = h_c / (h_{cmax} - h_{cmin}),$$

където h_{cmin} и h_{cmax} са съответно минималната и максималната дебелина на срязвания слой при преминаване на зъба по дъгата на рязане, е апроксимирана с функция на Boltzman. Тя може да бъде записана във вида:

$$l_n k_n = \frac{a_1 - a_2}{1 + e^{(h_{cn} - a_3)/a_4}} + a_2 \quad .$$
(1.17)

Според дадените стойности на коефициентите, получавани след обработване на опитни данни, те отговарят на условията $a_1 > 0$; $a_2 > 0$; $a_1 > a_2$; $a_3 < 0$; $a_4 > 0$.

В [11] са предложени зависимости за резбонарязване, в които като активен фактор е посочена единствено дебелината на сечението *h*:

$$F_z = \frac{k_c}{h^y} . A, N ; \qquad (1.18)$$

$$M = \frac{k_c}{h^{\gamma}} . A. [d_0 - (2x - 1).h_z, N.m;$$
(1.19)

$$M_{c} = \frac{k_{c}}{h^{\nu}} \left[A.(d_{0} - H) - \frac{1}{3}H^{3}tg\frac{\alpha_{0}}{2} \right], N.m, \qquad (1.20)$$

където у е степенен показател, отчитащ влиянието на дебелината,

 d_0 – диаметър на инструмента, mm,

х – номер на режещия зъб, отчитан спрямо последния,

 α_0 – профилен ъгъл на резбата, градуси,

H- височина на профила, mm,

Mc – сумарен момент от всички едновременно режещи зъби, Nm.

Теоретичните изследвания за определяне на силите на рязане, респективно на специфичните сили на рязане, макар и да не са дали досега добри резултати по отношение на точност, спомагат да се изясни физичната същност на проблема и дават нагледна представа за механиката на процеса на рязане. Поради това специфичната сила на рязане се определя за сега чрез експериментални изследвания, при което се динамометрира силата на рязане, като се знае площта на сечението на срязвания слой.

1.4.3 Теоретични математични модели на специфичната сила на рязане

В основата на математичното моделиране на силовото натоварване при рязане е аналитичното му определяне, като се използват механични характеристики на обработвания материал и някои параметри на процеса на рязане и се приемат различни хипотези за деформацията на срязвания слой при превръщането му в стружка. Разглеждат се различни модели на деформацията на материала при рязане - свободно и несвободно рязане, правоъгълно и неправоъгълно, с една равнина на преплъзване или с развита зона на стружкообразуване [14,15,16].

Една от известните хипотези [3,38,61] приема, че тангенциалните напрежения в процеса на рязане са еквивалентни на тангенциалните напрежения при натиск на образци от обработвания материал и се извежда формула за определянето на главната сила на рязане, от която се определя и специфичната сила на рязане:

$$k_{c} = \frac{F_{c}}{b.h} = \frac{\tau_{\phi}.\cos\left(\theta + \gamma_{0}\right)}{\sin\phi.\cos\left(\phi + \theta - \gamma_{0}\right)},\tag{1.21}$$

където τ_{ϕ} е тангенциалното напрежение в условната равнина на преплъзване;

 θ - ъгълът на триенето по предната повърхнина;

 γ_0 - предният ъгъл;

 ϕ - условният ъгъл на преплъзване.

Ъгълът ϕ зависи от коефициента на скъсяване на стружката ξ и се определя по формулата:

$$tg \phi = \frac{\cos \gamma_0}{\xi - \sin \gamma_0}.$$
(1.22)

В зависимост от начина на определянето на тангенциалното напрежение τ_{ϕ} , други подобни модели се предлагат още от Ернст и Мерчант [60], Н. Н. Зорев [37], М. И. Клушин [29] и др.

Друга хипотеза предполага равенство на относителните работи за пластична деформация при рязане и при натиск в условия на еднакви пластични деформации. От А. М. Розенберг и А. Н. Еремин е изведена формула за F_c [40], от която за специфичната сила на рязане се получава

$$k_{c} = \frac{F_{c}}{h.b} = \frac{\sigma_{0}}{n} \cdot \frac{e^{\frac{n}{1.5}\varepsilon - 1}}{1 - \frac{\sin\theta}{\xi.\cos(\theta - \gamma_{0})}},$$
(1.23)

където σ_0 е границата на провлачване на обработвания материал при натиск;

n - показател на политропата при натиск;

є - относително преплъзване, определено по зависимостта:

$$\varepsilon = \frac{\xi^2 - 2\xi . \sin \gamma_0 + 1}{\xi . \cos \gamma} \quad . \tag{1.24}$$

По-късно тази формула е опростена до вида:

$$k_c = \frac{F_c}{h.b} = 0.185.HV.K, \qquad (1.25)$$

където *HV* е твърдостта на стружката по Викерс,

К - коефициент, определен по формулата

$$K = \frac{\varepsilon}{1 - \frac{\sin\theta}{\xi \cdot \cos(\theta - \gamma_0)}} \quad . \tag{1.26}$$

Известни са и други модели, като:

 пресмятането на главната сила на рязане в зависимост от твърдостта на стружката, предложена от Т.Н. Лоладзе [31], от която се изразява специфичната сила на рязане във вида:

$$k_c = \frac{F_c}{h.b} = \frac{HV}{3} \cot g \,\phi = S_k \cot g \phi \,\,, \tag{1.27}$$

където $\frac{HV}{2} = S_k$ е истинската граница на якост на материала;

- принципът на минимума енергия при рязане на металите, получена от М. Е. Мерчант:

$$k_c = \frac{F_c}{h.b} = 2\tau \cot g \phi, \qquad (1.28)$$

където τ е граница на якост на срязване на обработвания материал;

 - хипотезата за еквивалентност на силите пластично деформиращи срязвания слой и на образец на натиск при еднакви сечения и деформации, предложена от В. Д. Кузнецов и В. А. Кривоухов [14,15]:

$$k_c = \frac{F_c}{h.b} = \sigma_0 \xi^n (\cos \gamma_0 + \mu. \sin \gamma_0) + \frac{\mu. F_{N\alpha}}{h.b} \quad , \tag{1.29}$$

където μ е коефициентът на триене, приет за еднакъв по предната и задната повърхнина;

 $F_{N\alpha}$ - нормалната сила, действаща на задната повърхнина.

При повечето от цитираните модели не се отчитат силите на триене по задните повърхнини, пренебрегвани като минимални, което може да се допусне при големи дебелини на срязвания слой, големи задни ъгли и неизносен режещ ръб, съчетания, рядко срещани при резбонарезните инструменти.

В [45] се отчита еластичното възстановяване на материала след преминаване на режещия ръб с радиус на закръгление ρ и се приеме разпределение по триъгълник на тангенциалните напрежения по задната повърхнина. За определяне на силата на триене е изведена следната формула, валидна за неизносен инструмент:

$$F_{\alpha} = 0.625 \tau_p . \rho . b \sqrt{\frac{tg\kappa_r}{\sin\alpha_0}}, \qquad (1.30)$$

където τ_{ρ} е съпротивлението на обработвания материал при срязване;

ρ - ъгъл на закръгление на режещия ръб (величина в редица случаи неизвестна и варираща в широки граници);

 α_0 - задният ъгъл.

Тогава за частта на специфичната сила на рязане *н_{ca}*, получена от силата на триене по задната повърхнина се получава

$$H_{c\alpha} = 0.625 \frac{\tau_p}{h} \rho \sqrt{\frac{tg \kappa_r}{\sin \alpha_0}} \,. \tag{1.31}$$

Влиянието на скоростта на рязане върху специфичната сила е нееднозначно. При увеличаване на скоростта на рязане специфичната сила намалява. При ниските скорости на рязане, характерни за резбообработване, специфичната сила е голяма, а промяната й е по-интензивна. Опитно е установено, че при високи скорости на рязане (v >100 ÷150 m/min) силите на рязане почти не се изменят, т.е. специфичната сила на

рязане е почти постоянна величина. В такива условия, най-често влиянието на скоростта на рязане не се отчита [16].

Когато влиянието на скоростта на рязане върху специфичната сила се отчита, това става чрез корекционен коефициент, стойността на който се избира от таблица или номограма [63]. Формула за пресмятане корекционния коефициент е дадена в [62]:

$$k_{\nu} = \left(\frac{100}{\nu}\right)^{m_{\nu}},\tag{1.32}$$

където $m_v = 0,143$ при $v=20 \div 100 \text{ m/min}$

m_v = 0,071 при *v>100 m/min*.

За дадена дебелина на срязвания слой, при намаляване на скоростта на рязане до много малки стойности, клонящи към нула, специфичната сила на рязане има определена стойност:

При
$$v \to 0$$
, $k_c = const = k_{cv \to 0}$. (1.33)

Резултатите от подробни изследвания, проведени в РУ "А. Кънчев", дават основание да се въведат нови параметри на специфичната сила на рязане: $k_{cv\to0}$ - начална специфична сила; $k_{cv\to\infty}$ - гранична специфична сила. За даден обработван материал те са характерни величини, зависещи при неизносен инструмент от предния ъгъл и дебелината на срязвания слой, съгласно форм. (1.29), (1.31) [14,15,16].

Болшинството от приведените до тук хипотези и модели са валидни за струговане или фрезоване и не са достатъчно точни в случаите, когато съпротивлението при рязане е резултат от едновременната работа на няколко различни по параметри режещи зъби, формиращи различни по площ, форма и разположение сечения на срязвания слой. Подходът, предлаган в [9], до известна степен отчита тези особености, тъй като силата се определя като сума от произведенията на специфичната сила, приведена за единица дължина на режещия ръб p_u , N/mm и дължината на режещите ръбове l_u,mm .

$$F_{z} = K_{CJI} \cdot K_{TP} \sum_{u=1}^{n} pu.lu , N,$$
(1.33)

където $K_{CЛ}$. е поправъчен коефициент, отчитащ сложността на процеса на стружкообразуване,

*К*_{*TP*} - поправъчен коефициент, отчитащ триенето между задната инструментална повърхнина и повърхнината на рязане,

n – брой активни ръбове на режещия клин.

Стойността на поправъчния коефициент, отчитащ сложността на процеса на стружкообразуване, зависи основно от механичните свойства на обработвания материал и в относително по-малка степен от вида и стъпката на резбата и се определя таблично. Той с достатъчна точност може да се използва и за всеки произволен проход, като при това грешката, посочена от автора не надвишава 7 % при триъгълна и 12 % при упорна резби.

Таблица 1.4 Стойности на константата и степенния показател участващи във формулата за определяне на специфичната сила [9].

| Обработван материал | Скорост на рязане, m/min | Ср | q |
|---------------------|--------------------------|-----|------|
| 50 | 70 | 185 | 0,87 |
| 15Х18Н12С4ТЮ | 50 | 132 | 0,59 |
| Д16 | 47 | 45 | 0,73 |
| BT3 | 47 | 109 | 0,66 |
| 0X18H10T | 79 | 133 | 0,64 |
| 28Х3СНМВФА | 39 | 183 | 0,67 |
| 12X13 | 51 | 173 | 0,71 |
| 12XH3A | 48 | 149 | 0.78 |



Специфичната сила, приведена за единица дължина на режещия ръб p_u, се определя чрез зависимостта :

$$p_{u} = C_{p} a^{q} K_{\gamma} K_{\lambda},$$

където *Ср* е константа, зависеща от физикомеханичните показатели на обработвания материал, предния ъгъл, ъгъла на наклона на главния режещ ръб, скоростта на рязане и т.н, *N/mm*;

а – дебелина на срязвания слой, mm;

q – степенен показател, отчитащ влиянието на дебелината на срязвания слой;

*K*_γ - коефициент, отчитащ стойността на предния ьгъл;

 K_{λ} - коефициент, отчитащ стойността на ъгъла на наклона на главния режещ ръб.

Стойностите на коефициента, отчитащ влиянието на предния ъгъл на режещия клин K_{γ} , са показани в табл.1.5. Този подход е с ограничена приложимост - единствено при резбонарязване със стругарски ножове.

Фиг.1.12. Влияние на дебелината на срязвания слой а върху специфичната сила приведена за единица дължина на режещия ръб p_u при свободно рязане [9].

Същият автор изтъква, че въртящият момент е основната силова характеристика при нарязване на резби с метчици [10].

| | Стойности на Ку при преден ъгъл у,° | | | |
|---------------------|-------------------------------------|------|------|--|
| Обработван материал | 10° | 5° | -5° | |
| 50 | 0,91 | 0,96 | 1,16 | |
| 15Х18Н12С4ТЮ | 0,90 | 0,95 | 1,06 | |
| Д16 | 0,89 | 0,95 | 1,08 | |
| BT3 | 0,88 | 0,95 | 1,05 | |
| 0X18H10T | 0,92 | 0,96 | 1,15 | |
| 28Х3СНМВФА | 0,88 | 0,94 | 1,12 | |
| 12X13 | 0,88 | 0,94 | 1,10 | |
| 12XH3A | 0,90 | 0,96 | 1,18 | |

Таблица 1.5 Стойности на коефициента К, при различни предни ъгли [9].

При равни други условия големината на момента Mx се определя от сумарната площ на сечението на срязвания слой от работещите режещи ръбове. Доколкото площта на сечението нараства по параболичен закон с навлизането на метчика в нарязвания отвор на дължина L (фиг. 1.13), то и въртящият момент Mx се описва с такава зависимост:





Фиг. 1.13 Диаграма на изменението на въртящия момент М при нарязване на резба с метчик [10]

а) машинен метчик; б) гаечен метчик

От цитирания в [10] Л. А. Рождественский се предлага зависимост за въртящия момент, отчитаща влиянието на основните фактори:

$$M = C_{MM} \frac{d^{1,25} P^{1,75} z^{0,2}}{(tg\kappa_r)^{0,2}}, \text{Nm}$$
(1.36)

Където *d* е диаметър на резбата;

- *P* стъпка на резбата;
- *z* брой режещи гребени;
- *к_r* главен установъчен ъгъл;
- С_{ММ} константа, зависеща от обработвания материал и променяща се от 1,1 за чугуни с *HB* 120 – 140, до 2 за стомана 20Х.

От изложеното става ясно, че независимо от вида на метчика, с увеличаването на броя на режещите зъби нараства въртящия момент, но в относително малка степен, тъй като пропорционално на нарастването на z, намалява дебелината на срязвания от един режещ ръб слой. Промяната на дебелината на срязвания слой води до съответното нарастване или намаляване на специфичната сила на рязане. Намаляването на специфичната сила на рязане, например, при постоянна площ на сечението води до намаляване на главната (тангенциалната) сила на рязане и до намаляване на въртящия съпротивителен момент.

Чрез използването на матричен модел за изчисляване елементите на сечението на срязвания слой в [53,54] е предложена методика за определяне съставлявящите на силите на рязване. Посредством нея сравнително просто могат да се отчетат стойностите и моментните векторни параметри на силите: начална точка и направление. Като недостатъци на методиката могат да се посочат сложността на използвания математически апарат, ограничаващ практическото ѝ приложение, необходимостта от програмен продукт, обслужващ модела, както и липсата на яснота за начина на отчитането на факторите, оказващи влияние върху параметрите на процеса на рязане.

За определяне на мощността при резбонарязване с метчици, плашки и резбонарезни глави се ползват известните зависимости [46, 47] :

$$P_{p} = \frac{M_{p}.n}{975}, \ kW; \tag{1.37}$$

$$M_{p} = 10.C_{M} D^{q} p^{y} K_{p}, Nm, \qquad (1.38)$$

където е *V* е скоростта на рязане, m/min,

n – честотата на въртене, min⁻¹,

D – номинален диаметър на резбата,

p – стъпка на резбата,

Кр = *K_M* – табличен поправъчен коефициент, отчитащ характеристиките на обработвания материал.

Предлаганите зависимости и параметрите, включени в тях, се отнасят за три различни вида резбонарезни инструменти, без отчитане на особеностите при работа на кръглите плашки, което води до незадоволителна точност при определянето на силовото натоварване по време на резбонарязване с плашки.

1.5. Особености на сечението на срязвания слой при резбонарязване с метчици, плашки, и резбонарезни гребени и глави

Сечението на срязвания слой при резбонарязване би могло да се представи, като съвкупност от свързани помежду си елементарни участъци, чиято форма и размери са в пряка зависимост от метода на резбонарязване, вида на резбата и схемата за изрязване на прибавката. Характерна за резбонарязването е и променливостта на формата и площта на сечението. При гребеновидни инструменти с конусна режеща част (метчици, плашки и т.н.), всеки зъб изрязва сечение с различна форма, размери и площ. Поради сходството при схемите на изрязване на прибавката от единичен гребен на посочените инструменти, в специализираната литература се препоръчват общи изчислителни модели.

Отчитането на посочените особености, при извеждане на зависимостите за определяне на площта на сечението на срязвания слой е свързано с приемането на редица условности, въвеждането на които намалява точността и ограничава приложимостта на получените резултати.

С метчици, плашки, резбонарезни гребени и глави се обработват преди всичко резби с триъгълен профил. Формирането на профила на резбата се осъществява по генераторната схема, като резултат от последователната работа на режещите зъби, подредени по винтова линия върху z на брой режещи гребени (фиг. 1.14) [21]. Ако се съвместят контурите на слоевете, срязвани от всичките зъби на режещата част с номера от 1 до 11, получената картина съответства на схемата на изрязване на цялата прибавка.

Площта на сечението на срязвания слой се определя най-често с помощта на геометрични изчисления [13,20,21,49,50].

При триъгълна резба, когато цялата режеща част на метчика (същото се отнася и за кръгла плашка) се намира в обработвания материал, сумата от площите на срязваните слоеве, снемани от отделните зъби е равна на площта на пълния профил на нарязваната резба.



Фиг. 1.14 Схема на последователността на изрязване на прибавката и формиране на резбовия профил – разгъвка, M12, z = 4 [21]

$$F = \frac{sh}{2}, mm^2, \qquad (1.39)$$

F – площ на сечението на срязвания слой, mm^2 ,

s – стъпка на резбата, *mm*,

h – дълбочина на рязане, *mm*.

На фиг.1.15, [2] е показано определянето на площта на сечението на срязвания слой за всеки отделен зъб :

$$az = \frac{s}{z}.sin\kappa_r, \qquad (1.41)$$

s - стъпка, mm,

z- брой на режещите гребени,

*к*_{*r*}- главен установъчен ъгъл.

Основен недостатък на израза е неотчитането на реалната трапецовидна форма на сечението на срязвания от всеки отделен зъб слой и приравняването му към правоъгълник с основи *a_z* и *b*.



Фиг. 1.15 Определяне на елементарната площ на срязвания слой от произволен режещ зъб и сумарното сечение при работа на метчик [2, 38].

Този недостатък е отстранен в представения в [49] израз. Тук сечението на срязвания слой се приема да бъде с трапецовидна форма, при което общата площ на напречното сечение на снемания слой от всички зъби на режещата част на инструмента, се приема равна на лицето на този трапец.

$$S = \frac{a+b}{2}hc_{,},\tag{1.42}$$

където *a,b* са малката и голямата основа на трапецовидното сумарно сечение на слоя метал, снеман от режещата част на метчика, *mm*,

*h*_c - височина на същото сечение, *mm*.

Малката и голямата основа се определят с уравнението :

$$a = \frac{t}{2} + (d_{2u} - d_l) \cdot tg \frac{\alpha}{2} \quad \text{w} \quad b = a - 2hc \cdot tg \frac{\alpha}{2}, \tag{1.43}$$

където t е дълбочина, t = s, $mm/o \delta$,

 d_{2u} - среден диаметър на инструмента, *mm*,

 d_{l} - вътрешен диаметър на нарязваната резба, *mm*,

α-ъгъл на профила на резбата.

От своя страна височината h_c се представя чрез изразите:

$$h_c = l_0 t g \kappa_r \left(\left(n p u \ l_p = l_0 + \frac{d_l - d_u}{2 t g \kappa_r} \right),$$
(1.44)

$$h_c = \frac{d_u - d_l}{2} \left(npu \ l_p \le l_0 \right) \, \operatorname{\mathsf{M}}\left(l_0 < l_p < l_0 + \frac{d_l - d_u}{2tg \kappa_r} \right), \tag{1.45}$$

където l_0 е дължина на нарязваната резба, *mm*,

l_p - дължина на режещата част, *mm*,

- *dч* диаметър на предното чело на метчика, *mm*,
- *к*_{*r*} ъгъл на режещата част.



Фиг.1.16. Схема за определяне площта на срязвания слой при врязване (a) и излизане (б) на метчика [13].

В източник [13] (фиг.1.16) е представена зависимост за определяне на площта на срязвания слой при врязване и при излизане на метчика.

Режещата част на метчика в този случай се е врязала в отвора на разстояние lx, при което главният режещ ръб е проникнал в профила на резбата на разстояние tx. Общата площ на сечението на срязвания слой в този момент е равна на лицето на фигурата ABCD, което приблизително се заменя с лицето на трапеца A'B'C'D'.

При врязване площта на сечението се изразява със зависимостта :

$$S = S_{max} \left[l - \left(l - \frac{l_x}{l_p} \right)^2 \right]$$
(1.46)

където Smax=p.h/2 е максималното общо сечение на срязвания слой,

h, тт- височината на профила,

lx, mm- разстоянието на което се е врязала режещата част на инструмента,

lp, mm- дължината на режещата част.

При излизане на метчика от отвора общата площ на сечението е :

$$S = S_{max} \left(1 - \frac{l_x}{l_p} \right)^2 \tag{1.47}$$

Най-пълен и точен е изразът в [21], където всеки зъб изрязва сечение с форма на трапец и височина а_z равна на дебелината – фиг.1.17.

Сечението снемано от произволен i –ти зъб има за основи b_i и b_{i+1}

Дебелината на срязвания слой се определя като :

$$a_z = s_z.sin\kappa_r \,, \tag{1.48}$$

където *s*_z е подаване на зъб в радиално направление,

 κ_r – ъгъл на режещата част.



Фиг. 1.17. Схема за определяне ширината на срязвания слой b [21]. Този израз е по-неточен от (1.46) поради използването на s_z. Ширината на срязвания слой се определя за два характерни случая :

а) за режещ ръб предхождащ ръба с дължина *b_{max}*.

$$b_{i} = \frac{(2H \ tg \ 0.5 \ \alpha_{0} + e) \sin \alpha_{0}}{\sin(\alpha_{0} + \kappa_{r})} - iaz[cotg\kappa_{r} - tg(0.5\alpha_{0} - \kappa_{r})], \qquad (1.49)$$

б) за режещ ръб следващ ръба с дължина b_{max} .

$$b_{i} = \frac{(2H tg \ 0.5 \ \alpha_{0} + e)sin\alpha_{0}}{sin(\alpha_{0} + \kappa_{r})} - ia_{z}[cotg(\alpha_{0} - \kappa_{r}) + tg(0.5\alpha_{0} - \kappa_{r})], \qquad (1.50)$$

където Н е височина на профила на резбата, тт,

α-ъгъл на профила на резбата,

е – дължина на скосения участък при върха на резбата, тт.

Площта на напречното сечение на слоя, снеман от всеки отделен зъб от режещата част на инструмента, може да се представи като площ на трапец с височина a_z и основи b_i и b_{i+1} .

$$A = a_z \frac{(b_i + b_i + i)}{2}$$
(1.51)

Изведени от автора зависимости от този вид в [21] обаче липсват, което е недостатък на представения метод.

За облекчаване на изчисленията в [11] е предложен аналогичен израз, в който е прието ъгълът на режещата част $\kappa_r = 0^\circ$ - фиг.1.17.

$$f = b.a + 2.a^2 tg \frac{\varepsilon_r}{2} (x - 0.5).$$
(1.52)

Тук *х* е номер на режещия зъб, с отчитане, започващо от последния. Възникващата от приемането на тази условност, грешка е малка, което позволява зависимост (1.52) с достатъчна точност да се използва при практически пресмятания.



Фиг. 1.18. Сечение на срязвания слой при резбонарязване с метчици, притежаващи $\kappa_r = 0^{\circ}[11]$.

В [53,54] е предложен нов матричен метод за определяне елементите на сечението на срязвания слой. В основата му стои възможността обработваната повърхнина на заготовката и режещия клин на инструмента да се представят във вид на плоски или обемни логически матрици, при запазване на традиционната методика описваща кинематиката на процеса на резбонарязване. В този случай задачата за определяне параметрите на сечението на срязвания слой, се свежда до преобразуване и логическа

проверка на условията за пресичане на координатите на елементите от матриците, описващи инструмента и заготовката.

Разгледаните до тук методи за определяне на параметрите на сечението на срязвания слой могат да бъдат използвани при резбонарязване с кръгли плашки, при отчитане на всички условности и приети приближения, с което се намалява точността на пресмятанията. Същевременно е важно да се отбележи, че са валидни при установен режим на работа и не предоставят възможност за отчитане на динамиката на промяна на параметрите, особено в периода на врязване на плашката.

1.6. Технологична оценка на разпространените конструкции плашки

Резбите, изработвани с кръгли плашки се характеризират със следните особености:

- точността на нарязваните резби като комплексен показател достига в най-добрия случай 8g (по-често 9-10g, при това със сравнително точни инструменти – 6g като правило)

- големи отклонения от допуските на средния диаметър на резбата, дължащи се на получаваната вълнообразност по направление на оста;

- големи стойности на натрупаната грешка на стъпката;

- неточности на профила на резбата;

- накъсване на част от резбата (в някои случаи);

- незадоволителна грапавост;

- по-ниски якостни характеристики.

За този тип резбонарезни инструменти са характерни следните конструктивни и технологични недостатъци:

- тесни граници за реализиране на подходящи стойности на геометричните и конструктивни параметри, съобразени с конкретните условия на работа;

- нерационални геометрични параметри и невъзможност за промяна на заложените им стойности чрез презаточване при обработване на материали с различна обработваемост;

- съществени ограничения за оптимизиране на режимите на рязане;

- ниски скорости на рязане, лимитирани преди всичко от качествените характеристики на нарязваните резби;

- необходимостта от развиване на плашките от обработената повърхнина, предопределя ниската им производителност;

- голям е относителният разход на време за заточване по предните повърхнини на режещите гребени с цел формиране на режещите ръбове и постигане на подходящи преден ъгъл γ_0 и ъгъл на наклона λ_s

- относително голям дял на отпадъка при изработване на плашките.

- еднакви конструктивни параметри на работните части, състоящи се от *z* на брой режещи гребени, всеки от които има режещи и калиброваща част.

Поради изброените по-горе основни причини, възникват съществени производствени проблеми, свързани преди всичко с неудовлетворителните качествени



Фиг. 1.19 Развитие на конструкциите плашки през годините [81]



Фиг. 1.19 Развитие на конструкциите плашки през годините - продължение [81]

показатели на нарязваните резби, а също така и с производителността при тяхното изработване.

Историческата справка за развитието на конструкциите от този тип инструменти в архивите на различни патентни бюра, показва, че още от края на XIX, началото на XX век, когато са първите официални патенти на кръгли плашки, до наши дни не са престанали търсенията на принципно нови или оптимизирани конструкции плашки, които в някаква степен да удовлетворяват различните изисквания и да предоставят възможности за преодоляване на споменатите недостатъци (фиг.1.19).

1.7. Проблеми с нарязването на резби върху тънкостенни електрозаварени тръби

Фирма "Прециз – Интер Холдинг" ЕООД е специализирана в производството на тънкостенни алуминиеви електрозаварени тръби с диаметри в диапазона 10 – 64 mm. В зависимост от диаметрите, дебелините на стените на тръбите варират от 1,5 до 2,2 mm. Като важна производствена задача за условията на едросерийно производство е поставено нарязването на резби със ситни стъпки в двата края на тръбите. Предварително проведените експерименти за формиране на резбите чрез валцоване и резбонарязване с кръгли плашки и резбонарезни ножове показват, че тези технологични операции предизвикват съществени проблеми, анализът на които води до следните изводи:

1. Обработването чрез методите на пластично деформиране е неприложимо поради големите радиални и осови натоварвания върху заготовката, при които поради малката якост и стабилност на тръбите се получава смачкване.

2. Обработването чрез рязане е също неприложимо поради това, че:

- 🛛 с резбонарезни ножове е нископроизводително и неточно;
- с резбонарезни гребени и глави е съпроводено от големи натоварвания, водещи до деформации на заготовката и неточни резби;
- резбофрезоване и вихрово резбонарязване скъпо оборудване и приложимост само при големи диаметри;
- с класически кръгли плашки големи натоварвания поради неподходящи геометрични параметри на инструментите и силов дебаланс, водещи до неточни резби с ниска грапавост и в някои случаи до накъсване на резбата.

При тези условия възможните решения могат да бъдат сведени до проектирането на нова инструментална и технологична екипировка. Оптимален вариант за преодоляване на такива проблеми предлага нов инструмент, който да съчетава възможностите на обработването чрез рязане с ниско силово натоварване на заготовките и на пластичното деформиране за получаване на високи качествени параметри на резбите.

1.8. Изводи

При направеният преглед на специализираната литература, касаеща резбонарезните инструменти, беше констатирано:

- Че недостатъчно пълно и подробно са описани всичките конструктивни параметри на кръглите плашки.
- 2. Липсват ясни и обосновани критерии за определянето на някои основни конструктивни параметри, каквито са броят на режещите гребени и факторите, които да ги определят, големината на главния установъчен ъгъл *Kr* и влиянието му върху силовото натоварване на процеса на резбонарязване и др.
- 3. При разглеждането на процеса рязане се разчита на пълната аналогия с метчиците, която може частично да даде отговори на някои съществени въпроси, отнасящи се до проектирането на инструментите. Същият подход, най-често се прилага и при определяне на режимите на рязане и на силовото натоварване на технологичната система, в резултат на което по различните източници се получават големи разлики – до 300%. Последното особено силно важи за определяне на силовото натоварване на технологичната система.
- Реално липсва практически приложима първична информация във всичките ú форми – аналитична, графична или таблична, която да служи като обща основа при проектирането и при експлоатацията на плашките.
- 5. Анализът на продукцията на водещи фирми за производство на режещи инструменти – конкретно кръгли резбонарезни плашки показва, че в световен мащаб конструкциите на тези инструменти се свеждат до два основни вида – регулируеми и нерегулируеми, като разликите в геометричните параметри на режещите им части са минимални и на практика не оказват влияние върху схемата на рязане и резултатите от работата им.
Цел и задачи за изпълнение

С разработване на настоящия дисертационен труд е поставена следната основна <u>ЦЕЛ</u>: Да се повиши качеството и да се намалят производствените разходи при нарязване на външни триъгълни резби, чрез разработване на нова конструкция режещо-деформиращи плашки с подобрена технологичност.

В съответствие с така поставената цел, са формулирани следните конкретни <u>ЗАДАЧИ:</u>

- Да се проектират и изработят прототипи на режещо-деформиращи плашки, за нарязване на външни триъгълни резби върху електрозаварени алуминиеви тръби.
- Да се изследва и анализира влиянието на параметрите на плашките върху елементите на сечението на срязвания слой и специфичната сила на рязане.
- Да се разработи математичен модел за определяне на площта на сечението на срязвания слой във всеки един момент от работата на инструмента.
- Да се изследва динамиката на съпротивителния момент при нарязване на триъгълни резби с плашки в зависимост от конструктивните им параметри.
- 5. Да се проведат лабораторни експериментални изследвания за определяне степента на влияние на основните конструктивни и геометрични параметри на режещо-деформиращите плашки върху специфичната сила на рязане, съпротивителния въртящ момент, и разпределението на натоварването по работните елементи.
- 6. Да се внедрят в производството на резбови изделия комбинираните режещо-деформиращи инструменти.

2. Разработване на нова конструкция плашки

2.1. Технологичност на конструкцията

В специализираната литература и в практиката на машиностроенето понятието технологичност на конструкцията на дадено изделие се характеризира с широтата на обхвата от изисквания предявявани към изделието, а също така и с известна разнопосочност на тези изисквания, предопределена от голямото разнообразие на практически решения. В [37] е дадено кратко определение на това понятие:

Под технологичност на конструкцията се разбира съвкупност от признаци, осигуряващи най-икономично и бързо изработване на машините чрез прилагане на прогресивни методи на обработване при едновременно повишаване на качеството, точността и взаимозаменяемостта на частите.

Технологичността зависи от мащаба и типа на производството. Единичното и дребносерийното производства предявяват едни изисквания към технологичността, едросерийното и масовото – други. Признаците за технологичност са специфични за детайлите от различни групи.

В България, в Единната система за технологична подготовка на производството (ЕСТПП) на усъвършенствуването на конструкцията на изделията на технологичност се отделя специално място, като са включени четири (вече недействащи) специални стандарта — БДС 14.201—76 до БДС 14.204—76.

Под "технологичност на конструкцията" според БДС 14.204—76 се разбира "съвкупност на свойства на конструкцията на изделието, осигуряващи възможност за оптимални разходи на труд, средства, материали и време в техническата подготовка на производството, изработването, експлоатацията и ремонта в сравнение със съответните показатели на еднотипни конструкции изделия със същото предназначение при осигуряване зададените стойности на нивото на качеството и приетите условия на изработването, експлоатацията и ремонта". Към условията за изработване или ремонт на изделието се отнасят типът на производството, неговата специализация и организация, годишната програма и повторяемостта на производството на изделията, а така също и прилаганите технологични процеси.

Значително място в технологичния анализ на конструкцията заема качествената оценка на технологичността ("добро—лошо", "допустимо—недопустимо", "правилно неправилно"), която трябва да предшествува количествената. Като правило качествените оценки се формулират по-трудно, а те са свързани най-пряко с технологичната рационалност на конструктивните решения както като геометрични елементи, така и като качество, зададено с размерите и грапавостта на повърхнините. За точност трябва да се отбележи, че за качествените характеристики са предвидени количествени показатели: коефициент на точност и коефициент на грапавост на повърхнината, но техните оптимални стойности не са стандартизирани и поради това оценките трябва основно да се дават качествено.

2.2. Изисквания към новата конструкция плашки

Съгласно анализа на съществуващите конструкции плашки и на резултата от тяхната работа от т. 1, и при спазване на основните изисквания за подобряване на технологичността, се поставя за решаване задачата за създаване на нова конструкция резбонарезни плашки. В началната фаза на проектната част са формулирани следните условия и изисквания към новите резбонарезни инструменти:

1. Новата конструкция да формира резбата така, че да се съчетават възможностите на пластичната деформация и на обработването чрез стружкоотнемане, при гарантиране на изходната форма и профила на нарязваната резба;

2. Да се запази генераторната схема на изрязване на прибавката на резбата;

 Да се обединят в общ корпус режеща и пластично деформираща (заглаждаща) части;

4. Новата конструкция да отговаря на условието за подобрена технологичност при процеса на изработването на плашките в условията на серийно производство;

5. Като резултат от работата на новите плашки да се получават резби с подобрени качествени показатели.

6. Конструкцията да осигурява възможност за промяна в широки граници на геометричните параметри на режещите части на инструментите.

7. Да се осигурят възможности за висока производителност при формирането на резбите.

8. Да се осигури точното и надеждно закрепване на инструментите;

В условията на недостиг на първична информация за конструиране на отделните елементи и на инструмента като цяло е предприет до голяма степен евристичен подход, изразяващ се в следното: на базата на познати релевантни решения за конструкции на класически плашки (инструменти, предлагащи големи възможности за оптимизиране на конструкцията), да се оптимизира режещата част по отношение на геометричните параметри, а калиброващата част да се видоизмени от режеща в пластичнодеформираща (заглаждаща). Така създаденият първи вариант на нова конструкция (прототип) да бъде подложен на анализ и експлоатационни изследвания, резултатите от които да бъдат поставени в основата на база данни и методика за проектиране на вече оптимизирана конструкция плашки с подобрена технологичност, отговаряща в максимална степен на предявените изисквания.

2.3. Описание на конструкцията

Създадена е нова конструкция кръгли резбонарезни плашки, състояща се от следните основни елементи (фиг. 2.1; 2.2):

- 1 режещ гребен
- 2 режеща част с дължина *Lpeж*.
- 3 стружкови канали
- 4 деформираща (заглаждаща) част с дължина *Lкал*.



Фиг. 2.1 Основни конструктивни и геометрични параметри на режещодеформираща плашка

Тези основни елементи са обединени в общ корпус с цилиндрична форма и външни размери като на класическите плашки, което облекчава въвеждането им в експлоатация, тъй като не е необходима подмяната на съществуващата технологична екипировка за производството и експлоатацията им.

Технологичната схема, по която работят новите инструменти е комбинирана – резбата се формира последователно чрез рязане и пластично деформиране.

Режещата част на новата конструкция запазва гребеновидната си форма, като дължината Lpeж., регламентирана чрез дълбочината на стружковите канали се определя такава, че при поне един от режещите гребени да се получи режещ зъб с пълен профил на резбата.

Прекъснатата от стружковите канали резба на инструмента преминава в няколко цели навивки, които заглаждат повърхнините на нарязаната от режещата част на инструмента резба и същевременно служат за водеща опора на плашката, обхващаща с известна стегнатост заготовката. Стегнатостта се предопределя от еластичните характеристики на обработвания материал и е резултат от еластичното възстановяване на по-



Фиг. 2.2 Пробна серия на режещо-деформиращи плашки

върхностния слой на заготовката след преминаването на режещите ръбове. По този начин се осигурява точен профил на резбата, съгласно стандарт DIN EN 22568 и много ниска грапавост на обработената повърхнина.

В корпуса на плашката се изработват характерните за класическата конструкция базов външен надлъжен канал и *n* на брой конусни отвори за затягане към съответното приспособление. При тази нова конструкция са изпълнени всички условия и изисквания, предвидени в т.2.2.



Фиг. 2.3 Положение на стружковите канали и на равнинните предни повърхнини A_{γ}



Фиг. 2.4 Възможности за промяна на предните ъгли у и на отношението b/c

Стружковите канали, респ. режещите гребени, се изработват с равнинна предна повърхнина, което дава възможност геометричните параметри на инструмента при необходимост да се променят в много широки граници – важна предпоставка за оптимизиране на конструкцията, силовото натоварване на системата и режимите на рязане в зависимост от конкретните условия на работа. Посочената форма (фиг.2.3) и съответните размери на параметрите на плашките, вариращи също в широки граници, осигуряват голям ресурс на инструмента.

При такава конструкция са създадени условия за подобряване на технологичността при изработване на новите инструменти. Така например, в зависимост от размерите на плашките и съществуващото при производителя оборудване е възможно стружковите канали да се изработват чрез фрезоване с дискови или палцови фрези или да се получават чрез стъргане или дълбане – относително евтини и не

особено сложни операции. Заточването по предната повърхнина се облекчава значително спрямо досега прилаганите методи, значително се разширяват възможностите за формиране на различни по големина ъгли на наклона λ_s. Главните установъчни ъгли к_г



Фиг. 2.5 Възможности за промяна на ъглите на наклона λs

и главните предни ъгли γ_p са независими и лесно могат да бъдат получавани с различни големини – фиг. 2.4; 2.5. Формирането на задните ъгли на режещия клин α_p се осъществява чрез осово затиловане на режещата част, при запазване на съществуващата схема на обработване за класическите плашки.

Широчините на стружковите канали не са строго фиксирани, което създава широки възмож-

ности за вариране с броя на режещите гребени и т.н.

Така изброените предимства на новата конструкция плашки ги прави особено подходящи за формиране на ситни резби върху тънкостенни алуминиеви тръби.

Получена е възможност за изработване на новите инструменти като едностранни и като двустранни – фиг. 2.6.

В "Exel" таблици по разработена методика за проектиране на комбинираните плашки са избрани и изчислени основните конструктивни и геометрични параметри, а последователността на извършеното параметрично проектиране в средата на CAD системата SolidWorks.



Фиг. 2.6 Модели на едностранна - а) и двустранна - б) режещо-деформиращи комбинирани плашки, проектирани в средата на CAD системата SolidWorks

По така разработената конструктивна документация за нуждите на лабораторните им изследвания са произведени експериментална серия плашки – фиг. 2.2 и пробна серия за внедряване в производството на тънкостенни алуминиеви тръби на фирма "Пре-

циз – Интер Холдинг" ЕООД. Партидите са произведени в "Завод за резбонарезни инструменти – Габрово" с наличното в предприятието оборудване и инструментална и технологична екипировка.

2.4. Дефиниране на геометричните параметри на новата конструкция плашки

При последователните етапи на конструирането, производството и експлоатацията на новите режещи инструменти, а също така и при нови методи за обработване чрез рязане, възниква необходимост за определянето и пресмятането на геометричните параметри на режещите инструменти. Наред с това, изискванията за повишаване на точността на обработването, производителността и автоматизацията на производството, налагат необходимостта от изследване на механиката на процеса рязане, което от своя страна също е свързано с дефинирането на геометричните параметри на инструментите и на срязвания слой.

С цел определяне на геометричните параметри на режещата част на новата конструкция комбинирани режещо-деформиращи плашки е нужно да се определят координатните равнини и основните ъгли в статичната инструментална система, да се дефинират работните равнини и ъгли на инструмента, да се изведат зависимостите за определяне на статичните геометрични параметри в различни секущи равнини и на връзките между тях.

2.4.1. Инструментална координатна система

При определянето на равнините и на геометричните параметри в системата на инструмента се отчитат предпоставките, че инструмента е в покой, т.е. осъществява се само главното движение с вектор на скоростта v_c , а подавателното движение не се извършва и неговия вектор на скоростта $v_f = 0$ (фиг.2.4). Всички основни геометрични параметри са дефинирани за произволно избран главен режещ ръб *S* от на режещата част на плашката, тъй като разликите се свеждат само до дължините на режещите ръбове, които не оказват влияние на геометричните параметри. Като водещи термини и определения са използвани постановките на стандарт ISO 3002 част 1 [68]:

Инструментална основна равнина *P_r* – Преминава през избрана точка М от главния режещ ръб, перпендикулярно на приетото направление на рязане *v_c*

Инструментална установъчна равнина P_f – Преминава през точка М и през приетите направления на рязане v_c и подаване v_f



Фиг.2.4 Координатни равнини в инструменталната система

Инструментална осова равнина P_p – Преминава през точка М, перпендикулярно на P_r и P_f едновременно.

Инструментална равнина на рязане P_s – Допирателна към главния режещ ръб в т. М и перпендикулярна на инструменталната основна равнина P_r .

Инструментална ортогонална равнина P_o – Преминава през точка М, перпендикулярно на P_r и P_s едновременно.

Инструментална нормална равнина P_n – Преминава през точка М, перпендикулярно на главния режещ ръб. В случаите, когато главния преден ъгъл γ_o и ъгълът на наклона на главния режещ ръб λ_s са с нулеви стойности, P_n съвпада с P_o .

2.4.2 Работна координатна система

В работната система геометрията на режещата част е разгледана при осъществяване на процеса на рязане, когато се осъществяват главното и подавателното работни движения съответно със скорости v_c и v_f , векторната сума на които е резултантната скорост на рязане с вектор v_e , спрямо който са ориентирани секущите равнини на режещата част на инструмента (фиг. 2.5):

Основна равнина P_{re} – Преминава през избрана точка М от главния режещ ръб, перпендикулярно на работното направление на рязане $v_{c.}$



Фиг. 2.5 Координатни равнини в работната система

Установъчна равнина *P_{fe}* – Преминава през точка М и през направленията на рязане v_c и подаване v_f.

Осова равнина *P_{pe}* – Преминава през точка M, перпендикулярно на *P_{re}* и *P_{fe}* едновременно.

Равнина на рязане *P_{se}* – Допирателна към главния режещ ръб в т. М и перпендикулярна на инструменталната основна равнина *P_{re}*.

Ортогонална равнина *P*_{oe} – Преминава през точка М, перпендикулярно на *P*_{re} и *P*_{se} едновременно.

В работната координатна система нормалната равнина *P_{ne}* съвпада с инструменталната нормална равнина *P_{ne}*.

2.4.3. Ъгли в системата на инструмента



Фиг. 2.6 Ъгли в системата на инструмента

За нуждите на проектирането и производството на плашките, а също така и за ефективната им експлоатация, е необходимо да бъдат определени ъглите на инструментите в различни сечения.

Установъчен ъгъл K_r – определя положението на режещата част на плашката. Заключен е между оста на инструмента и образуващата на режещия конус – фиг. 2.6. Всички праволинейни главни режещите ръбове са наклонени спрямо оста под ъгъл K_r . За точките от върховата закръглена част на целите зъби на плашките K_r приема различни стойности, колебаещи се в интервала [0°, ± K_r]. Прието е ъгъла при върха на режещия конус да се означава с удвоената му стойност 2 K_r . Предните ъгли γ са заключени между равнинната предна повърхнина на режещодеформиращите плашки и основната равнина P_r . Предният ъгъл характеризиращ процеса рязане γ_o се измерва в ортогоналната равнина P_o . За определяне на режещия клин е важен ъгълът γ_p , измерван в осовата равнина P_p – едно от възможните челни сечения на плашките. При режещо-деформиращите плашки, в зависимост от положението на предните повърхнини, γ_o и γ_p могат да приемат нулеви, положителни или отрицателни стойности. В зависимост от ъгъла K_r и от диаметъра на разглежданото челно сечение, γ_p се променя в определени граници.

Задните ъгли осигуряват нужните условия на рязане и същевременно влияят върху якостта на режещия клин. Получават се в резултат от осово затиловане на задните повърхнини по върховете на зъбите. Осовият заден ъгъл α_p , измерван в челно сечение, се определя като заключен между допирателната към криволинейната задна повърхнина в точка от режещия ръб и установъчната равнина P_f . В зависимост от параметрите на операцията затиловане и от външните и вътрешни диаметри на нарязваните резби, ъглите α_p са с променливи стойности за различните точки по дължина на режещите ръбове. За плашките по-малко значение има главният заден ъгъл α_o , измерван в перпендикулярната на образуващата на режещата конусна част ортогонална равнина P_o .

Ъгълът на наклона на главния режещ ръб λ_s се измерва в равнината на рязане P_s и е заключен между направлението на режещия ръб и основната равнина P_r . При режещо-деформиращите плашки λ_s може да приема нулеви, положителни или отрицателни стойности, като по този начин да оказва влияние на работата на инструмента при врязване и на направлението на изтичане на отделената при работа стружка.

2.5. Определяне на връзките между геометричните параметри

2.5.1. Общо уравнение за режещата част

Спрямо режещата част на плашката се построява тримерна Декартова координатна система XYZ, така че, началната точка M да лежи върху главния режещ ръб (фиг. 2.7), равнината XY да съвпада с основната равнина P_r , оста X да съвпада с проекцията на режещия ръб върху основната равнина, а оста Z да бъде перпендикулярна на равнината P_r . Приема се също така, че по предната повърхнина на инструмента са разположени три вектора \vec{N} , \vec{T} и \vec{R} с общо начало т. M, както следва:

- векторът \vec{N} лежи в равнината YZ и е наклонен спрямо оста Y под ъгъл μ ;

- векторът \vec{T} съвпада с режещия ръб, лежи в равнината *XZ* и е наклонен спрямо оста X под ъгъл β ;

- векторът \vec{R} лежи в произволната равнина *AA*, разположена перпендикулярно на *P_r* и едновременно с това наклонена под ъгъл ε спрямо оста *X*. Освен това векторът \vec{R} сключва ъгъл *n* с равнината *P_r*.

При тази постановка един произволен вектор а ще бъде записан с уравнението:

$$\vec{a} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z, \qquad (2.1)$$

където \vec{i}, \vec{j} и \vec{k} са единичните вектори съответно по осите X, Y и Z, а проекциите им по съответните оси са x, y и z.



Фиг. 2.7 Тримерна векторна система при определяне на общото уравнение на режещата част на режещо-деформираща плашка

В конкретния случай се приема, че проекцията на \vec{N} върху ос *Y* е единица в равнината *YZ*: y = 1;

върху ос Хе нула;

върху ос Z: $tg \mu = \frac{-z}{v} \rightarrow z = -y tg \mu$,

сл.
$$z = -tg \mu$$
 (2.2)

сл. N = i.0+1.j-k.tg
$$\mu$$
. (2.3)

Приемаме, че проекцията на \vec{T} върху X e + 1,

сл. x = +1 в равнината *XZ*;

проекцията върху ос Y = 0;

върху ос Z:
$$tg\beta = \frac{-z}{x} \rightarrow z = -x.tg\beta$$
, сл. $z = -tg\beta$, (2.4)

сл.
$$\overline{T} = i.1 + j.0 - k.tg \beta$$
. (2.5)

Приемаме, че проекцията на \vec{R} върху равнината P_r е 1, тогава $tg \eta = \frac{-z}{1} \rightarrow z = -tg \eta$.

Проекцията на R върху X: $\cos \varepsilon = -\frac{x}{R}$; $\sin \varepsilon = \frac{y}{R}$

 $x = -R \cos \varepsilon$; $y = R \sin \varepsilon$, но проекцията на \vec{R} върху *MXY* е единица (MXY = P_r),

сл.
$$x = -1\cos\varepsilon; y = 1\sin\varepsilon,$$
 (2.6)

сл.
$$\vec{R} = -i.\cos\varepsilon + j.\sin\varepsilon - k.tg\eta$$
. (2.7)

Понеже $\vec{N}\,,\,\vec{T}$ и $\vec{R}\,$ лежат в A_{γ} , то смесеното им произведение е равно на нула,

$$\begin{array}{c|cccc} N & \rightarrow & 0 & 1 & -tg \,\mu \\ c \pi & T & \rightarrow & 1 & 0 & -tg \,\beta \\ R & \rightarrow & -\cos \epsilon & \sin \epsilon & -tg \,\eta \end{array} = 0 \,.$$
 (2.8)

Съгласно правилото на Сарус за детерминанти от трети ред се получава общия вид на търсеното уравнение:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & -tg \mu \\ 1 & 0 & -tg \beta \\ -\cos \varepsilon & \sin \varepsilon & -tg \eta \end{vmatrix} =$$

 $= 0.0 - tg \eta + 1 - tg \beta - \cos \varepsilon + (-tg \mu).1.\sin \varepsilon - (-\cos \varepsilon).0.(-tg \mu) - \sin \varepsilon - tg \beta.0 - (-tg \eta).1.1 = 0$ tg $\beta.\cos \varepsilon - tg \mu.\sin \varepsilon + tg \eta = 0$,

сл.
$$tg \eta = -tg \beta .\cos \varepsilon + tg \mu .\sin \varepsilon$$
. (2.9)

2.5.2. Определяне на действителните стойности на предните ъгли γ_{p} и γ_{f}

Равнината A–A се завърта до перпендикулярно положение спрямо основната равнина P_r и срямо оста на инструмента. При това положение η ще приеме реална стойност γ_p .

При положението на координатната система на фиг.2.7, ъгълът на наклона на главния режещ ръб λ_s е с отрицателна стойност, а ъгъл ε се измерва в *XY* между +*X* и +*Y*.

Сл. $\varepsilon = 90 - x_r$; $\beta = -\lambda_s$; $\mu = \gamma_0$.

В такъв случай се получава:

$$tg \gamma_{p} = tg \lambda_{s} . \cos(90 - \kappa_{r}) + tg \gamma_{0} . \sin(90 - \kappa_{r})$$

$$tg \gamma_{p} = tg \lambda_{s} . \sin \kappa_{r} + tg \gamma_{0} . \cos \kappa_{r} .$$
 (2.10)

За определяне на $\gamma_{\rm f}$, равнината A–A се завърта до съвпадането й с инструменталната работна равнина $P_{\rm f}$.

Tогава
$$\eta = \gamma_{f}$$
; $\varepsilon = 180^{\circ} - \kappa_{r}$; $\beta = -\lambda_{s}$; $\mu = \gamma_{0}$,
сл. $tg\gamma_{f} = tg\lambda_{s}.cos(180 - \kappa_{r}) + tg\gamma_{o}.sin(180 - \kappa_{r})$
 $tg\gamma_{f} = -tg\lambda_{s}.cos\kappa_{r} + tg\gamma_{o}.sin\kappa_{r}$
 $tg\gamma_{f} = tg\gamma_{0}.sin\kappa_{r} - tg\lambda_{s}.cos\kappa_{r}$ (2.11)

2.5.3. Определяне на действителните стойности на задните ъгли α_p и α_f

При запазване на същата постановка на трите вектора \vec{N} , \vec{T} и \vec{R} , теоретично се приема, че задните ъгли могат да достигат стойности от 0° до 90° – α °. В такъв случай за задните осови ъгли α_p ще се получи, че при завъртането на равнината А–А до съвпадането и́ с P_r , $\eta = 90° - \alpha_p$; $\varepsilon = 90 - \kappa_r$; $\mu = 90° - \alpha_0$; $\beta = -\lambda_s$. След заместване в основния вид на уравнението:

$$tg(90 - \alpha_{p}) = -tg(-\lambda_{s}) \cdot \cos(90 - \kappa_{r}) + tg(90 - \alpha_{0}) \cdot \sin(90 - \kappa_{r}) + \cot g \alpha_{p} =$$

= $tg \lambda_{s} \cdot \sin \kappa_{r} + \cot g \alpha_{0} \cdot \cos \kappa_{r}$
$$\cot g \alpha_{p} = tg \lambda_{s} \cdot \sin \kappa_{r} + \cot g \alpha_{0} \cdot \cos \kappa_{r} \qquad (2.12)$$

За определяне на ъгъла $\alpha_f\,$ е необходимо равнината A–A да се завърти до съвпадането ú с P_f .

Тогава
$$\eta = 90^\circ - \alpha_f$$
, $\varepsilon = 180 - \kappa_r$, $\mu = 90^\circ - \alpha_0$, $\beta = -\lambda_s$ след заместване:
tg $(90^\circ - \alpha_f) = -tg (-\lambda_s) . \cos(180^\circ - \kappa_r) + tg (90^\circ - \alpha_0) . \sin(180^\circ - \kappa_r)$

 $\cot g \alpha_{f} = tg \lambda_{s} - \cos \kappa_{r} + \cot g \alpha_{0} \cdot \sin \kappa_{r}$

$$\cot g \alpha_{f} = \cot g \alpha_{0} . \sin \kappa_{r} - tg \lambda_{s} . \cos \kappa_{r}$$
(2.13)

Зависимостите между ъглите са представени в таблица 2.1

| | | | | | | | | | | | таол | ица . | 2.1 |
|------------------|------------------|--------------------|----------------------|---|--------------------|---------------------------|---|--|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| | κ _r | λ_{s} | αο | γο | κ _r | $\lambda_{\rm s}$ | α_n | γ_n | | α_{f} | $\gamma_{\rm f}$ | α_{p} | γ_p |
| κ _r | | | - | | | | - | | | tgĸ _r : | $=\frac{\text{ctg}}{\text{ctg}}$ | $\frac{\alpha_{f}}{\alpha_{p}}$ - | $\frac{\text{tg}\gamma_{f}}{\text{tg}\gamma_{p}}$ |
| γ_{o} | | | - | | | tg | $\gamma_{o} = \frac{tg}{cos}$ | $\frac{\gamma_n}{s\lambda_s}$ | | | - | | |
| γ_p | $tg\gamma_p =$ | = tgλ _s | $\sin \kappa_r +$ | $tg\gamma_{o}.cos\kappa_{r}$ | $tg\gamma_p$ | $= \cos \kappa$ | $\frac{tg\gamma_n}{\cos\lambda_s}$ | $+\sin\kappa_{\rm r}.t_{\rm s}$ | gλ _s | | - | | |
| $\gamma_{\rm f}$ | $tg\gamma_{f} =$ | = tgγ _o | $\sin \kappa_r -$ | $tg\lambda_s.cos\kappa_r$ | $tg\gamma_{\rm f}$ | = sin κ | $r \frac{tg\gamma_n}{\cos\lambda_s}$ | $-\cos\kappa_{\rm r}.t_{\rm s}$ | gλ _s | | - | | |
| α _p | $ctga_p$ | = cos | $\kappa_r.ctg\alpha$ | $_{o} + \sin \kappa_{r}.tg\lambda_{s}$ | ctgα | $s_p = \sin \theta$ | $\kappa_r.tg\lambda_s$ | $+\cos\kappa_{\rm r}\frac{{\rm ct}}{{\rm ct}}$ | $\frac{dg\alpha_n}{ds\lambda_s}$ | | - | | |
| $\alpha_{\rm f}$ | $ctg\alpha_{f}$ | = ctg | α _o .sinκ | $_{\rm r}$ – tg $\lambda_{\rm s}$.cos $\kappa_{\rm r}$ | ctgα | $r_{\rm f} = \sin \theta$ | $\kappa_r \frac{\operatorname{ctg}\alpha}{\cos\lambda}$ | $\frac{n}{s} - \cos \kappa_r$ | $tg\lambda_s$ | | _ | | |

2.6 Математично моделиране на действителните задни ъгли при осово затиловане с коничен абразивен инструмент

2.6.1 Основни положения и параметри на схемата при изграждане на модела.

Рационалната експлоатация на резбонарязващите плашки в голяма степен зависи от реализираните предни и задни ъгли в зоната на режещите части на инструмента. Докато стойностите на предните ъгли на плашките се регламентират на етап конструиране и се предопределят най-често от разположението и размерите на цилиндричните стружкови отвори, то главните задни ъгли се получават чрез оформяне на затиловани главни задни повърхнини по една от схемите показани на фиг.2.8. При първата схема се реализира осово затиловане с коничен абразивен инструмент с ъгъл при върха на конуса, равен на $2\kappa_r$, където κ_r е главния установъчен ъгъл на плашката, а при втората схема - с цилиндричен инструмент, наклонен на ъгъл κ_r спрямо оста на плашката. И при двете схеми затиловащия инструмент извършва въртеливото главно движение на рязане v_c и праволинейното възвратно-постъпателно подавателно движение v_a , успоредно на оста на плашката и съгласувано с кръговото подавателно движение v_f . В специализираната



Фиг. 2.8 Схеми на затиловане с коничен (а) и цилиндричен (б) абразивен инструмент

литература [42,44,58] се препоръчва чрез затиловането да се оформят главни задни ъгли в диапазона 6°- 9°, без да се посочва при какви параметри на технологичните схеми могат да се осигурят такива стойности и какво е изменението им по дължина на главните режещи ръбове. По-долу, чрез използване на математичния апарат на аналитичната и диференциалната геометрия [30,57], е представено аналитично изследване на затиловането по първата схема, даващо отговор на тези въпроси.

Математичният модел е изграден на базата на следните основни положения и параметри на технологичната схема, показани на фиг.2.9:

Осовото затиловащо движение v_a е възвратно - постъпателно като в посока към плашката е равномерно, успоредно на оста на плашката. Ако K_a е стойността на осово-



Фиг. 2.9 Параметри на схема на затиловане с коничен абразивен инструмент

то затиловане, реализирано при оформяне на главната задна повърхнина на един режещ гребен на плашката, ограничено от централния ъгъл ε_{12} , то съответстващата му височина на радиалното затиловане ΔK_r е:

$$\Delta K_r = K_a t g(\kappa_r) \tag{2.14}$$

Оста на абразивния инструмент е изместена на разстояние R_k от оста на плашката. Във всеки момент той контактува с формираната главна задна повърхнина в точки, в които се изпълняват условията за контакт - в контактната точка да имат обща тангентна повърхнина и общ нормален вектор.

При пресичането на главната задна повърхнина с равнини, перпендикулярни на оста на плашката, например равнините, минаващи през точките 1 и 2, се получават пресечници – спирали S_1 и S_2 , към които се допират сеченията на абразивния инструмент, очертани с окръжности съответно с радиуси r_1 и r_2 . При реализиране на движенията на затиловане във всеки момент в контакт със задната повърхнина влизат различни сечения от абразивния инструмент с различни радиуси. Тези пресечници се получават като обвиващи линии на семейство окръжности с променящ се радиус, зависещ от ъгъла на завъртане на плашката и стойностите на височината на затиловането и изместването на оста на абразивния инструмент. Например, при завъртането на окръжността с радиус r_2 на ъгъл ε_{12} нараства до r_4 по закона:

$$r_{i+1} = r_i - a. \varphi, \qquad (2.15)$$

където r_i радиус на окръжността от семейството окръжности, допиращи се в определена *i*-та точка на обвиващата линия;

а - коефициент на изменение на радиусите на семейството окръжности, определян по зависимостта

$$a = K_a \cdot tg(\kappa_r) / \varepsilon_{12} ; \qquad (2.16)$$

 φ - текущ ъгъл на завъртане на плашката в *rad* при реализиране на затиловането.

Центърът на всички окръжности от семейството винаги лежат на окръжност с радиус R_k .

Задният ъгъл α_{pi} в коя и да е *i*-та точка от главния режещ ръб в сечение, перпендикулярно на оста на плашката се дефинира като ъгъл между допирателните към контактуващата окръжност и към обвиващата линия, минаващи през допирната им точка. Определянето му се реализира чрез използване уравненията на обвиващата линия.

2.6.2. Математичен модел

За определянето на параметричните уравнения на обвиващата линия се използват параметричните уравнения на семейството окръжности в координатната система *Oxy* (фиг. 2.10)

$$x = (r_1 - a, \varphi) . \cos(t) . \cos(\varphi) - (r_1 - a, \varphi) . \sin(t) . \sin(\varphi) + R_k . \cos(\varphi)$$

$$y = (r_1 - a, \varphi) . \cos(t) . \sin(\varphi) - (r_1 - a, \varphi) . \sin(t) . \cos(\varphi) + R_k . \sin(\varphi)$$
(2.17)

и условието за контакт между коя и да е окръжност от семейството и обвиващата линия [57]

$$\partial x/\partial t \, \partial y/\partial \varphi = \partial x/\partial \varphi \, \partial y/\partial t \,, \tag{2.18}$$

където $\partial x/\partial t$ и $\partial y/\partial t$ са частни производни на уравнения (2.17) спрямо параметъра *t*, а $\partial x/\partial \varphi$ и $\partial y/\partial \varphi$ - спрямо параметъра φ ;



Фиг. 2.10 Схема за определяне на задните ъгли

нения на обвиващата линия S₁.

 r_{1} - приет радиус на окръжността от семейството , допираща се до обвиващата линия при $\varphi = 0$.

t - независим ъглов параметър, определящ текущото положение на окръжност с радиус *r_i*

След заместване на производните на уравнение (2.17) и преработване на (2.18) се получава уравнението, по което могат да се определят стойностите на независимия параметър *t* :

 $t = \arcsin(a/R_k) . \qquad (2.19)$

При така определена стойност на *t*, уравненията (2.17) се явяват и урав-

Като се отчитат означенията на фиг.2.10 е определена и следната математична зависимост за определяне на задните ъгли на всяка точка от задната повърхнина, лежаща на обвиващата линия и на главния режещ ръб:

$$\alpha_{pi} = t - \varphi + \operatorname{arctg}(y/x). \tag{2.20}$$



Фиг. 2.11. Алгоритъм за определяне на параметрите на затиловане 2.6.3. Алгоритъм за определяне на задните ъгли.

Съгласно схемата на затиловане при определено установяване на затиловащия инструмент на разстояние R_k , обвиващата линия е допирателна към конкретно конично сечение с радиус r_i . На това съответстват конкретни стойности на ъгъла φ , чрез които трябва да се определят координатите на контактната точка. Тя трябва да отстои и на предварително зададеното разстояние г от оста на затилования инструмент, тъй като принадлежи и на главния режещ ръб. Определянето на стойностите на параметрите на затиловане за всеки конкретен случай на затиловане с коничен абразивен инструмент се извършва по алгоритъма, показан на фиг. 2.11, в който

 ε е централният ъгъл съответстващ на ширината на перото b;

*к*_r – главен установъчен ъгъл;

 d_{a2} – диаметър на окръжност минаваща през т.4;

 ρ_{0i} – текущ радиус вектор.

При така определена стойност на t, уравненията (2.17) се явяват и уравнения на обвиващата линия S_{I} .

2.6.4 Влияние на параметрите на технологичната схема върху стойностите на задните ъгли.

Проведените теоретични изследвания показват, че :

По дължина на главните режещи ръбове се наблюдава изменение на задните ъгли α_{pi} в границите на 2⁰-3⁰, като минималните им стойности са в точките с най-голям радиус (при челната повърхнина), (фиг.2.12);



ъгли по дължина на главния режещ ръб: $d = 16mm; P = 2mm; z_0$ = 4; $\kappa_r = 20^0; b = 3mm.$



Фиг. 2.14. Изменението на задния ъгъл при изменение на аксиалното затиловане Ka: d = 28mm; P = 2mm; $z_0 = 4$; $\kappa_r = 20^0$; b = 3mm.





Фиг. 2.15. Влияние на осовото изместване на затиловащия инструмент R_K на задния ъгъл при d = 28mm ; P = 2mm; $z_0 = 4$; $\kappa_r = 20^0$; b = 3mm.

Намаляване на задните ъгли се наблюдава и при увеличаване диаметъра на нарязваната резба (фиг.2.13). При по-големите диаметри, при затиловане с коничен абразивен инструмент се получават по-малки ъгли;

Най-силно влияние върху стойностите на задните ъгли има височината на осовото затиловане *K_a* (фиг. 2.14).

2.7. Определяне на предните ъгли по дължина на главния режещ ръб

Определените в т. 2.5.2. действителни стойности на предните ъгли γ_p са валидни за точка от главния режещ ръб. За отделните точки по цялата дължина на главния режещ ръб на плашката, предните ъгли приемат различни стойности, поради това, че за всяка точка се дефинира отделна основна равнина P_r , ъглово отместена от диаметралното сечение през разглежданата точка (фиг. 2.16).



Фиг. 2.16. Определяне на предните ъгли ү_р а) за класическа плашка с криволинейна предна повърхнина; б) за режещо-деформираща плашка.

За класическа плашка с некоригирана предна повърхнина, представляваща част от стружковите отвори, главният режещ ръб е ограничен от т.1, лежаща върху вътрешния диаметър на резбата и т.2, съответно върху външния диаметър (фиг. 2.16.а). В посочените крайни точки предните ъгли са γ_{p1} за т. 1 и γ_{p2} за т. 2, като при това $\gamma_{p1} > \gamma_{p2}$.

Възниква въпросът каква е промяната на предните ъгли в рамките на главния режещ ръб. Съгласно възприетата методика за проектиране на класическите плашки [44], предните ъгли γ_{p1} са функция на вътрешния диаметър d₁, диаметъра на стружковите отвори d и половината от централния ъгъл на просвета между две съседни пера на плашката ω :

$$d = \frac{d_1 \sin \omega}{\cos(\omega + \gamma_{p1})} \text{ или } r = \frac{r_1 \sin \omega}{\cos(\omega + \gamma_{p1})}.$$
 (2.21)

Предните ъгли γ_{p2} , съответстващи на т.2, могат да бъдат определени от изчислителната схема на фиг. 2.16.а):

от $\Delta O_1, 1, 2$: $\overline{1,2} = 2r \sin \frac{\alpha}{2}$, а след преобразуване се получава: $\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\overline{1,2}^2}{2r^2}\right)$. $2\theta = 180^\circ - \alpha$, от където $\theta = \frac{180^\circ - \alpha}{2}$. (2.22) от $\Delta O, 1, 2$:

$$r_1^2 = \overline{1,2}^2 + r_2^2 - 2r_2.\overline{1,2}.\cos\delta$$
,

От където се определя, че

$$\delta = \arccos\left(-\frac{r_1^2 - \overline{1,2}^2 - r_2^2}{2r_2.\overline{1,2}}\right)$$
(2.23)

От друга страна: $(90^\circ - \gamma_{p2}) + \theta + \delta = 180^\circ$,

от което следва, че $\gamma_{p2} = \theta + \delta - 90^{\circ}$ (2.24)

След заместване на (2.22) и (2.23) в (2.24) и преобразуване се получава:

$$\gamma_{p2} = \arccos\left(\frac{r_2^2 + \overline{1,2} - r_1^2}{2r_2.\overline{1,2}}\right) - \arcsin\left(\frac{\overline{1,2}}{2r}\right)$$
(2.25)

При съвместното решаване на зависимости (2.21) и (2.25) за конкретен типоразмер плашки могат да се получат различни резултати, поради относителната неопределеност на параметрите г и ω . След измерване на параметрите на реални класически плашки М10 и М18 и преизчисляването им по горните зависимости, за предните ъгли в двете крайни точки от главния режещ ръб са получени представените в табл. 2.2 резултати:

| Плашка | Преден ъгъл <i>ү_{р1}</i> | Преден ъгъл γ_{p2} | Разлика <i>ү</i> _{<i>p</i>1} - <i>ү</i> _{<i>p</i>2} |
|--------|-----------------------------------|---------------------------|---|
| M10 | 18,91° | 12,98° | 5,93° |
| M18 | 22,51° | 9,35° | 13,15° |

Таблица 2.2. Промяна на предните ъгли по дължина на главния режещ ръб на класическа плашка

Получените резултати показват значително намаляване на предните ъгли на плашките по дължината на главния режещ ръб, което ще оказва съответното влияние върху условията на работа на плашките.

При режещо-деформиращите плашки предните повърхнини са равнинни и определянето на промяната на предните ъгли по дължина на режещия ръб ще става съгласно схемата на фиг. 2.16.б):

$$\frac{r_1}{\sin\gamma_{p2}} = \frac{r_2}{\sin\theta} \tag{2.26}$$

$$\theta = 180 - \gamma_{p1} \tag{2.27}$$

След заместване на зависимост (2.27) в (2.26), се получава:

$$r_1 \sin(180^\circ - \gamma_{p1}) = r_2 \sin \gamma_{p2},$$

От където следва, че:

$$\gamma_{p2} = \arcsin\left(\frac{r_1}{r_2}\sin\gamma_{p1}\right). \tag{2.28}$$

При така получената зависимост (2.28), могат да се изчислят промените на предния ъгъл в зависимост от: диаметъра на резбата (фиг.2.17.а), от положението на текуща точка от главния режещ ръб (фиг.2.17.б) и от стойността на предния ъгъл γ_{p1} за точка от вътрешния диаметър d₁ (фиг.2.17.в).



Резултатите от теоретичните изследвания за промяната на предните ъгли дават възможност да се направят следните изводи:

- при класическите плашки с криволинейна предна повърхнина се наблюдава поголямо намаляване на предния ъгъл с нарастване на дължината на режещия ръб, като при увеличаване на радиусите на стружковите отвори *r* при постоянен диаметър на окръжността на центрите им, предните ъгли намаляват в по-малка степен, поради нарастването на широчините на перата f на плашката и на просвета между тях ω ;

 при плашките с равнинна предна повърхнина предните ъгли намаляват по дължина на главния режещ ръб в относително тесни граници – 1° до 3° при резби М10 – М24 и до 5° при резби до М56;

- намаляването на предните ъгли по дължина на главния режещ ръб за определен типоразмер плашка е линейна функция, за която определящо е отношението на вътрешния към външния радиуси на резбата;

- при по-големите стойности на предните ъгли γ_{p1} , промяната им по дължина на главния режещ ръб е по-силно изразена и може да достигне стойности $\gamma_{p2} = 24^{\circ} - 25^{\circ}$ при $\gamma_{p1} = 30^{\circ}$.

2.8. Заключение за втора част

1. Създадена е нова конструкция кръгли резбонарезни плашки, работещи по комбинирана технологична схема – резбата се формира последователно чрез рязане и пластично деформиране;

2. Създадена е възможност, геометричните параметри на инструмента при необходимост да се променят в много широки граници – важна предпоставка за оптимизиране на конструкцията, силовото натоварване на системата и режимите на рязане в зависимост от конкретните условия на работа;

3. Дефинирани са геометричните параметри на новите инструменти, съгласно ISO 3002 част 1, както в статичната, така и в работната инструментални системи и са определени връзките между отделните геометрични параметри;

4. Предвид особеностите на осовото затиловане на плашките при изработването им, е създаден математичен модел и алгоритъм за решаване на задачата за определяне на задните ъгли в зависимост от параметрите на технологичната система и е доказано, че получаваните задни ъгли са променливи по дължина на главния режещ ръб с основен влияещ фактор параметъра на осово затиловане K_a ;

5. Установени са зависимостите за промяна на предните ъгли в челно сечение на плашките по дължина на главния режещ ръб от конструктивните и геометричните им параметри при криволинейна и равнинна форма на предните повърхнини.

3. Математично моделиране на процеса

3.1. Сечение на срязвания слой при нарязване на външни резби

Сечението на срязвания слой при нарязване на външни резби с кръгли плашки зависи преди всичко от стойността на главния установъчен ъгъл κ_r и от броя на режещите гребени z. Ъгълът κ_r и стъпката на резбата P определят броя на навивките включени в режещата част на инструмента, което от своя страна оказва влияние върху елементите на сечението – дебелина h и ширина b на срязвания слой. В зависимост от текущото положение от работата на плашката спрямо заготовката ширината на срязвания слой е променлива. Това предопределя и различните размери и площи на срязвания слой както за един от режещите зъби на инструмента, така и за сумарното сечение от всички активни за разглеждания момент зъби (фиг. 4.1). Този факт от своя страна води до променливи стойности на силите на рязане.

Дебелината на срязвания слой при генераторна схема на изрязване на прибавката е постоянна при определено съчетание от стойностите на определящите я параметри:

 $h = P.tg\kappa_r / z$, mm

В случаите като разглеждания, когато натоварването на инструмента е функция на променливото сечение на срязвания слой, се препоръчва като основен критерий да се използва специфичната сила на рязане k_c , представляваща натоварването на единица площ от режещата част на плашката. Най-често математичната зависимост за определяне на k_c е степенна функция от вида [60], [65]:

$k_c = k_{c.1.1} / h^z$

където $k_{c.l.l}$ е нормираната (стандартна) стойност на специфичната сила на рязане при сечение на срязвания слой $A = b.h = 1.1 = 1 \text{ mm}^2$;

z - показател, характеризиращ степента на влияние на дебелината на срязвания слой.

Стойностите на $k_{c.1.1}$ и z зависят от вида и механичните свойства на обработвания материал и за различните материали се дават в специалната и справочна литература [60], [65], [73]. При известни сечение A и дебелина h на срязвания слой и използване на тези данни се изчислява главната сила на рязане според [60], като се отчитат поправъчни коефициенти за предния ъгъл, скоростта на рязане, износването и др. при всички процеси на механично обработване.

Проблемът при пресмятане на силовото натоварване на многозъбите резбонарезни инструменти е в точното определяне на площта на срязвания слой от всеки зъб и от всички едновременно режещи зъби. Проучените методики дават конкретни зависимости за пресмятане на максималната сумарна площ, отчитайки в една или друга степен особеностите на процеса на формообразуване, но трудно могат да обхванат преходните процеси на рязане, т.е. зъбите, които частично са излезли или влезли в рязане и не режат с целия си активен режещ ръб в дадения момент. Също така не може да се отчете достатъчно точно степента на влияние на един или друг параметър и найблагоприятното или най-неблагоприятното им съчетаване, например при какво навлизане на инструмента в заготовката се получава минимална или максимална площ на срязвания слой, при какво разположение на стружковите канали спрямо резбата на инструмента ще се получи най-малко или най-голямо натоварване и изобщо влияе ли този фактор върху площта на изрязване и т.н. Освен опитно, изменението на натоварването на инструмента при навлизането му в заготовката трудно може да се определи.

За решаването на тези въпроси се предлага нов подход при разглеждането на проблема. Той се състои в математическото описване на режещата част на инструмента и математическо моделиране на работата му в заготовката. По този начин се създава възможност да се определи сравнително точно площта на срязвания слой във всеки момент от навлизането на инструмента и да се намери максималната й стойност, а с това и максималното силово натоварване. Наред с това, получените резултати, дават възможност да бъде решавана и обратната задача – при предвидено начално оптимално натоварване на инструмента да бъдат изчислени основните конструктивни и геометрични параметри – брой на режещите гребени – z, главния установъчен ъгъл κ_r , размерите на режещата част b_p и L_p , ъглите γ_o и λ_s и др., което значително би разширило областта на приложение и ефективността на използване на плашките.

За да се достигне до окончателния вид на предлагания алгоритъм е необходимо да се премине през няколко основни етапа:

Теоретична постановка на задачата;

 ✤ Извеждане на уравненията на архимедовите винтови повърхнини на резбата;

• Извеждане на уравненията на конусната режеща повърхнина;

 ✤ Дефиниране и определяне на типа на пресечниците на архимедовите винтови повърхнини с конусната режеща повърхнина за определяне на граничните точки на режещите ръбове; ✤ Определяне и анализ на проекциите на получените винтови линии върху основната (челната) равнина *Oxy* с цел получаването на дължините на режещите ръбове;

• Получаване на зависимости за определяне на площта на сечението на срязвания слой и на стойностите на силите F_{fb} F_c и на въртящия момент M_z .

Теоретичната инструментална повърхнина на плашката е изградена от две архимедови винтови повърхнини, които се пресичат от две цилиндрични повърхнини, определящи външния диаметър D(d) и вътрешния диаметър $D_1(d_1)$.

Номиналната режеща част на инструмента се оформя като резбовата повърхнина се пресече с конусна повърхнина. Пресечниците на конуса с двете винтови повърхнини са пространствени винтови линии. Задачата е да се намерят уравненията на тези линии. Тогава, знаейки положението на стружковите канали и уравненията на винтовите линии и обхождайки винтовите линии с ъгловата стъпка на гребените, може да се намери дължината на режещите ръбове.

3.2. Уравнение на архимедова винтова повърхнина

Всички резби с праволинейни образуващи на осовия им профил са архимедови винтови повърхнини. Всяка архимедова винтова повърхнина се образува при винтовото движение на вектора $\overrightarrow{M_1N_1}$, означен с \vec{u} - фиг.3.1. Във всеки момент на движението си, векторът \vec{u} и линията, очертана през точките M_i и N_i съвпадат и пресичат ос Oz на координатната система Oxyz под ъгъл $\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)$, където γ е ъгъл, равен на половината от профилния ъгъл на резбата α , т.е.

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \tag{3.1}$$

В определен момент този вектор е в положение означено с $\overline{M_i N_i}$. Отчитайки схемата от фиг. 3.1, се записва следното векторно уравнение, описващо архимедовата винтова повърхнина:

$$\overrightarrow{ON_i} = \overrightarrow{OM_i} + M_i M_i + \overline{M_i N_i}, \qquad (3.2)$$

в което съставляващите вектори са със следните координати в координатната система *Oxyz*:



нието на архимедова винтова повърх-

нина

$$\begin{vmatrix} \overrightarrow{ON_{i}} = \overrightarrow{r} = \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix}$$
$$\begin{vmatrix} \overrightarrow{OM_{i}} = \begin{vmatrix} r\cos\theta_{i} \\ r\sin\theta_{i} \\ 0 \end{vmatrix} \qquad (3.3)$$
$$\begin{vmatrix} \overrightarrow{M_{i}}M_{i} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ p\theta_{i} \end{vmatrix}$$
$$\begin{vmatrix} u_{i}\cos\gamma_{0}\cos\theta_{i} \\ u_{i}\cos\gamma_{0}\sin\theta_{i} \\ -u_{i}\sin\gamma_{i} \end{vmatrix}$$

В уравнения (3.3) винтовия параметър на винтовата повърхнина р се определя по зависимостта:

$$p = \frac{nP}{2\pi},\tag{3.4}$$

а големината на вектора \vec{u} - по зависимостта:

$$\vec{u} = (\rho_i - r) / \cos \gamma, \qquad (3.5)$$

в която *P* е стъпка на резбата в mm;

n – брой на ходовете;

 ρ_i - текущ радиус вектор в mm;

r – радиус на цилиндричната повърхнина, по която се описва винтовата линия в mm;

 θ_i - текущ ъгъл на завъртане на вектора \vec{u} .

След заместване на (3.3) в (3.2), матричното уравнение на винтовата повърхнина добива вида:

$$r(x, y, z) = \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r\cos\theta_i + u_i\cos\gamma\cos\theta_i \\ r\sin\theta_i + u_i\cos\gamma\sin\theta_i \\ p\theta - u_i\sin\gamma \end{vmatrix}$$
(3.6)



Уравнение (3.6) се отнася за дясна винтова повърхнина. За да се опише лява винтова повърхнина е необходимо в уравнението да се смени знакът на винтовия параметър и да се запази посоката на въртене, т. е. да се запази положителен знакът на ъгъл θ_i или текущият ъгъл θ_i да приеме отрицателни стойности при запазване знака на винтовия параметър *р*.

При положителни стойности на ъгъл γ се описва винтовата повърхнина A, ограничаваща отдолу впадината на резбата. При смяна на знака, т. е. при отрицателни стойности на γ се описва повърхнината \mathcal{E} , ограничаваща впадината на резбата отгоре (фиг.3.2).

Фиг.3.2 Схема за определяне на впадините в координатната система Охуг

За да се опишат тези повърхнини в координатната система *Охуг*, е необходимо радиус-

вектора ρ_i да приеме стойности в диапазона, определен от зависимостите:

$$\rho_{imin} = R_1$$
 $\rho_{imax} = R$
(3.7)

където $r = R_2 - \frac{P}{4.tg\gamma}$,

 $R = D/2;$

 $R_1 = D_1/2;$

 $R_2 = D_2/2;$

 $R_2 = D_2/2;$

 D, D_1, D_2 са съответно външен диаметър на резбата, вътрешен диаметър на резбата и среден диаметър на резбата на плашката в mm.

При $\rho_i = \rho_{max}$ винтовата повърхнина *A* след отчитане по *z* се описва с уравнението:

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r\cos\theta_i + u_i\cos\gamma\cos\theta_i \\ r\sin\theta_i + u_i\cos\gamma\sin\theta_i \\ p\theta_i - u_i\sin\gamma \end{vmatrix}$$
(3.8)

$$r = R_2 - \frac{P}{4.tg\gamma}$$
$$u = (R - r) / \cos\gamma,$$

а повърхнината Б:

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r\cos\theta_i + u_i\cos(-\gamma)\cos\theta_i \\ r\sin\theta_i + u_i\cos(-\gamma)\sin\theta_i \\ p\theta_i - u_i\sin(-\gamma) \end{vmatrix}$$

$$r = R_2 - \frac{P}{4.tg\gamma}$$

$$u = (R - r)/\cos\gamma$$
(3.9)

3.3. Уравнение на конусната инструментална повърхнина на режещата част



Фиг. 3.3 Конусна повърхнина на режещите ръбове на плашката

Уравнението на конусната инструментална повърхнина, върху която се разполагат режещите ръбове на плашката се представя като уравнение на ротационна повърхнина, описана при въртенето на правата $\overline{1,2}$ около координатната ос *z* на същата координатна система *Oxyz* (фиг.3.3). При завъртането на текущия радиус-вектор ρ_{κ} на ъгъл θ_i , по трите координатни оси се получава:

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \rho_k \cos \theta_i \\ \rho_k \sin \theta_i \\ \rho_k - r / tg\kappa_r \end{vmatrix}, \ \rho_k \in [r, R] \quad (3.10)$$

3.4. Проекции на винтовите ли-

нии в равнината Оху

При пресичането на винтовите повърхнини *A* и *Б* (фиг.3.2) с инструменталната конусна режеща повърхнина на инструмента се получават две пространствени конусни винтови линии. Съвместното решаване на уравнения (3.8), (3.9) и (3.10) ще даде уравненията на тези винтови линии, чиято проекция в равнината *Оху* е архимедова спирала. В същата равнина, при пресичане на проекциите на линиите на режещите ръбове на

инструмента със спиралите, могат да бъдат намерени крайните точки, които ограничават дължините на проекциите на всеки един от режещите ръбове, след което при отчитане на установъчните ъгли κ_r , да се получат действителните дължини на режещите ръбове.

По-долу ще се докаже, че проекцията на винтовата линия, получена от пресичането на винтовата повърхнина А с инструменталната конусна режеща повърхнина в координатната равнина *Oxy* е архимедова спирала.

Ако за произволна точка се приеме, че в даден момент принадлежи едновременно на винтовата повърхнина A и на конусната повърхнина, може да се определят координатите й по осите x, y и z:

$$\begin{aligned} x_A &= x_k = r . \cos \gamma + \vec{u} \cos \gamma \cos \theta = \vec{\rho}_k \cos \theta \\ y_A &= y_k = r . \sin \theta + \vec{u} \cos \gamma \sin \theta = \vec{\rho}_k \sin \theta \\ z_A &= z_k = p \theta - \vec{u} \sin \gamma = \vec{\rho}_k / tg \kappa_r \end{aligned}$$
(3.11)

След преработване и изразяване спрямо ρ_{κ} , се получава:

$$\vec{\rho}_{k} = r + \vec{u}\cos\gamma$$

$$\vec{\rho}_{k} = r + \vec{u}\cos\gamma$$

$$\vec{\rho}_{k} = r + p\theta tg\kappa_{r} - \vec{u}\sin\gamma tg\kappa_{r}$$
(3.12)

Видно е, че по осите х и *у* текущият радиус-вектор ρ_{κ} е с една и съща стойност, което дава основание да се замести в третото уравнение:

$$r + \vec{u}\cos\gamma = r + p\theta tg\kappa_r - \vec{u}\sin\gamma tg\kappa_r$$
(3.13)

понеже $\vec{u} = \frac{\vec{\rho}_A - r}{\cos \gamma}$, то след заместване и преработване следва:

$$\vec{\rho}_A = \frac{\theta. p. \cos\gamma \, tg\kappa_r}{\cos\gamma + \sin\gamma \, tg\kappa_r} + r \tag{3.14}$$

Ако в горното уравнение се положи, че:

$$\frac{p tg\kappa_r \cos\gamma}{\cos\gamma + \sin\gamma tg\kappa_r} = a_1,$$

се получава:

$$\vec{\rho}_A = a_1 \cdot \theta_i + r \tag{3.15}$$

Понеже
$$p = \frac{n.P}{2\pi} = const$$
; $\gamma, \kappa_r = const$ и следователно

 $a_1 = \frac{p t g \kappa_r \cos \gamma}{\cos \gamma + \sin \gamma t g \kappa_r} = const ,$

то може да се твърди, че полученото уравнение (3.15) е уравнение на архимедова спирала AS1с полярни координати ($\vec{\rho}_A, \theta$) в равнината *Oxy*.

Отчитайки уравнения (3.9) и (3.10), за винтовата повърхнина *Б* по аналогичен начин се получава, че проекцията върху равнината *Оху* при пресичането й с инструменталната конусна повърхнина е спирала с уравнение:

$$\vec{\rho}_{E} = \frac{\theta. p. \cos\gamma \, tg\kappa_{r}}{\cos\gamma - \sin\gamma \, tg\kappa_{r}} + r \tag{3.16}$$

Полага се $\frac{p tg\kappa_r \cos \gamma}{\cos \gamma - \sin \gamma tg\kappa_r} = a_2$

И се получава:

$$\vec{\rho}_E = a_2 \cdot \theta_i + r \tag{3.17}$$

Понеже
$$p = \frac{n.P}{2\pi} = const$$
;

$$\gamma_o, \kappa_r = const$$
 и следователно $a_2 = \frac{p t g \kappa_r \cos \gamma}{\cos \gamma - \sin \gamma t g \kappa_r} = const$,

то може да се твърди, че полученото уравнение (3.17) също е уравнение на архимедова спирала AS2 в полярни координати.

По такъв начин се установява аналитично, че при пресичането на двете винтови повърхнини *A* и *Б* с конусната инструментална повърхнина се получават пространствени конусни винтови линии – уравнения (3.14) и (3.16), чиито проекции в равнината *Oxy* представляват архимедови спирали с уравнения:

$$\begin{vmatrix} \vec{\rho}_A = a_1 \cdot \theta_i + r \\ \vec{\rho}_E = a_2 \cdot \theta_i + r \end{vmatrix}$$
(3.18)

3.5. Разположение на върховите режещи ръбове върху инструменталната режеща част

На фиг. 3.4. е показана равнината *Оху*, в която се описват двете архимедови спирали. Трябва да се отчете, че в същата равнина се задават и проекциите на режещите ръбове, получени при оформянето на предните повърхнини. Архимедовите спирали (AS) с уравнения:

$$AS1: \rho_A = a_1 \cdot \theta_i + r$$
$$AS2: \rho_B = a_2 \cdot \theta_i + r'$$

ограничават, в зависимост от мястото на стружковите канали, дължините на режещите ръбове на плашката. Ъгъл *θi* е текущият ъглов параметър за всяка от спиралите. В мо-

мента фиксиран с $\theta_i = 0$ се вижда, че $\rho_1 = R_1$, а $\rho_2 = R_1 + b$, т.е. AS2 в този момент ще има по-голямо нарастване от ASI равно на $\rho_2 - \rho_1 = b$ (Фиг.3.4). В същото време ASI се намира на окръжност R_1 , а AS2 е отдалечена от нея на разстояние b. Следователно тя в някой предишен момент е пресякла окръжност R₁. За да се намери този момент, ще се използва условието, че тогава $\rho_2 = R_1$ и след заместване в уравнение (3.17) се получава:



$$R_1 = a_2 \theta_{\mu_2} - r \,, \tag{3.19}$$

Фиг.3.4 Проекции на конусните винтови линии върху равнината Оху

където с θ_{H2} е означен ъгълът спрямо момента $\theta = 0$, при който AS2 е пресякла окръжност R_1 . Следователно $\theta_{H2} = \frac{R_1 - r}{a_2}$, а след преработване на израза се получава:

$$\theta_{H2} = \frac{(R_1 - r)(1 - tg \gamma tg\kappa_r)}{ptg\kappa_r};$$
(3.20)

Следователно пресечната точка на AS2 с окръжност R_1 ще бъде изместена спрямо аналогичната пресечна точка на AS1 на ъгъл θ_{H2} . Пресечните точки на спиралите с окръжността R_1 ще се разглеждат като условни начала на тези линии.

Тъй като едновременно ще се обхождат и двете архимедови спирали, ъгловото им положение ще се отчита с един общ ъглов параметър θ . Съобразно с големината на този параметър е необходимо да се определят текущите ъглови параметри на *AS1* и *AS2* – съответно $\theta_1 u \theta_2$, чрез които да се намерят големините на текущите радиус-вектори ρ_1 и ρ_2 .

Приемайки условно, че AS1 и AS2 започват от окръжност R_1 , уравненията им ще добият вида:

$$\begin{vmatrix} AS1 - \rho_1 = R_1 + a_1 \theta_1 \\ AS2 - \rho_2 = R_1 + a_2 \theta_2 \end{vmatrix}$$
(3.21)

За начало на отчитане на ъгъл θ се приема началото на *AS2*. В този момент от изменението на двете спирали (при $\theta = 0$), $\rho_2 = R_1$, а $\rho_1 < R_1$ и заедно ρ_1 и ρ_2 са завъртени спрямо началото на *AS1* на ъгъл θ_{H2} . Отчитайки тази особеност, за текущите ъглови параметри може да се запише:

$$\begin{aligned} AS1 - \theta_1 &= \theta - |\theta_{H2}| \\ AS2 - \theta_2 &= \theta \end{aligned}$$
 (3.22)

Прието е посоката на нарастване на архимедовите спирали да бъде положителната посока на отчитане на ъгъл *θ*.

От направените изводи е ясно, че AS2 започва своето изменение над окръжността R_1 по-рано от AS1 с ъгъл $|\theta_{H2}|$. Следователно във всички следващи точки радиусвектора ρ_2 ще бъде по-голям от ρ_1 . Ако се сравнят константите на архимедовите спирали:
$$\frac{p tg\kappa_r \cos \gamma}{\cos \gamma + \sin \gamma tg\kappa_r} = a_1 \qquad$$
и

$$\frac{p t g \kappa_r \cos \gamma}{\cos \gamma - \sin \gamma t g \kappa_r} = a_2,$$

е видно, че тъй като $\gamma \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ и $\kappa_r \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, то $sin \gamma \ge 0$, $cos \gamma \ge 0$ и $tg\kappa_r > 0$ и следователно $a_1 < a_2$. От последния извод става ясно, че AS2 ще нараства по-бързо от ASI и разликата $\rho_2 - \rho_1$ започва от нула от момента, в който двете спирали се пресичат. Този момент е на линията на теоретичния вътрешен диаметър на нарязваната резба, съвпадащ с теоретичния най-малък диаметър на резбата на плашката d_T .

В действителност при реален инструмент поради скосяването при върховете и в дъната на профила на резбата, като най-малък размер съществува диаметърът D_1 , а като найголям размер D и рязането се осъществява до този размер (Фиг.3.5).

При обхождане на архимедовата спирала от началния момент, когато $\theta = 0$, до достигането на размер *D*, с нарастването на θ , ρ_1 и ρ_2 също растат, като се запазва връзката $\rho_2 > \rho_1$. Следователно на размер *D* по-рано ще излезе *AS2*, но формирането на резбата при ря-



Фиг. 3.5 Връзка между радиусвекторите ρ_1 и ρ_2 , и диаметрите D_1 и D на резбата на плашката.

зане няма да бъде започнало, защото в този момент все още $\rho_1 < D/2$. Това ще стане когато и *ASI* достигне размер *D*. Този начален момент на рязане може да се отчете от условието $\rho_1 = D/2 = R$. Тогава замествайки в (3.21) се получава:

$$\rho_1 = R = R_1 + a_1 \theta_{\kappa p1},$$

Откъдето за
$$\theta_{\kappa p1}$$
 се получава: $\theta_{\kappa p1} = \frac{R - R_1}{a_1}$. (3.23)

В случая $\theta_{\kappa p1}$ е крайният текущ ъгъл за *AS1*. След заместване в (3.22) се получава: $\theta_{\kappa p1} = \theta_{\kappa p} - |\theta_{H2}|$, сл. $\theta_{\kappa p} = \theta_{\kappa p1} + |\theta_{H2}|$ Замества се $\theta_{\kappa p1}$ с (3.23) и окончателно за крайната стойност на общия ъглов параметър θ се получава:

$$\theta_{\kappa p} = \frac{R - R_1}{a_1} + \left| \theta_{H2} \right| \tag{3.24}$$

Следователно обхождането на архимедовите спирали ще се извършва в интервала $\theta \in [0, \theta_{\kappa p}].$

При прорязването на стружковите канали, режещите гребени заемат произволно положение спрямо спиралите *AS1* и *AS2*. Ако се направи анализ на навиването на инструмента и заготовката (винт и гайка) се установява, че от всички режещи гребени, първи ще изрязва прибавката този гребен, който е най-близо до края на *AS1* в положителна посока (фиг.3.4 и фиг.3.6). Следващите режещи гребени ще се подредят в нарастващ ред през ъгловата им стъпка $E_z = 2\pi / z$, в същата положителна посока. Ъгълът на отклонение на първия гребен от началото на *AS2* в положителна посока е означен с θ_I , като $\theta_I \in [0, E_z]$.

Следователно, ако за даден инструмент (с нарязани стружкови канали, заели вече определено положение спрямо резбата) е известен ъгъла θ_I , може да се намери по *AS2* първия режещ зъб от първи гребен. След това, обхождайки *AS1* и *AS2* със стъпка E_z ще се преминава по последователно режещите зъби на гребените по реда I, II, III ... От фиг. 3.4 и 3.5 се вижда, че ако за даден зъб са известни радиус-векторите ρ_1 и ρ_2 , разликата им ($\rho_2 - \rho_1$) ще бъде равна на проекцията на главния режещ ръб на този зъб върху перпендикулярната на оста на инструмента равнина. При известна стойност на ъгъла κ_r може да се определи дължината на всеки върхов режещ ръб:

$$b_i = (\rho_2 - \rho_1) / \sin \kappa_r \tag{3.25}$$

При обхождането на зъбите на режещата част, за всеки зъб са известни радиусвекторите, които описват положението на крайните точки на главния режещ ръб. Сравняването на радиус-векторите с радиусите R и R_1 , дава възможност да се определи дали определен зъб участва в рязането или не и каква част от него работи. Според формата на изрязваното сечение са два вида:

- *z* на брой частични зъба, участващи в първата навивка - №1 до №3 (фиг.3.6). Това са главно зъбите в участъка $\theta = 0 \partial o |\theta_{H2}|$, в който *AS2* е между окръжности *D* и *D*_T и във формирането на зъбите участва само *AS1*. Сечението на срязвания слой е с триъгълна форма. Също така, последните 1 – 2 зъба на режещата част (зъб №11) може да изрязват сечение с триъгълна форма понеже ASIе между размерите R_I и г и в работа участва само AS2. Някои стандарти предвиждат профила на върховете на зъбите да бъде оформен по дъга от окръжност. В тези случаи последните срязвани слоеве ще имат формата на кръгов изрез.

- цели зъби – останалите зъби, ограничавани от двете спирали AS1 и AS2 и изрязващи трапецовидно сечение.





Формата на сечението за даден зъб се определя с помощта на уравненията:

| $\rho_1 \leq R$ | |
|-------------------|--------|
| $\rho_2 > R$ | |
| $\rho_1 \ge R_1$ | (3.26) |
| $\rho_2 \leq R'$ | (5.20) |
| $\rho_1 \leq R_1$ | |
| $\rho_2 \ge R_1$ | |

като при изпълнени първа и трета проверки се изрязва триъгълен слой, а при изпълнена втора проверка сечението е трапецовидно.

Дължината на произволен върхов режещ ръб съгласно зависимост (3.25) ще бъде: $b_i = (\rho_2 - \rho_1) / \sin \kappa_r$, а сумарната дължина на активните в даден момент режещи ръбове:

$$b_{\sum j} = \sum_{i} b_i \tag{3.27}$$

Алгоритъм за пресмятането им е представен на фиг.3.8.

3.6. Площ на сечението на срязвания слой

Поради това, че режещите гребени на инструмента се изработват през една и съща ъглова стъпка, то всички трапецовидни сечения на срязвания слой, изрязвани от последователно работещите в съответното междузъбие зъби на плашката са с еднаква дебелина a_z .

Всеки трапец има за основи главния режещ ръб b_i и основата на срязваното сечение a_i и височина a_z фиг.3.7. Следователно площта на сечението му е:



Фиг. 3.7 Параметри на сечението на срязвания слой



Общата площ на срязваните от всички зъби сечения ще бъде:

$$S = \frac{\sum a_i + \sum b_i}{2} a_z$$

Сеченията на срязваните слоеве, имащи триъгълна форма могат да бъдат разглеждани също като трапеци, на които едната основа е равна на нула.

Основата на срязвания слой се получава от пресичането на резбовата винтова повърхнина с конусна повърхнина, но отместена спрямо конуса, формиращ главните режещи ръбове на разстояние a_z . Пресечниците на тази конусна повърхнина с винтовите повърхнини на резбата също ще бъдат архимедови спирали, но отместени спрямо тези на главния режещ ръб. Прието е параметрите, отнасящи се до основата на срязвания слой да се означават с индекс прим (`).



Фиг. 3.8 Алгоритъм за пресмятане на сумарната дължина на главните режещи ръбове за текущо положение на инструмента.



Фиг. 3.9 Определяне на радиус вектора ρ'_2



Фиг. 3.10 Определяне на радиус вектора ρ_1

Тъй като
$$\Delta \rho_2 = \rho_2 - \rho_2 = BC$$
, то

$$\Delta \rho_2 = \frac{a_z \cdot \cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \kappa_r)} \tag{3.30}$$

Следователно:

$$\rho_2 = \rho_2 + \Delta \rho_2 = \rho_2 + \frac{a_z \cdot \cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \kappa_r)}$$
(3.31)

Определянето на радиус-вектора ρ_1 чрез радиус-вектора ρ_1 и отместването $\Delta \rho_1$ се извършва по схемата на фиг. 3.10.

Οτ ΔABC :

$$BC = a_z$$
; сл. $AC = \frac{a_z}{\cos(\alpha_2 - \kappa_r)};$

Тогава пресечниците на образуващата конусна повърхнина с винтовите повърхнини ще бъдат AS1` и AS2`, с полярни координати $\left(\rho_{1}, \theta_{1}\right)$ и $\left(\rho_{2}, \theta_{2}\right)$.

Тъй като са известни радиус-векторите ρ_1 и ρ_2 на главния режещ ръб за всеки зъб, радиус-векторите ρ_1 и ρ_2 могат да се определят чрез радиалното отместване на архимедовите спирали AS1` и AS2` съответно спрямо AS1 и AS2, което поради успоредността на двете конусни повърхнини ще бъде постоян-HO.

Определянето на радиус-вектора ρ_2 чрез радиус-вектора ρ_2 и отместването $\Delta \rho_2$ се извършва по схемата на фиг. 3.9.

От ΔADC :

$$CD = a_z$$
; сл. $AC = \frac{a_z}{\cos(\alpha_1 + \kappa_r)};$

От ΔABC :

$$BC = AC.\cos\alpha_1 = \frac{a_z \cos\alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \kappa_r)}.$$

От ΔADC :

$$CD = AC.\cos\alpha_2 = \frac{a_z \cos\alpha_2}{\cos(\alpha_2 - \kappa_r)}$$

Тъй като $\Delta \rho_1 = \rho_1 - \rho_1 = CD$, то

$$\Delta \rho_1 = \frac{a_z \cdot \cos \alpha_2}{\cos(\alpha_2 - \kappa_r)} \tag{3.32}$$

Следователно:

$$\rho_1 = \rho_1 + \Delta \rho_1 = \rho_1 + \frac{a_z \cdot \cos \alpha_2}{\cos(\alpha_2 - \kappa_r)}$$
(3.33)

Тогава за дължината на основата на срязвания слой се получава:

$$a_{i} = \left(\rho_{2}^{'} - \rho_{1}^{'}\right) / \sin \kappa_{r} = \frac{\rho_{2} - \rho_{1} + a_{z} \left(\frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha + \kappa_{r})} - \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \kappa_{r})}\right)}{\sin \kappa_{r}}$$

$$a_{i} = \frac{\rho_{2} - \rho_{1} + a_{z} \cos \alpha \left(\frac{1}{\cos(\alpha + \kappa_{r})} - \frac{1}{\cos(\alpha - \kappa_{r})}\right)}{\sin \kappa_{r}}$$
(3.34)

3.7. Силово натоварване на режещата част на плашка

Тъй като силата на рязане *F_R* заема общо, неизвестно направление тя не може да се използва директно. Затова тя се разлага на съставляващи по три взаимно перпендикулярни направления – фиг. 3.11:

X - по оста на инструмента, съвпадащо с направлението на подавателното му движение \vec{v}_{f} ;

Z - перпендикулярно на оста 0-0 и съвпадащо с направлението на главното движение \vec{v}_c ;

Y - перпендикулярно на равнината *xz*.

Компонентите на общата сила \vec{F}_R по тези оси са съставящите на силата на рязане и се определят като:

*F*_c - главна (тангенциална) сила на рязане, действаща в направлението на главното движение;

F_p - радиална (нормална) сила на рязане, действаща в направление нормално на обработената повърхнина;

F_f- осова сила на рязане, действаща в направление на подавателното движение.



Фиг. 3.11 Силово натоварване на режещ зъб на плашката

Силата F_c създава въртящия момент на рязане, а F_f - осовата сила на рязане, натоварваща подавателния превод на машината в началния момент на врязване, след което се поема и разпределя от навивкете на инструмента при реализиране на подавателното двежение.

Силата F_p се стреми да изтласка (отдели) режещия ръб в процеса на рязане от обработваната повърхнина, увеличавайки съставляващите на силите на рязане F_f и F_c . Тя е насочена навътре в тялото на плашката. Наличието на диаметрално противоположни точки по режещите ръбове уравновесява в известна степен тези сили.

В силовите изчисления се използва специфичната сила на рязане k_c, N/mm², в която са включени и силите на триене по задните повърхнини.

За целите на анализа се приема, че силите F_p се уравновесяват и те се пренебрегват при пресмятане на силовото натоварване на инструмента, а влиянието на F_f е краткотрайно и при установен режим на нормална работа на инструмента реално отсъства. Необходимо е да се подчертае, че в действителност натоварването по осите x и y е неравновесно и както е доказано по-нататък в настоящата работа, това води в определени случаи до дебаланс в работата на инструмента с всички произтичащи от това последствия.

Разглежда се i-я зъб на инструмента, който изрязва сечение с площ S_i . Приема се, че силите на триене са включени като неделима част от специфичното налягане на рязане k_c (специфичната сила на рязане, N/mm^2) и, че то е равномерно разпределено нор-

мално на предната повърхнина в рамките на срязваното сечение *S_i*. Тогава резултантната сила действаща върху предната повърхнина ще бъде:

$$F_{fc}' = \int_{(s)} k_c ds$$

Приема се, че равнодействащата сила е приложена в центъра на тежест на контактното сечение. Чрез предложения алгоритъм за пресмятане на сумарната площ, може при обхождането на зъбите да се определи площта на срязваното сечение за всеки зъб. Чрез радиус-векторите ρ_1 , ρ_2 , ρ_1 ` и ρ_2' може да се намери проекцията S_{AB} (фиг.3.12) на контактното сечение S_{AC} във вертикалната равнина. Следователно $S_{AC} = S_{AB} / \cos \gamma$ и тогава равнодействащата сила F`xz насочена нормално на предната повърхнина ще бъ-



Фиг.3.12 Схема за определяне на натоварването по предната повърхнина

де $F'_{fc} = k_c$. $S_{AC} = k_c$. S_{AB} /cosy. Същевременно тази сила трябва да се проектира в хоризонталната равнина xz, за да се намерят компонентите на силата на рязане F_c и F_f . Проектирайки F'_{fc} в равнината xz се получава

$$F_{fc} = F'_{fc} \cos \gamma = \frac{k_c S_{AB}}{\cos \gamma} \cos \gamma \,.$$

Следователно $Fxz = k_c$. S_{AB} , т.е. си-

лата F_{fc} може да се получи направо, независимо от ъгъл γ , чрез проекцията S_{AB} на контактното сечение S_{AC} на срязвания слой във вертикалната равнина, която се определя от радиус-векторите ρ_1 , ρ_2 , ρ_1 ` и ρ_2' при обхождането на зъбите.

Определената сила $F_{fc}i$ за i-я зъб се разлага в направленията на подавателното (X) и главното (Z) движения на компонентите F_{fi} и F_{ci} ,

като:

$$F_{fi} = F_{fci} \sin \omega$$
$$F_{ci} = F_{fci} \cos \omega,$$

където *ω* е ъгълът на наклон на винтовата линия на движение на зъбите, равен на ъгъла на подем на нарязваната резба.

Следователно, ако за i-я зъб е изчислена площ на срязваното сечение *S_i*, то силите на рязане ще бъдат:;

$$F_{fi} = k_c S_i \sin \omega$$

$$F_{ci} = k_c S_i \cos \omega'$$
(3.35)

Силата *F_{ci}* създава съпротивителен въртящ момент, който може да се пресметне по зависимостта:

$$M_{c_i} = \frac{F_{c_i} \cdot d_{umi}}{2} \quad , \tag{3.36}$$

където $d_{um,i}$ е диаметърът, на който е разположен центърът на тежест на -*i*-то срязвано сечение.

Сумирайки моментите на рязане M_c , *i* за всички едновременно режещи зъби се определя сумарния въртящ момент, натоварващ инструмента:

$$M_c = \sum_i M_{ci} \tag{3.37}$$

Както се вижда от формула (3.36), за да се определи моментът на рязане за -*i* -я зъб е необходимо да се намери центъра на тежест на активното изрязвано сечение от зъба в разглеждания момент.

За определяне радиуса на центъра на тежест ρ_{um} за всяко сечение се използва





след което радиусът ρ_{um} ще бъде:

$$\rho_{\mu m} = \Delta \rho_{\mu m} + C_1$$
 (3.38)

мирането на корекцията $\Delta \rho_{um}$,

За основните трапецовидни сечения, които изрязват целите зъби (над z), $\Delta \rho_{um}$ се определя по схемата от фиг.3.13.

Ако C_1 , C_2 , C_1 , C_2' са определените действителни радиус-вектори, ограничаващи сечението, за $\Delta \rho_{um}$ се извежда следната зависимост:

$$\Delta \rho_{IIT} = \left(\frac{b}{2} + h_c \frac{\left(a_z tg(\alpha_{10} + \kappa_r) + \frac{a}{2}\right) - \frac{b}{2}}{a_z}\right) sin\kappa_r + h_c \cos\kappa_r, \qquad (3.39)$$

където $a = \frac{C_2 - C_1}{sin\kappa_r}$ е дължина на главния режещ ръб, (3.40)

b - дължина на основата на срязвания слой;

 h_c - разстоянието от центъра на тежест до основата *в* за i-то сечение.

Анализирайки и останалите форми на изрязваните сечения и проследявайки процеса на работа на всяка група зъби, се определя система от условия (таблица 3.1), от която може да се установи участието на даден зъб в рязане и частта от него изрязваща прибавка в дадения момент. При изпълнението на някое условие се определят действителните радиус-вектори C_1 , C_2 , C_1 , C_2 , фиксиращи изрязваното сечение, а чрез тях площта му и радиуса на центъра на тежест. Въз основа на тези допълнения може да се построи алгоритъм за пресмятане на момента M_c и осовата сила F_f на рязане. Той е аналогичен на алгоритъма от фиг.3.14 с допълнение в цикъла за обхождане на зъбите да-

 $\Delta \rho_{um} = \frac{(C_2 - C_1)^3 - (C_2' - C_1')^3}{3((C_2 - C_1)^2 - (C_2' - C_1')^2)}$ $\Delta \rho_{um} = \frac{(C_2 - C_1)^3 - (C_2' - C_1')^3}{3((C_2 - C_1)^2 - (C_2' - C_1')^2)^2}$ $\Delta \rho_{um} = \frac{C_2 - C_1}{3}$ $\Delta \rho_{\eta m} = \frac{C_2 - C_1}{3}$ Формула (3.40) Формула (3.40) Формула (3.40) $S_{\Delta} = \frac{(C_2 - C_1)^2 - (1 + tg\alpha_{10}tg\kappa_r)}{(1 + tg\alpha_{10}tg\kappa_r)}$ $S_{mpan} = \frac{(C_2 - C_1)^2 - (C_2' - C_1')^2}{(C_2 - C_1')^2}$ Площ на изрязваното сечение $S_{mpan} = \frac{a+b}{2}a_z$ $S_{mpan} = \frac{a+b}{2}a_z$ $S_{\Delta} = \frac{\left(C_2 - C_1\right)^2}{2tg\kappa_r}$ $2 tg \kappa_r$ $2tg\kappa_r$ $S_{mpan} = \frac{a+b}{2}a_z$ $S_{mpan} = \frac{a+b}{2}a_z$ 2 2 1 = 1 $\mathbf{i} > \mathbf{z}$ до z до z . _____ II \parallel вектори С₁` и С2` Действителни $C_1{}^{\prime}=D_1/2$ $C_1{}^{\,\prime}=D_1/2$ $C_2' = D_0/2$ $C_1{}^{\,\prime}=\rho_1{}^{\,\prime}$ $C_2{}^\prime = \rho_2{}^\prime$ paduyc- $C_2{}'=\rho_2{}'$ $C_1{}'=\rho_1{}'$ $C_2{}'=\rho_2{}'$ телните диамет-Положение на ρ_i спрямо действи- $D_1/2<\rho_2{}^\prime>D_0/2$ $D_1/2 \leq \rho_1` > D_0/2$ $D_1/2 \leq \rho_1\, `> D_0/2$ $D_1/2 \leq \rho_2{\,}' > D_0/2$ $pu D_1 u D_0$ $\rho_1\, `\leq D_1/2$ $\rho_2{\,}^{\prime} > D_0\!/2$ $\rho_1\, `\leq D_1/2$ $\rho_2\, ^{\prime} \geq D_1/2$ Врязване на зъби-Рязане с триъгъл-Етап на работа активно трапецоп тип на режепо-малко от мак-Врязване на пърно или трапецо-Рязане с цялото видно сечение, те с пълен прощите зъби видно сечение вите частични сималното зъби

Таблица 3.1 Система от условия за определяне на сечението на срязвания слой и радиуса на центъра на тежест р_{ит}

- 84 -

циф



Фиг. 3.14 Алгоритъм за пресмятане на сумарната дължина на всички режещи ръбове $\Sigma b_{\Sigma m j}$.



Фиг. 3.15 Алгоритъм за пресмятане на момента M_c и осовата сила F_f

3.8. Числов пример

Да се пресметнат параметрите на кръгла резбонарезна плашка M20x1,5 при следните изходни данни:

- външен диаметър на резбата D = 20 mm;
- вътрешен диаметър на резбата $D_1 = 18,1596$ mm;
- среден диаметър на резбата $D_2 = 19,026$ mm;
- установъчен ъгъл $\kappa_r = 20^\circ$;
- преден ъгъл $\gamma_p = 30^\circ$.
- z = 5

Резултатите от пресмятането на числовия пример са представени в табличен вид в

табл. 3.2. - табл. 3.4.

Таблица 3.2. *Стойности на радиус-вектора р*₁за плашка М20х1,5, пресметнати в съответствие с математичния модел и представените алгоритми

| | | | | | | | | | | | | | · · | |
|----------------------|----|---------|-------|-------|--------------|-------|----|-----|-------|-------|---------|----------------------------|---------|-----------|
| ц на е | R | R_{I} | R_2 | K_r | <i>Ө</i> , ° | θ,rad | γ | Р | р | r | a_{l} | а ₁ . Ө, rad | $ ho_l$ | ц на |
| ре, ган | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 0 | 0 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0 | 8,8635 | pe, ra |
| 011 DII | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 10 | 0,175 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,0125 | 8,8760 | по |
| lep pec | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 20 | 0,349 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,0251 | 8,8885 | lep pa |
| MoH | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 30 | 0,524 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,0376 | 8,9011 | How |
| 11 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 40 | 0,698 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,0501 | 8,9136 | Ţ |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 50 | 0,873 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,0627 | 8,9261 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 60 | 1,047 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,0752 | 8,9387 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 70 | 1,222 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,0877 | 8,9512 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 80 | 1,396 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1003 | 8,9637 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 90 | 1,571 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1128 | 8,9763 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 100 | 1,745 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1253 | 8,9888 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 110 | 1,920 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1379 | 9,0013 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 120 | 2,094 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1504 | 9,0139 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 130 | 2,269 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1629 | 9,0264 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 140 | 2,443 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1754 | 9,0389 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 150 | 2,618 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,1880 | 9,0515 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 160 | 2,793 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2005 | 9,0640 | |
| $\theta_{\rm H1}$,° | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 173 | 3,013 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2163 | 9,0798 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 180 | 3,142 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2256 | 9,0891 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 190 | 3,316 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2381 | 9,1016 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 200 | 3,491 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2506 | 9,1141 | |
| $\theta_{\rm H}$ | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 209 | 3,641 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2615 | 9,1249 | I,3 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 220 | 3,770 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2707 | 9,1342 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 230 | 4,014 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,2882 | 9,1517 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 240 | 4,270 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3066 | 9,1701 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 250 | 4,363 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3133 | 9,1768 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 260 | 4,538 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3258 | 9,1893 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 270 | 4,712 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3384 | 9,2018 | |
| III-1 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 281 | 4,898 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3517 | 9,2152 | V,2 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 290 | 5,061 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3634 | 9,2269 | |

| | 10 | 0 000 | 0.512 | 20 | 200 | 5 226 | 20 | 15 | 0 220 | 0 062 | 0.0719 | 0.2760 | 0 2204 | |
|---------------|----|-------|-------|----|-----|--------|----|-----|-------|-------|--------|--------|------------------|--------------|
| | 10 | 9,080 | 9,515 | 20 | 210 | 5,230 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,803 | 0,0718 | 0,3700 | 9,2394 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 310 | 5,411 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3885 | 9,2520 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 320 | 5,526 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,3968 | 9,2603 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 330 | 5,760 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,4136 | 9,2770 | |
| TT 7 4 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 340 | 5,893 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,4231 | 9,2866 | |
| 1V-1 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 353 | 6,155 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,4419 | 9,3054 | IV,2 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 360 | 6,283 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,4512 | 9,3146 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 370 | 6,458 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,4637 | 9,3272 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 380 | 6,632 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,4762 | 9,3397 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 390 | 6,783 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,4870 | 9,3505 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 400 | 6,981 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5013 | 9,3648 | |
| 37.1 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 410 | /,149 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5133 | 9,3/68 | |
| V-1 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 425 | 7,411 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5321 | 9,3956 | Ш,2 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 430 | /,505 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5389 | 9,4024 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 440 | /,6/9 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5514 | 9,4149 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 450 | 7,854 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5639 | 9,4274 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 460 | 8,040 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5773 | 9,4407 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 4/0 | 8,203 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,5890 | 9,4525 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 480 | 8,378 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6015 | 9,4650 | |
| 1-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 497 | 8,668 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6224 | 9,4859 | <u> </u> |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 500 | 8,727 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6266 | 9,4901 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 510 | 8,901 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6391 | 9,5026 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 520 | 9,076 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6517 | 9,5151 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 530 | 9,296 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6675 | 9,5310 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 540 | 9,425 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6767 | 9,5402 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 550 | 9,663 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,6938 | 9,5573 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 560 | 9,774 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7018 | 9,5653 | |
| П-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 569 | 9,924 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7126 | 9,5761 | 1,2-2 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 580 | 10,123 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7269 | 9,5903 | T O 1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 590 | 10,332 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7419 | 9,6054 | 1,2-1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 600 | 10,553 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7577 | 9,6212 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 610 | 10,647 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7645 | 9,6279 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 620 | 10,821 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7770 | 9,6405 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 630 | 10,996 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,7895 | 9,6530 | 37.1 |
| 111-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 641 | 11,181 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,8028 | 9,6663 | V,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 650 | 11,345 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 0,8146 | 9,6/81 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 660 | 11,589 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,803 | 0,0718 | 0,8321 | 9,6956 | |
| | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 690 | 11,094 | 20 | 1,3 | 0,239 | 0,003 | 0,0718 | 0,8390 | 9,7031 | |
| | 10 | 9,080 | 9,515 | 20 | 600 | 11,809 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,803 | 0,0718 | 0,8480 | 9,/114 | |
| | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 700 | 12,043 | 20 | 1,3 | 0,239 | 0,003 | 0,0710 | 0,804/ | 9,1282 | |
| TV 2 | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 700 | 12,217 | 20 | 1,3 | 0,239 | 0,003 | 0,0718 | 0,8772 | 9,7407 | IV 1 |
| 1 V - 2 | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 720 | 12,438 | 20 | 1,3 | 0,239 | 0,005 | 0,0718 | 0,8931 | 9,7505 | 10,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 720 | 12,300 | 20 | 1,3 | 0,239 | 0,003 | 0,0710 | 0,9023 | 9,1030 | |
| | 10 | 9,000 | 7,313 | 20 | 740 | 12,/41 | 20 | 1,J | 0,239 | 0,003 | 0,0710 | 0,9140 | 7,1103 | |
| | 10 | 9,000 | 7,313 | 20 | 750 | 12,040 | 20 | 1,J | 0,239 | 0,003 | 0,0710 | 0,9224 | 7,/030 | |
| | 10 | 9,000 | 7,313 | 20 | 760 | 13,000 | 30 | 1,J | 0,239 | 0,003 | 0,0710 | 0,9582 | 7,001/ 0 8150 | |
| | 10 | 9,000 | 7,313 | 20 | 700 | 13,203 | 20 | 1,J | 0,239 | 0,003 | 0,0710 | 0,9524 | 7,0137 | |
| V 2 | 10 | 9,000 | 9,313 | 20 | 795 | 13,439 | 30 | 1,5 | 0,239 | 0,003 | 0,0719 | 0.0822 | 9,0204 | III 1 |
| <u> </u> | 10 | 9,000 | 9,515 | 20 | 700 | 13,094 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8 863 | 0.0718 | 0,9855 | 9,8408 | <u> </u> |
| | 10 | 9 080 | 9 513 | 20 | 800 | 13 062 | 30 | 1,5 | 0.239 | 8 863 | 0.0718 | 1 0026 | 9.8660 | |
| | 10 | 9,000 | 9,513 | 20 | 810 | 1/ 102 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8 863 | 0.0719 | 1,0020 | 9,0000 | |
| | 10 | 2,000 | 2,313 | 20 | 010 | 14,102 | 50 | 1,J | 0,239 | 0,005 | 0,0710 | 1,0120 | 2,0701 | |

| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 820 | 14,323 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,0284 | 9,8919 | |
|------|----|-------|-------|----|-----|--------|----|-----|-------|-------|--------|--------|--------|------|
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 830 | 14,486 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,0402 | 9,9036 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 840 | 14,661 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,0527 | 9,9162 | |
| I-3 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 857 | 14,951 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,0735 | 9,9370 | II,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 860 | 15,010 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,0778 | 9,9412 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 870 | 15,184 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,0903 | 9,9538 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 880 | 15,359 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,1028 | 9,9663 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 890 | 15,579 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,1186 | 9,9821 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 900 | 15,708 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,1279 | 9,9914 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 910 | 15,830 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,1367 | 10,000 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 920 | 16,057 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,1529 | 10,016 | |
| II-3 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 929 | 16,208 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,1638 | 10,027 | I,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 940 | 16,406 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,0718 | 1,1780 | 10,041 | |

*Забележка: Сечение номер I,2 се разглежда като съставено от две по-малки трапецовидни сечения с условни номера I,2-1 и I,2-2.

Таблица 3.3. Стойности на радиус-вектора ρ_2 за плашка M20x1,5, пресметнати в съответствие с математичния модел и представените алгоритми

| На | R | R1 | <i>R2</i> | Kr | <i>θ</i> , ° | θ,rad | γ | Р | р | r | a_2 | а2. 0 ,rad | $ ho_2$ | Ц |
|-------------------|----|-------|-----------|----|--------------|-------|----|-----|-------|-------|-------|-----------------------|---------|----------|
| рел ан(| 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 0 | 0 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0 | 8,8635 | o pe |
| 01 181 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 10 | 0,175 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,0192 | 8,8827 | абс |
| ech I | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 20 | 0,349 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,0384 | 8,9019 | a p |
| dп | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 30 | 0,524 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,0576 | 8,9211 | ПOГ Н |
| H | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 40 | 0,698 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,0768 | 8,9403 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 50 | 0,873 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,096 | 8,9595 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 60 | 1,047 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,1152 | 8,9787 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 70 | 1,222 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,1344 | 8,9979 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 80 | 1,396 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,1536 | 9,0171 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 90 | 1,571 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,1728 | 9,0363 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 100 | 1,745 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,192 | 9,0555 | |
| $	heta_{H2}$, ° | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 113 | 1,967 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,2163 | 9,0798 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 120 | 2,094 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,2304 | 9,0939 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 130 | 2,269 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,2496 | 9,1131 | |
| $\theta_{\rm I}$ | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 137 | 2,386 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,2624 | 9,1259 | 11,3 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 150 | 2,618 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,288 | 9,1515 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 160 | 2,793 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,3072 | 9,1707 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 170 | 3,002 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,3302 | 9,1937 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 180 | 3,229 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,3552 | 9,2187 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 190 | 3,316 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,3648 | 9,2283 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 200 | 3,491 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,384 | 9,2475 | |
| $\theta_{\rm II}$ | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 209 | 3,642 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,4006 | 9,2641 | 1,3 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 220 | 3,84 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,4224 | 9,2859 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 230 | 4,014 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,4416 | 9,3051 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 240 | 4,259 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,4684 | 9,332 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 250 | 4,363 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,48 | 9,3435 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 260 | 4,485 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,4934 | 9,3569 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 270 | 4,712 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,5184 | 9,3819 | |
| III-1 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 281 | 4,899 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,5389 | 9,4024 | V,2 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 290 | 5,061 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,5568 | 9,4203 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 300 | 5,236 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,576 | 9,4395 | |

| | 10 | 9 080 | 9 5 1 3 | 20 | 310 | 5 4 1 1 | 30 | 15 | 0 239 | 8 863 | 0.11 | 0 5952 | 9 4 5 8 7 | |
|--------------|----|-------|---------|----|-----|---------|----|-----|-------|-------|------|--------|-----------|-------|
| | 10 | 9,000 | 9 513 | 20 | 320 | 5 515 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8 863 | 0.11 | 0,5752 | 9 4702 | |
| | 10 | 9,000 | 9,513 | 20 | 330 | 5 742 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8 863 | 0.11 | 0,6316 | 9,4702 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 340 | 5 03/ | 30 | 1,5 | 0,239 | 8 863 | 0,11 | 0,6528 | 0 5163 | |
| IV 1 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 252 | 6 1 5 5 | 20 | 1,5 | 0,239 | 0,005 | 0,11 | 0,0528 | 9,5105 | 11/2 |
| <u> </u> | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 260 | 6 292 | 20 | 1,5 | 0,239 | 0,005 | 0,11 | 0,0771 | 9,5400 | _IV,∠ |
| | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 270 | 0,285 | 30 | 1,3 | 0,239 | 0,005 | 0,11 | 0,0912 | 9,3347 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 3/0 | 0,438 | 30 | 1,3 | 0,239 | 8,803 | 0,11 | 0,7104 | 9,5739 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 380 | 6,632 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,7296 | 9,5931 | |
| | 10 | 9,080 | 9,515 | 20 | 390 | 0,772 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,803 | 0,11 | 0,7449 | 9,0084 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 400 | 6,999 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,7699 | 9,6334 | |
| X 7 1 | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 410 | 7,130 | 20 | 1,3 | 0,239 | 0,003 | 0,11 | 0,7872 | 9,0307 | |
| V-1 | 10 | 9,080 | 9,313 | 20 | 423 | 7,412 | 20 | 1,3 | 0,239 | 0,005 | 0,11 | 0,8133 | 9,0789 | Ⅲ,∠ |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 430 | 7,505 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,8256 | 9,6891 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 440 | 7,679 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,8448 | 9,7083 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 450 | /,854 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,864 | 9,7275 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 460 | 8,029 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,8832 | 9,7467 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 470 | 8,255 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,9081 | 9,7716 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 480 | 8,378 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,9216 | 9,7851 | |
| 1-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 497 | 8,669 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,9536 | 9,817 | II,2 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 500 | 8,727 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,9600 | 9,8235 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 510 | 8,901 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,9792 | 9,8427 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 520 | 9,076 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 0,9984 | 9,8619 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 530 | 9,285 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,0214 | 9,8849 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 540 | 9,512 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,0464 | 9,9099 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 550 | 9,599 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,0560 | 9,9195 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 560 | 9,774 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,0752 | 9,9387 | |
| II-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 569 | 9,925 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,0918 | 9,9554 | I,2-2 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 580 | 10,12 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,1136 | 9,9771 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 592 | 10,33 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,1366 | 10 | I,2-1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 600 | 10,54 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,1596 | 10,023 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 610 | 10,65 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,1712 | 10,035 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 620 | 10,86 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,1942 | 10,058 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 630 | 11 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,2096 | 10,073 | |
| III-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 641 | 11,18 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,2301 | 10,094 | V,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 650 | 11,34 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,2480 | 10,111 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 660 | 11,59 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,2748 | 10,138 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 670 | 11,69 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,2864 | 10,15 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 680 | 11,8 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,2979 | 10,161 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 690 | 12,03 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,3228 | 10,186 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 700 | 12,22 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,3440 | 10,207 | |
| IV-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 713 | 12,44 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,3683 | 10,232 | IV,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 720 | 12,57 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,3824 | 10,246 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 730 | 12,74 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,4016 | 10,265 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 740 | 12,85 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,4131 | 10,277 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 750 | 13,06 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,4361 | 10,3 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 760 | 13,28 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,4611 | 10,325 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 770 | 13,44 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,4784 | 10,342 | |
| V-2 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 785 | 13,7 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,5065 | 10,37 | III,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 790 | 13,79 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,5168 | 10,38 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 800 | 13,96 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,5360 | 10,399 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 810 | 14,1 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,5513 | 10,415 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 820 | 14,31 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,5744 | 10,438 | |

| - | | | 1 | | 1 | | | | | | | 1 | | |
|------|----|-------|-------|----|-----|-------|----|-----|-------|-------|------|--------|--------|------|
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 830 | 14,54 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,5993 | 10,463 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 840 | 14,66 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,6128 | 10,476 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 850 | 14,84 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,6320 | 10,495 | |
| I-3 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 857 | 14,95 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,6448 | 10,508 | II,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 870 | 15,18 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,6704 | 10,534 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 880 | 15,36 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,6896 | 10,553 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 890 | 15,57 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,7126 | 10,576 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 900 | 15,71 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,7280 | 10,591 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 910 | 15,8 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,7376 | 10,601 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 920 | 16,06 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,7664 | 10,63 | |
| II-3 | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 929 | 16,21 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,7830 | 10,647 | I,1 |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 940 | 16,41 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,8048 | 10,668 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 950 | 16,62 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,8278 | 10,691 | |
| | 10 | 9,080 | 9,513 | 20 | 960 | 16,76 | 30 | 1,5 | 0,239 | 8,863 | 0,11 | 1,8432 | 10,707 | |

*Забележка: Сечение номер I,2 се разглежда като съставено от две по-малки трапецовидни сечения с условни номера I,2-1 и I,2-2.

Таблица 3.4. Стойности на началния ъгъл на отчитане $\theta_{H1} u \theta_{H2}$, ъгълът на разположение на първия $\theta_I u$ на втория θ_{II} режещи гребени и на крайните ъгли на отчитане $\theta_{KP1} u \theta_{KP2}$ за архимедовите спирали съответно AS1u AS2.

| $	heta_{H2}$,rad | $	heta_{H2}$, ° | AS2: θ _I ,° | θ_{KP2} ,rad | $	heta_{KP2}$,° |
|--------------------|------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|
| 1,966611 | 112,68 | 136,68 | 10,84867 | 622 |
| θ_{H1} ,rad | $	heta_{H1},$ ° | AS1: θ _{II} ,° | θ_{KP1} ,rad | θ_{KP1} ,° |
| 3,013024 | 172,63 | 208,63 | 15,82831 | 907 |

Таблица 3.5. Стойности на проекциите на режещите ръбове ρ_2 - ρ_1 в равнината хОу, действителните големини на режещите ръбове b_i , основите на сеченията на срязвания слой a_i и площите на срязвания слой A.

| Номер на сечението по ред на прес- мятане | ρ2-ρ1, mm | b _i , mm | az, mm | a _i , mm | h, mm | Форма на сечението | $A, \\ mm^2$ |
|--|--------------|---------------------|--------|---------------------|--------|-----------------------|--------------|
| I,1 | 0,0461 | 0,1348 | 0,1026 | 0,0000 | 0,0461 | триъгълна | 0,0031 |
| II,1 | 0,1392 | 0,4070 | 0,1026 | 0,0000 | 0,1026 | трапец | 0,0490 |
| III,1 | 0,1872 | 0,5474 | 0,1026 | 0,6878 | 0,1026 | трапец | 0,0634 |
| IV,1 | 0,2352 | 0,6878 | 0,1026 | 0,8282 | 0,1026 | трапец | 0,0778 |
| V,1 | 0,2832 | 0,8282 | 0,1026 | 0,9685 | 0,1026 | трапец | 0,0922 |
| I,2-1 | 0,3313 | 0,9685 | 0,1026 | 1,1089 | 0,1026 | трапец | 0,1066 |
| I,2-2 | 0,3793 | 1,1089 | 0,1026 | 1,2493 | 0,1026 | трапец | 0,1210 |
| II,2 | 0,3948 | 1,1542 | 0,1026 | 0,9756 | 0,0448 | трапец | 0,0477 |
| III,2 | 0,3337 | 0,9756 | 0,1026 | 0,7118 | 0,0769 | трапец | 0,0649 |
| IV,2 | 0,2435 | 0,7118 | 0,1026 | 0,4480 | 0,1026 | трапец | 0,0595 |
| V,2 | 0,1532 | 0,4480 | 0,1026 | 0,1842 | 0,1026 | трапец | 0,0324 |
| I,3 | 0,0630 | 0,1842 | 0,1026 | 0,1404 | 0,1026 | трапец | 0,0167 |
| II,3 | 0,0272 | 0,0796 | 0,1026 | 0,0000 | 0,0342 | триъгълна | 0,0014 |

За проверка на получените резултати е направено графично построение на разгъвката (Фиг.3.16.) на образец плашка M20x1,5 в мащаб 100:1. В таблица 3.6 са представени измерените от построението стойности за броя и вида на елементарните сечения на срязвания слой, дължините на главните режещи ръбове и разликите с пресметнатите стойности.

| Номер по ред на пресмя- тане | Измерена дължина на реж. ръбове b _{iизм} , тт | Пресметна та дължина на реж. ръбове b _i , тт | Разлики в дължини- те, тт | Радиус на центъра на тежест- та r _{цт, тт} | Измерена площ на сечението А _{изм} , mm ² | Пресметна та площ на сечението А, тт ² |
|---------------------------------------|--|--|---------------------------------|---|--|---|
| I-1 | 0,12 | 0,1348 | -0,0148 | 9,95 | 0,03 | 0,0031 |
| II-1 | 0,36 | 0,4070 | -0,0470 | 9,92 | 0,0452 | 0,0490 |
| III-1 | 0,51 | 0,5474 | -0,0374 | 9,89 | 0,0717 | 0,0634 |
| IV-1 | 0,66 | 0,6878 | -0,0278 | 9,835 | 0,0982 | 0,0778 |
| V-1 | 0,8 | 0,8282 | -0,0282 | 9,804 | 0,0344 | 0,0922 |
| I-2 | 0,94 | 0,9685 | -0,0285 | 9,724 | 0,0789 | 0,1066 |
| II-2-1 | 1,107 | 1,1089 | -0,0019 | 9,62 | 0,1002 | 0,1210 |
| II-2-2 | 1,17 | 1,1542 | 0,0158 | 9,506 | 0,0864 | 0,0477 |
| III-2 | 1,05 | 0,9756 | 0,0744 | 9,397 | 0,0724 | 0,0649 |
| IV-2 | 0,79 | 0,7118 | 0,0782 | 9,275 | 0,0582 | 0,0595 |
| V-2 | 0,52 | 0,4480 | 0,0720 | 9,16 | 0,0442 | 0,0324 |
| I-3 | 0,26 | 0,1842 | 0,0758 | 9,043 | 0,0246 | 0,0167 |
| II-3 | 0,05 | 0,0796 | -0,0296 | 9,041 | 0,0027 | 0,0014 |
| | | | | Σ: | 0,7471 | 0,7355 |

Таблица 3.6. Измерени **b**_{*iuзм*} и пресметнати **b**_{*i*} дължини на режещите ръбове на плашка M20x1,5 и площи на елементарните сечения, съответно A_{изм} и A.

Сравняването на измерените с пресметнатите дължини на главните режещи ръбове показва, че разликите са в рамките на 1,5% – 11%, като по-големите отклонения са при режещите ръбове с малки дължини, което вероятно е проблем на графичното построение. Също така е установено, че точността на аналитично получените резултати е силно зависима от точността на измерване на ъгъла на отклонение θ_I на първия режещ гребен спрямо началната точка на обхождане на AS2, което при реален инструмент е затруднено.

Разликите между пресметнатите A_i и измерените площи A_{iu3M} на елементарните сечения на срязвания слой, а така също и между общите площи на профила на резбата са малки и не оказват съществено влияние върху съответното силово натоварване на плашките.

Получените резултати дават основание да се твърди, че предлаганият математичен модел и алгоритъмът за неговото прилагане могат да бъдат използвани за решаването на задачи, свързани с проектирането на плашките, анализа и оптимизирането на параметрите им, а също така и с изследване на силовото им натоварване при работа.



Фиг.3.16 Графично построение на разгъвка на режещата част на плашка M20x1,5 в мащаб 100:1

3.9. Заключение за част трета

Дефинирана е теоретична постановка на задачата за определяне площта на елементарните сечения на срязвания слой и силовото натоварване на плашката в произволен момент от работата. В резултат от проведеното математично моделиране са получени следните резултати:

1. Определени са уравненията на винтовите повърхнини, ограничаващи резбата от двете й страни, като функция на външния и вътрешния диаметри на резбата на плашката, винтовия параметър *p*, стъпката на резбата *P* и на профилния ъгъл *α*;

2. Изведено е уравнението на конусната инструментална режеща повърхнина;

3. Доказано е, че проекцията на винтовата линия, получена от пресичането на винтовата повърхнина на резбата с инструменталната конусна режеща повърхнина в нормална на оста на плашката равнина *Oxy* е архимедова спирала и са изведени уравненията на тази спирали;

4. Посредством анализ на обхождането на архимедовите спирали (проекциите на винтовите линии), са установени граничните случаи – начало и край на спиралите. Изведен е модел, посредством който се пресмятат разликите между текущите стойности на радиус-векторите на архимедовите спирали в произволна точка, представляващи проекциите на режещите ръбове на плашката в равнината *Oxy*. Разработени са алгоритми за пресмятане на действителните дължини на режещите ръбове и елементарните и общата площи на сечението на срязвания слой за произволен инструмент.

5. Проведен е теоретичен анализ на натоварването на плашката при работа и са изведени зависимости за определяне на специфичната сила на рязане k_c и въртящия момент M_c . За точното пресмятане на M_c е изведена зависимост и е разработен алгоритъм за определяне на радиусите на центрите на тежест за всяко елементарно сечение на срязвания слой.

6. Решеният числов пример за конкретен инструмент доказва точността на предлагания математичен модел и предимството от прилагането му при решаването на проектно-конструкторски и изследователски задачи.

4. Анализ и моделиране на натоварването на плашките

4.1. Сечение на срязвания слой

Качествените характеристики на нарязваните резби с кръгли плашки се определят от конструктивните параметри на плашката и от силовото натоварване на технологичната система по време на работа. Специфичната сила на рязане, респективно съпротивителният въртящ момент, зависят от формата, разположението и площта на различаващите се сечения на срязвания слой, както на отделните режещи зъби, така и на сумарните сечения на режещите гребени. Разположението им по винтова линия предопределя известна динамична неуравновесеност на инструмента при работа.

4.1.1 Форма и параметри на впадината на резбата

Сумарното сечение на срязвания слой в осова равнина при нарязване на едноходова триъгълна резба с кръгли плашки се вписва между два съседни профила на навивката. Неговата форма и размери зависят от формата и размерите на резбата, размерите на режещата част на плашката и от външния диаметър на заготовката. Изходното сечение представлява равностранен триъгълник при метрична резба и равнобедрен при цолова - фиг. 4.1. а). В съответствие със стандартите то се променя от закръгленията на върховете и на дъната на впадината - фиг. 4.1.б). За опростяване на изчисленията, свързани със силовото натоварване на плашката, сумарното сечение е прието да се изобрази като равнобедрен трапец - фиг. 4.1. в), като това почти не се отразява върху точността на получените резултати.



Фиг. 4.1. Сумарно сечение на срязвания слой при нарязване на триъгълна резба с кръгли плашки

4.1.2. Разпределение на сумарното сечение между режещите зъби

Сумарното сечение на срязвания слой се формира от елементарните сечения, изрязвани от режещите зъби на плашката. Броят им z_p и подаването на зъб f_z зависят от

външния и вътрешния диаметри на резбата d и d_{I_1} броя на гребените на плашката n, стъпката на резбата P и главния установъчен ъгъл κ_r . Определят се по зависимостите [17]:



Фиг. 4.2. Примерно разпределение на сумарно сечение на срязвания слой между режещите зъби на кръгла плашка



Фиг. 4.3. Относително разпределение на сумарното сечение на срязвания слой между режещите зъби на кръгла плашка M25x1,5

$$z_p = \frac{(d - d_1)n}{2Ptg\kappa_r} \tag{4.1}$$

$$f_z = \frac{Ptg\kappa_r}{n}, mm \tag{4.2}$$

На фиг. 4.2 е показано примерно сумарно сечение, условно разпределено между режещите зъби на кръгла плашка. Формата на елементарните сечения от 1 до 8 се изобразява с три различни равнинни фигури: разностранен триъгълник - 1 и 8, неравнобедрен трапец - 2, 3, 5 и 6 и неравностранен петоъгълник - 4 и 7. Площите на тези сечения fpi се променят в широки граници. Те зависят от подреждането на зъбите по винтовата линия и от ъгловото изрежещите гребени местване на спрямо условното и начало. Това подреждане е различно за всяка плашка и не се контролира при нейното изработване.

На фиг. 4.3 е представен в графичен вид един от възможните варианти за относително разпределение в проценти на сумарното сечение на срязвания слой между режещите зъби на кръгла плашка за дясна

резба M25x1,5 при външен диаметър на заготовката d = 24,72 mm, вътрешен диаметър на плашката $d_1 = 23,16 \text{ mm}$, главен установъчен ъгъл $\kappa_r = 20^\circ$ и брой на режещите гребени n = 5. Режещите зъби са $z_p = 11$, площта на сумарното сечение $F = 0,686 \text{ mm}^2$, а

подаването на зъб $f_z = 0,11 \text{ mm}$. Най-голям дял има елементарното сечение, изрязвано от зъб № 5 - 16,3%, а най-малък сечението от зъб № 11 - 0,1 %.

Неравностойното участие на режещите зъби в изрязването на прибавката е заложено в конструкцията на кръглите плашки и не може да бъде преодоляно. То е причина за неравномерното натоварване на зъбите и се отразява неблагоприятно върху трайността на инструмента и резултатите от неговата работа.



4.1.3. Разпределение на сумарното сечение между режещите гребени

Фиг. 4.4. Разпределение на сумарното сечение на срязвания слой между режещите зъби и гребените на плашката

Неравномерното разпределение на сечението на срязвания слой върху режещите зъби на плашката дава отражение върху натоварването на нейните гребени. За примера, посочен по-горе, е показано схематично разпределението на сумарното сечение на срязвания слой върху петте гребена - фиг. 4.4. Върховите ръбове на режещите зъби формират входящата конична инструментална повърхнина на плашката. Те са разположени симетрично, врязват се и работят едновременно. Номерирани са условно по направление на винтовата линия в посока, обратна на главното движение. Прието е гребен номер едно да бъде този, който има 3 режещи зъба.

От тях първият (левият по посока на подавателното движение) изрязва най-горната част от сечението.

Останалите гребени са с по два зъба. Изчислени са сумите от дължините на върховите режещи ръбове Σl_{pi} , mm и от площите на елементарните сечения Σf_i в mm², които се разпределят на всеки от петте гребена на плашката. Гребените са разгледани в пет от безбройните последователни положения, които може да заемат спрямо условното начало на винтовата линия в зависимост от това, къде в напречното сечение са прорязани стружковите канали. Тези положения са изместени едно спрямо друго по



Фиг. 4.5. Изменение на сумите на дължините на върховите режещи ръбове ∑lpi u площите на елементарните сечения Σfi в зависимост от номерата на режещите гребени на плашката при различни варианти на разположение условното начало спрямо на винтовата линия на резбата

надлъжната ос на разстояние 1/25 част от Усреднените стъпката на резбата. стойности, показващи тенденцията R изменението на съответния параметър в зависимост от номера на гребена, за който се отнасят, при двете групи графики са свързани с дебели линии. Получените резултати са показани в графичен вид на фиг. 4.5, а в табличен – в Таблица 4.1. Техният анализ позволява да се направят няколко съществени извода.

1. Тенденцията в промяната на стойностите на двата параметъра сумарна дължина на върховите режещи ръбове сума площите И от на елементарните сечения за отделните гребени много сходна, което e естествено, тъй като те са в тясна зависимост.

 Минималните стойности на параметрите се получават за гребени с номера
 или 2, а максималните - за 4 или 5.

3. Максималната относителната разлика за дължината на върховите режещи ръбове, изчислена въз основа на усреднените стойности, може да достигне 27%, а ако се изчисли с абсолютните стойности до 34 % (между гребени с номера 5 и 2 при първи вариант на разположение).

Максималната относителна разлика за площта на сеченията, изчислена
 въз основа на усреднените стойности, може да достигне до 24%, а ако се изчисли

с абсолютните стойности - до 34% (между гребени 4 и 1 при пети вариант).

| | Възможни последователни положения на гребените | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|-----------|--------------------------------|-----------------|-----------|--------|--|--|--|--|--|--|
| Гребен | вариант 1 | вариант 2 | вариант 3 | вариант 4 | вариант 5 | Средно | | | | | | |
| - | | | $\sum l_{\mathrm{pi}}$ | mm | | | | | | | | |
| 1 | 1,295 | 1,320 | 1,400 | 1,240 | 1,270 | 1,305 | | | | | | |
| 2 | 2,540 | 2,540 | 2,615 | 2,560 | 2,560 | 2,562 | | | | | | |
| 3 | 3,915 | 3,890 | 3,935 | 4,000 | 3,990 | 3,945 | | | | | | |
| 4 | 5,430 | 5,360 | 5,475 | 5,570 | 5,535 | 5,473 | | | | | | |
| 5 | 7,095 | 6,980 | 7,070 | 7,050 | 7,145 | 7,067 | | | | | | |
| | | | $\sum \mathbf{f}_i \mathbf{r}$ | mm ² | | | | | | | | |
| 1 | 0,1222 | 0,1207 | 0,1268 | 0,1166 | 0,1146 | 0,1202 | | | | | | |
| 2 | 0,2443 | 0,2409 | 0,2460 | 0,2459 | 0,2403 | 0,2435 | | | | | | |
| 3 | 0,3792 | 0,3733 | 0,3763 | 0,3845 | 0,3804 | 0,3791 | | | | | | |
| 4 | 0,5281 | 0,5185 | 0,5195 | 0,5384 | 0,5336 | 0,528 | | | | | | |
| 5 | 0,6798 | 0,6672 | 0,6737 | 0,6759 | 0,6801 | 0,6757 | | | | | | |
| Ъглова стойност | 0° | 14,4° | 28,8° | 43,2° | 57,6° | 72° | | | | | | |

Таблица 4.1. Суми от дължините на върховите режещи ръбове Σl_{pi} в mm и от площите на елементарните сечения Σf_i в mm² за пет режещи гребена на плашка M25x1.5

5. Минималната относителна разлика за дължината на върховите режещи ръбове, изчислена въз основа на абсолютните стойности, се получава между първи и четвърти гребен при четвърти вариант на разположение - 27%.

6. Минималната относителна разлика за сумата от площите на елементарните сечения, изчислена въз основа на абсолютните стойности, се получава между втори и пети гребен при втори вариант на разположение - 24%.

7. Различията, които се проявяват между отделните гребени на плашката по отношение на двата изследвани параметъра, са неизбежни при този вид инструменти и се отразяват негативно върху динамичното им равновесие при работа и върху качеството на нарязваната резба.

8. При теоретичното моделиране на плашките може да се намери оптимален вариант за разположение на режещите гребени спрямо условното начало на винтовата повърхнина на резбата, което да гарантира минимално динамично дебалансиране, но реализацията му практически е невъзможна.

4.2. Съпротивителен момент при нарязване на триъгълна резба с кръгли комбинирани плашки

Общият съпротивителен момент M_c при нарязване на триъгълна резба с кръгла плашка се формира от силите на стружкообразуване и силите на триене, действащи в режещите и калиброващия участъци. Той може да се представи като сума от четири момента: $M_c = M_1 + M_2 + M_3 + M_4, Nm \tag{4.3}$

където M_1 е моментът от силите на рязане, действащи на върховите и страничните ръбове на режещите зъби от активната страна на плашката;

 M_2 - момент от силите на триене по задните повърхнини на режещите зъби;

*M*₃ - момент от силите на рязане, възникващи при дооформяне на резбата от калиброващите зъби;

*M*₄ - момент от силите на триене по задните повърхнини на калиброващите зъби и на режещите зъби от обратната (неактивната) страна на плашката.

Моментът M_1 има най голям дял, тъй като се получава от действието на главната сила на рязане F_c . Неразделна част от него е M_2 , но с незначителен принос, тъй като режещите зъби от активната страна заемат само една-две навивки от цялата резба на плашката. Техните странични повърхнини са намалени с повече от 50% поради главния установъчен ъгъл κ_r и освен това затиловането по задните повърхнини на върховите ръбове намалява триенето при рязане.

Моментът M_3 се формира в зоната на калиброващата част. Тя заглажда неравностите и отстранява част от еластично възстановения след рязането повърхностен слой по профила на резбата. Тъй като режещата част не е уравновесена [12], плашката се стреми да се измести спрямо надлъжната ос на резбата и първите калиброващи зъби допълнително изрязват профила. Моментът М₃ не се поддава на теоретични изчисления и при определени условия може да има относително голям дял. Неразделна част от него е моментът M_4 , който възниква поради това, че плашката се навива с калиброващата и неактивната режеща части върху нарязаната резба без хлабина и дори с известна стегнатост поради еластичното възстановяване. Калиброващите гребени, които не са затиловани, поемат ролята на подвижна триеща опора за плашката, като я уравновесяват и стабилизират по време на работа. Подобна роля играят и режещите зъби от обратната (неактивната) страна със страничните си задни повърхнини, но те може да затруднят движението на плашката, ако между тях и навивките на готовата резба попаднат стружки. Приносът на отделните калиброващи зъби за момента M_4 не е еднакъв и би трябвало да намалява по посока на изхода на плашката.

От специализираната литература по резбонарязване не са известни теоретични модели, които може да се използват за изчисляване на съставляващите на общия момент. Тази нелесна задача се решава частично по експериментален път, като моментите се определят чрез динамометриране по двойки - M_1 съвместно с M_2 за

режещата и M_3 с M_4 за калиброващата и неактивната режеща част на плашката. В този случай уравнение (4.3) се трансформира във вида:

$$M_C = M_{PE\mathcal{K}} + M_{KA\Pi}, Nm \tag{4.4}$$

На фиг. 4.6 е представен запис на диаграмата на изменение на съпротивителния момент M_C при нарязване на триъгълна резба M16x1,5 върху заготовка от въглеродна стомана У10 с твърдост НВ=200. Използвана е стандартна плашка с два режещи участъка, един калиброващ, пет режещи гребена и главен установъчен ъгъл $\kappa_r = 30^\circ$. Нарязвана е резба на цилиндрична повърхнина с диаметър d = 15,86 mm и дължина l = 14 mm, която е с прави чела от двете страни (няма преходни фаски). Вътрешният диаметър на резбата е $d_1 = 13,92$ mm. При тези параметри активните режещи зъби са девет. Те се разполагат на дължина 1,68 mm, т.е. малко повече от една стъпка. Пълната контактна дължина на плашката със заготовката е 11 mm.



Фиг. 4.6. Диаграма на изменение на съпротивителния момент M_C при нарязване на метрична резба M16x1,5 със стандартна кръгла плашка

На диаграмата може да се отбележат пет характерни участъка. Първият участък започва в момента, в който плашката докосне с режещите си гребени челото на заготовката и завършва, когато всички режещи зъби влязат в действие, т.е. активната режеща част се е включила изцяло в изрязването на навивките. В края на този период действа моментът $M_{PE\mathcal{K}}$. Анализът на диаграмата показва, че относителният му дял в общия съпротивителен момент M_C е в границите на 80-90%.

Вторият участък няма ясно очертана граница с първия. Той започва, когато в работа се включат първите калиброващи зъби и продължава 2-3 навивки, които са достатъчни да се заличат микронеравностите и част от еластичното последействие на материала, наследени от първия етап на работа на плашката. Отличава се с подчертана неравномерност (пулсации) на съпротивителния момент. През този период към $M_{PE\mathcal{K}}$ нарастващо се натрупва моментът $M_{KAЛ}$. Относителният му дял в общия момент е от 10 до 20%.

Третият участък е продължение на втория и е сравнително най-спокоен, тъй като върху напълно оформената резба се навиват без особено съпротивление останалите калиброващи зъби и зъбите на неактивната режеща част. През този период общият съпротивителен момент се задържа почти постоянен на максималната си стойност (ако се пренебрегнат пулсациите, дължащи до голяма степен на еластичните елементи на динамометъра).

Четвъртият участък съответства на периода, през който режещите зъби последователно излизат от заготовката, докато моментът $M_{PE\mathcal{K}}$ престане да действа. По продължителност той е равностоен на първия, но интензивността на намалението на общия момент е по-слабо изразена в сравнение с интензивността на нарастването, тъй като останалите части на плашката продължават да работят.



Фиг. 4.7. Диаграма на изменение на съпротивителния момент M_C при нарязване на метрична резба M20x1,5 с комбинирана плашка

По време на петия участък калиброващата и неактивната режеща части постепенно излизат от заготовката, при което общият съпротивителен момент намалява от $M_{KAЛ}$ до 0, когато контактът между плашката и заготовката се прекрати.

При комбинираните плашки калиброващата част включва цели навивки, които не са прекъснати от надлъжни стружкови канали, не участват в рязането, а чрез триене и пластично деформиране заглаждат нарязаната резба - фиг. 4.7. Към режещата част задължително се включват 2-3 зъба с пълен профил. Те играят ролята на калиброващи и чрез тях се гарантира проходимостта на резбата за деформиращите навивки. За тези плашки в уравнение (1) отпада моментът M_3 , като част от него се включва в момента M_1 . Уравнение (2) запазва вида си, но моментът $M_{KAЛ}$ има по-различен характер.

На фиг. 4.7. е представен запис на диаграмата на изменение на съпротивителния момент M_C при нарязване на триъгълна резба M20x1,5 върху заготовка от въглеродна стомана У10 с твърдост HB=200. Използвана е едностранно режеща комбинирана плашка с пет гребена, главен установъчен ъгъл $\kappa_r = 20^{\circ}$ и преден ъгъл $\gamma = 10^{\circ}$. Нарязвана е резба на цилиндрична повърхнина с прави чела от двете страни (няма преходни фаски), диаметър d = 19,75 mm и дължина l = 12 mm,. Вътрешният диаметър на резбата е $d_l = 18,06$ mm. При тези параметри активните режещи зъби са единадесет. Те се разполагат на дължина 2,32 mm. В режещите гребени се включват още шест зъба, които калиброват различни участъци от профила на резбата, като два от тях го покриват изцяло. Пълната контактна дължина на плашката със заготовката е 7,5 mm.

Изменението на общия съпротивителен момент M_C при работа с комбинирани плашки също преминава през пет етапа.

През първия етап всички режещи и калиброващи зъби влизат в действие, като моментът $M_{PEЖ}$ достига максимална стойност. Резултатите от експериментите показват, че относителният му дял в общия съпротивителен момент M_C е от 80 до 90%.

През втория етап върху нарязаната резба с определена стегнатост се навиват деформиращите навивки. Те постепенно ориентират положението на плашката спрямо надлъжната ос и я стабилизират, като уравновесяват радиалните сили в режещата част, прибавяйки $M_{KA\Pi}$ в общия момент. За стомана У10 при посочените по-горе параметри неговият относителен дял е между 7 и 15%.

През третия етап работят всички навивки на плашката - режещи и деформиращи. Той е сравнително спокоен. Общият съпротивителен момент се задържа постоянен и дори се забелязва известно намаляване на средната му стойност в сравнение с предходния период. Това може да се обясни до известна степен с уравновесяването на плашката, стабилното и движение по резбата и намаляване на ефекта от участието на последните режещи зъби във формирането на профила.

През четвъртия етап режещите гребени постепенно излизат от заготовката и съпротивителният момент намалява значително, тъй като *М*_{РЕЖ} престава да действа.

През последния пети етап плашката продължава да се навива върху резбата с деформиращите навивки и на диаграмата се отчита само моментът $M_{KAЛ}$, който постепенно намалява до 0 при завършване на резбата.

В заключение на казаното до тук, може да се твърди, че при нарязване на триъгълна резба с кръгли комбинирани плашки стойностите на общия съпротивителен момент M_C са съизмерими с тези при обикновените кръгли плашки. Развитието на момента при двата вида плашки е идентично, но характерът на съпротивлението е различен.

Представляващият интерес в случая относителен дял на съпротивителния момент в деформиращата част на плашката $M_{KA,T}$ при нарязване на заготовки от стомана У10 е в границите от 7 до 15% и в това отношение на практика е без значение вида на калиброващата част на инструмента.

Деформиращите навивки на комбинираната плашка по-добре стабилизират нейното движение по резбата и уравновесяват радиалните сили, действащи в режещите гребени.

4.3. Заключение за четвърта част

1. Чрез проследяване последователната работа на режещите зъби на плашката поотделно и по режещи гребени и пресмятане на сеченията на срязвания слой, е доказано неравномерното им участие в процеса на формиране на резбата, водещо до динамичното им неравновесие при работа и отразяващо се върху качеството на нарязваната резба.

2. Подробният анализ на диаграмите на изменение на общия момент M_C , води до извода, че при класическите кръгли плашки и при новите режещо-деформиращи плашки се преминава през пет характерни етапа на работа в съответствие с работата на отделните елементи на инстументите, като развитието на момента при двата вида плашки е идентично, но характерът на съпротивлението е различен. Този извод е от особена важност за правилното организиране на експерименталните изследвания на новите плашки.

3. Установено е, че благодарение на целите деформиращи навивки на комбинираната плашка при нейното движение по резбата, се поемат и уравновесяват радиалните сили, действащи в режещите гребени.

5. Експериментални изследвания

5.1. Методика и условия на експерименталните изследвания

5.1.1. Методика за определяне на въртящия момент

а) Компоненти на въртящия момент

Общият съпротивителен момент при нарязване на триъгълни резби с кръгли плашки *M*_C може да се представи като сума от два момента [17]:

$$M_C = M_{pexc} + M_{\kappa a \pi}, \tag{5.1}$$

където M_{pexc} е съпротивителният момент, създаван от режещата част,

*М*_{кал} - моментът от калиброващата част.

В специализираната литература по рязане на материалите [48] за определяне на M_C се предлагат експериментално получени степенни зависимости, които освен опитната константа C_M включват диаметъра на резбата D, стъпката P и поправъчен коефициент за вида на обработвания материал K_M . Тези зависимости не отчитат влиянието и на други важни фактори. Препоръчвани са за метчици, плашки и резбонарезни глави и това поставя под съмнение тяхната точност, тъй като в условията на рязане на тези три вида инструменти има съществени различия. По същата причина те не могат да се ползват за кръгли комбинирани (режещо-деформиращи) плашки.

Моментът на рязане от режещата част на плашката M_{pexc} се формира основно от съпротивлението за изрязване на материала между навивките на резбата от главните режещи ръбове. Към него се прибавя съпротивлението на рязане на страничните ръбове (условно приети за спомагателни режещи ръбове) на режещите зъби, които заглаждат неравностите по профила, а също така и от триенето по задните странични незатиловани повърхнини на режещите зъби. Тези две съставящи части на M_{pexc} се дължат на начина на работа на режещите зъби и на конструкцията на инструмента, не могат да бъдат разделени и затова при експерименталните изследвания се отчитат съвместно.

Моментът $M_{\kappa a \pi}$ се получава от триенето на деформиращите навивки и от последните два – три зъба на гребените, които имат режещи ръбове с цял профил на резбата и които по принцип не участват в изрязване на сечението. Ако плашката е двустранна, се включват със страничните си повърхнини и режещите зъби от обратната страна. Приносът на всеки един от тези три участъка от калиброващата част в общия съпротивителен момент може да бъде определен относително точно по опитен път.

Изследванията показват, че обикновено моментът $M_{\kappa an}$ е значително по-малък от M_{pexc} . Неговото участие в общия съпротивителен момент може за удобство да се представи с опитен допълващ коефициент K_M , който зависи преди всичко от физико-механичните качества на обработвания материал:

$$M_C = K_M M_{pexe}, Nm \tag{5.2}$$

Моментът в режещата част $M_{peж}$, може да се определи по два начина. При първият начин (фиг. 5.1, а) се използва равнодействащата на силите на рязане F_c , N, приложена към радиуса на центъра на тежестта $R_{\mu m}$ на сумарното сечение, изрязвано от всички зъби, mm:

$$M_{pexc} = \frac{F_c R_{um}}{1000}, Nm$$
(5.3)

При вторият начин (фиг. 5.1, б) се работи със сумата от произведенията на силите за изрязване на елементарните сечения от отделните режещи зъби f_{zi} и съответните центри на тежестта r_{umi} :





- а) чрез сумарното сечение f
- б) чрез елементарните сечения f_{zi}

Проверката показва, че резултатите, получени по двата начина се различават незначително. Затова в работата е предпочетен първият, който е много по-опростен, особено, ако вместо радиусът на центъра на тежестта на сечението $R_{\mu m}$ се използва номиналният диаметър на резбата d:

$$M_{pexc} = \frac{F_c d}{2000}, Nm$$
(5.5)



Фиг. 5.2 Схема за определяне на сумарното сечение на срязвания слой при нарязване на триъгълни метрични резби с кръгли плашки

При използване на равнодействащата на силите на рязане, действащи по предните повърхнини на режещите зъби, F_c , N, участват сумарните сечения на срязвания слой f, mm^2 и специфичната сила на рязане k_c , N/mm^2 :

$$F_c = k_c f , N \tag{5.6}$$

Сумарното сечение f зависи от стъпката на резбата P и нейните диаметри външен d и вътрешен d_1 . Схемата, по която се определя номиналната му стойност е показана на фиг. 5.2 [35]. След изчисляване на площта на трапеца ABCD се получава зависимостта на f от стъпката на резбата P при номинални стойности на d и d_1 :

$$f = 0,32475.k_c^{2}, mm^{2}.$$
 (5.7)

Зависимости (5.7), (5.6), (5.5) и (5.2) се решават съвместно, за да се получи осончателното уравнение за пресмятане на общия съпротивителен момент M_C при нарязване на триъгълна метрична резба:

$$M_{C} = \frac{K_{M} \cdot P^{2} \cdot d \cdot k_{c}}{5755}, Nm$$
(5.8)

Експерименталното определяне на общия съпротивителен момент M_C и на зависимостта му от определени променливи фактори е реализирано чрез динамометриране при различни предварително определени условия на работа.

б) Методика на планирания експеримент

За определяне на влиянието на параметрите на плашката - брой гребени z, установъчен ъгъл κ_r и преден ъгъл γ_p върху специфичната сила на рязане k_c , по метода
на статистическото планиране е проведен трифакторен експеримент от вида 2^3 [27]. На заготовки от алуминиева сплав Д16Т е нарязвана резба с девет вида режещодеформиращи плашки M32x1,5, изработени с различни параметри. От диаграмата на съпротивителния момент в режещата част M_{pexc} е определена специфичната сила. В таблица 5.2 е представена матрицата на планиране. Основното ниво на изследваните фактори е избрано да бъде максимално близко до стойностите, използвани в практиката, а интервалите на вариране са съобразени с реалните граници на изменението им и с някои технологични ограничения при изработването на инструментите – таблица 5.1. За всяка точка от плана е използван отделен инструмент, като са извършвани най-малко по три повторения, при спазване на правилото за рандомизация на опитите и отсейване на големите отклонения на резултатите.

| Нива на | ение) | | |
|-----------|--------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| факторите | Z, бр. (х ₁) | $\kappa_r^{o}, (x_2)$ | γ_p^{o} , (x ₃) |
| Горно | 8, (+1) | 30°, (+1) | 20°, (+1) |
| Основно | 6, (0) | 20°, (0) | 10°, (0) |
| Долно | 4, (-1) | 16°, (-1) | 0°, (-1) |

Таблица 5.1. Нива на факторите и интервали на вариране

Таблица 5.2. Матрица на планиране за определяне на зависимостта на специфичната сила k_c от параметрите на плашката z, κ_r и γ_p .

| Mana | Фактори | | | | | | | | |
|--------|---------|--------------------|-----------------|---------|--------------------|-----|--|--|--|
| JN⊻ Ha | Z, (| (\mathbf{x}_{l}) | K _{r,} | (x_2) | $\gamma_{p,}(x_3)$ | | | | |
| onuma | Броя | Код | Градуси | Код | Градуси | Код | | | |
| 1 | 4 | -1 | 16 | -1 | 0 | -1 | | | |
| 2 | 8 | +1 | 16 | -1 | 0 | -1 | | | |
| 3 | 4 | -1 | 30 | +1 | 0 | -1 | | | |
| 4 | 8 | +1 | 30 | +1 | 0 | -1 | | | |
| 5 | 4 | -1 | 16 | -1 | 20 | +1 | | | |
| 6 | 8 | +1 | 16 | -1 | 20 | +1 | | | |
| 7 | 4 | -1 | 30 | +1 | 20 | +1 | | | |
| 8 | 8 | +1 | 30 | +1 | 20 | +1 | | | |
| 9 | 6 | 0 | 20 | 0 | 10 | 0 | | | |

Прието е, че математичния модел на пълната зависимост на специфичната сила от трите фактора може да се представи като непълна кубична функция:

$$k_c = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$
(5.9)

Поради ортогоналността на матрицата на планиране, за произволен брой фактори, коефициентите b_i се пресмятат по зависимостта:

$$b_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{N} x_{in} \overline{y}_{n}}{N},$$
(5.10)

където i = 0, 1, 2, 3... – номер на фактора; N – брой опити; $\overline{y_n}$ - средна стойност на отклика в точка от плана с номер n.

В основата на регресионния анализ на резултатите стоят следните предпоставки [13, 27, 33]:

- резултатите от опитите *y*₁, *y*₂, *y*₃, ...,*y*_n в *n* точки на факторното пространство са независими и нормално разпределени случайни величини;

- дисперсиите (разсейването на резултатите) в различните точки от плана са еднакви;

- измерените стойности на факторите не са случайни величини, т.е. грешките при тяхното измерване са пренебрежимо малки спрямо дисперсиите им на възпроизводимост.

За определяне на дисперсията на възпроизводимост е използвана зависимостта:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \left(y_{ik} - \overline{y_i} \right)^2$$
(5.11)

При условие, че се разполага с голям брой наблюдения от предварително проведени опити при същите условия, с много малки разсейвания на резултатите, които дават основание да се твърди, че дисперсиите на отделните опити са еднородни, за дисперсията на възпроизводимост е прието да се вземат предвид резултатите за централната точка от плана (основно ниво):

$$S_9^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \left(y_{ik} - \overline{y_i} \right)^2$$
(5.12)

Проверката за значимост на коефициентите на модела е направена чрез използването на t-критерия на Стюдънт. Дисперсията на коефициента на регресия се намира по зависимостта:

$$S^{2} \{b_{i}\} = \frac{S^{2} \{y\}}{N_{9}m}.$$
(5.13)

Стойностите на t-критерия на Стюдънт се пресмятат по зависимостта:

$$t_i = \frac{b_i}{S\{b_i\}}.$$
(5.14)

Критичната стойност на критерия се определя таблично при m - 1 = 2 степени на свобода и при ниво на значимост $\alpha = 5\%$: *tкp*. = 4,302 [33]. Ако изчислените стойности на t-критерия от t_0 до t_3 са по-големи от критичните, значи, че съответните коефициенти на модела b_0 , b_1 , b_2 , b_3 са значими, а останалите коефициенти - b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123} не

издържат на проверката за значимост поради по-малките изчислени стойности на критерия от критичната и могат да отпаднат от математичния модел.

Проверката за адекватност на модела изисква да се намерят стойностите на дисперсията на показателя У спрямо неговата обща средноаритметична стойност:

$$S_Y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left(y_j - \overline{Y} \right)^2 , \qquad (5.15)$$

и на остатъчната дисперсия:

$$S_{ocm}^{2} = \frac{1}{N - m'} \sum_{j=1}^{N} (y_{j} - \hat{y}_{j})^{2} .$$
(5.16)

С изчислените стойности за S_Y^2 и S_{oct}^2 се определя изчислената стойност на критерия на Фишер:

$$F_0 = \frac{S_Y^2}{S_{ocm}^2} .$$
 (5.17)

При ниво на значимост 0,05 и степени на свобода:

$$k_1 = N - 1 = 7$$
,
 $k_2 = N - m' = 4$,

се определя таблична стойност на $F_{0m} = 21,62$ [33]. Ако $F_{0m} > F_0$, хипотезата за адекватност на регресионния модел се приема, а в противен случай моделът не е адекватен на същността на изследваните процеси. След преобразуване на кодираните фактори x_1 , x_2 и x_3 и преработване се получава крайният вид на математичния модел в натурален вид.

в) Определяне на специфичната сила на рязане k_c

Специфичната сила на рязане k_c зависи от следните фактори:

- материал и физикомеханични характеристики на заготовката якост, твърдост, пластичност, коефициент на триене;
- конструктивни и геометрични параметри на режещата част на плашката брой на режещите гребени *z*, главен установъчен ъгъл κ_r, преден ъгъл γ_p и ъгъл на радиално затиловане по задните повърхнини на върховите режещи ръбове α_p;
- скорост на рязане v_c ;
- големина на износването V_{B} ;
- вид на мажещо-охлаждащата течност (MOT).

Влиянието на всеки от факторите може да бъде представено чрез поправъчен коефициент, включен в опитната зависимост:

$$k_c = k_{c\,e\kappa cn}.K_{HB}.K_z.K_{\kappa_r}.K_{\gamma}.K_{\alpha}.K_V.K_{h_{\alpha}}.K_{MOT}, N/mm^2, \qquad (5.18)$$

където $k_{ceкcn}$ е изчислената по зависимост (5.8) специфична сила, компонент на експериментално установения за конкретни условия въртящ момент M_C .

Както е установено в Глави 3 и 4, специфичната сила k_c всъщност не се получава само от съпротивлението при рязане. Към нейната стойност като неделима компонента се включва и триенето по предната и задните незатиловани повърхнини на режещата част на инструмента. Заради невъзможността за отделното отчитане на тези компоненти при експерименталните изследвания, се въвежда понятието условна специфична сила k_{cyc} .

г) Определяне на момента от триене на калиброващо-деформиращата част

Силата на триене, създаваща $M_{KAЛ}$ зависи от два компонента – притискаща сила и специфичен за различните двоици материали коефициент на триене μ . На практика за големината на μ , освен характера на връзките между триещите се материали, определящ е и техният брой, т.е. – реалната контактна площ. Контактната площ, при еднакви параметри на нарязваните резби е еднаква за всички поотделно взети цели навивки на даден типоразмер плашка и се променя в съответствие с диаметрите на нарязваните резби. Притискащата сила от своя страна зависи от еластичното възстановяване на формираната резбова повърхнина и от така създаваната стегнатост в резбовото съединение между заготовката и целите навивки на инструмента. Тя е ориентирана нормално на винтовите повърхнини на резбата.

За разглежданите случаи на експериментални изследвания, може да се предположи, че в съответствие с излизането на целите навивки от контакт със заготовката, ще се наблюдава пропорционално намаляване на $M_{KA,T}$, поради съответното намаляване на контактната площ. При различен брой цели навивки на плашката, би следвало да има съответното пропорционално преразпределяне на $M_{KA,T}$ за всяка от тях. При увеличаване на броя на целите навивки на плашката, ще се наблюдава и съответно нарастване на $M_{KA,T}$ поради увеличената контактна повърхност и обратно. От тази гледна точка, за намаляване на триенето, съответно и на $M_{KA,T}$, е нужно броят на целите навивки на плашките да бъде сведен до минимум.

В зависимост от физико-механичните характеристики на обработваните материали са характерни различни механизми за възникването и за големините на

еластичното възстановяване на обработената повърхнина. Общоприето е схващането, че при крехките материали то е минимално, а с увеличаване на комплекса от показатели твърдост, σ_B и σ_S , съответно нараства. В специализираната литература [3,10,29] липсва единно мнение за големината на еластичното възстановяване и според различните източници варира в широк диапазон – от 3 µm до 70 µm, стойности получавани предимно чрез теоретични пресмятания за условията на различни хипотези.

5.1.2. Условия на експерименталните изследвания

а) Изследвани инструменти

Изследвани са опитни образци режещо-деформиращи кръгли плашки, изработени в Завод за резбонарезни инструменти – Габрово, с размери M16x1,5, M20x1,5, M24x3, M25x1,5 и M32x1,5. Основните размери и геометрични параметри на изследваните плашки, определени по разработена методика, са показани на фиг. 5.3 и таблица 5.3,

| N⁰ | Резба | D f10 | L Js12 | Lr | b | z | K° | γ° | с | F | Ø d H11 | h | Ø D p 6g | P | Dz | Lk |
|----|------------|-----------------|------------------|------|----|----|----|----|-------|-----|-------------------|-----|--------------------|-----|------|------|
| 1 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 4,26 | 8 | 4 | 16 | 0 | 14,53 | 3,0 | 29,66 | 6 | 32 | 1,5 | 48,9 | 4,13 |
| 2 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 4,26 | 8 | 8 | 16 | 0 | 8,16 | 3,0 | 29,66 | 6 | 32 | 1,5 | 48,9 | 4,13 |
| 3 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 2,11 | 8 | 4 | 30 | 0 | 14,53 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 53,2 | 4,13 |
| 4 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 2,11 | 8 | 8 | 30 | 0 | 8,16 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 53,2 | 4,13 |
| 5 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 3,35 | 8 | 6 | 20 | 0 | 11,09 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 50,7 | 4,13 |
| 6 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 4,26 | 8 | 4 | 16 | 10 | 12,25 | 3,0 | 29,66 | 6 | 32 | 1,5 | 48,9 | 4,13 |
| 7 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 4,26 | 8 | 8 | 16 | 10 | 7,61 | 3,0 | 29,66 | 6 | 32 | 1,5 | 48,9 | 4,13 |
| 8 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 2,11 | 8 | 4 | 30 | 10 | 12,25 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 53,2 | 4,13 |
| 9 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 2,11 | 8 | 8 | 30 | 10 | 7,61 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 53,2 | 4,13 |
| 10 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 3,35 | 8 | 6 | 20 | 10 | 10,06 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 50,7 | 4,13 |
| 11 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 4,26 | 8 | 4 | 16 | 20 | 9,60 | 3,0 | 29,66 | 6 | 32 | 1,5 | 48,9 | 4,13 |
| 12 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 4,26 | 8 | 8 | 16 | 20 | 6,83 | 3,0 | 29,66 | 6 | 32 | 1,5 | 48,9 | 4,13 |
| 13 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 2,11 | 8 | 4 | 30 | 20 | 9,60 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 53,2 | 4,13 |
| 14 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 2,11 | 8 | 8 | 30 | 20 | 6,83 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 53,2 | 4,13 |
| 15 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 3,35 | 8 | 6 | 20 | 20 | 8,72 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 50,7 | 4,13 |
| 16 | M16x1,5 6g | 45 | 14 | 2,62 | 4 | 5 | 25 | 10 | 4,70 | 2,5 | 13,48 | 4,5 | 16 | 1,5 | 25 | 5,63 |
| 17 | M20x1,5 6g | 45 | 14 | 2,62 | 5 | 5 | 25 | 22 | 5,16 | 3,0 | 17,55 | 4,5 | 20 | 1,5 | 29,1 | 5,63 |
| 18 | M25x1,5 6g | 55 | 16 | 2,87 | 6 | 6 | 23 | 22 | 6,17 | 3,0 | 22,65 | 4,5 | 25 | 1,5 | 38,2 | 5,38 |
| 19 | M32x1,5 6g | 65 | 18 | 2,87 | 8 | 7 | 23 | 22 | 7,52 | 3,0 | 29,66 | 4,5 | 32 | 1,5 | 49,2 | 5,38 |
| 20 | M40x1,5 6g | 75 | 20 | 3,35 | 10 | 7 | 20 | 22 | 9,78 | 3,3 | 37,66 | 4,5 | 40 | 1,5 | 61,2 | 4,90 |
| 21 | M50x1,5 6g | 90 | 22 | 3,35 | 11 | 8 | 20 | 22 | 11,40 | 3,5 | 47,55 | 4,5 | 50 | 1,5 | 75,1 | 4,90 |
| 22 | M63x1,5 6g | 106 | 24 | 3,35 | 12 | 10 | 20 | 22 | 12,21 | 3,8 | 60,80 | 4,5 | 63 | 1,5 | 92,3 | 4,90 |

| T (| | 0 | | | | | | > | |
|----------|----|------------|--------|-------------|----------|---------|--------|---------------|---------|
| Таблица | うく | ()сновните | nazmen | и и геомет | ทบนนบ ทก | паметпи | เ นก น | зспедеаните | ทกสมมหม |
| raonnya. | | Ochoonante | pasmep | a a ccoment | pn mn ma | pamempn | inan | Jesicobananie | manni |

в която използваните означения са следните:

- *D, mm* външен диаметър на плашката
- *L, тт* Широчина на плашката
- *Lr, mm* дължина на режещата част

| b, mm | - | широчина на стружковия канал (при правоъгълен профил) |
|----------------|---|---|
| Z | - | брой режещи зъби |
| κ_r , ° | - | главен установъчен ъгъл на режещата част |
| γ, ° | - | преден ъгъл |
| c, mm | - | широчина на стружковия канал при резбата |
| F, mm | - | широчина (дебелина) на зъба при режещата част |
| d, mm | - | вътрешен диаметър на резбата |
| h, mm | - | дълбочина на стружковия канал |
| Dp, mm | - | външен диаметър на резбата |
| P, mm | - | стъпка на резбата |
| Dz, mm | - | най-голям диаметър на освобождаващия конус |
| Lk, mm | - | дължина на деформиращата част |

б) Металорежеща машина и измервателни инструменти

Всички експериментални изследвания са проведени на универсален струг С11МВ. Динамометърът за измерване на въртящия момент е установен на задното седло на струга, а заготовката е закрепвана в универсален тричелюстен патронник. За предварителна подготовка на повърхнините на заготовката са използвани обстъргващи, прорязващи и отрязващи стругарски ножове с подходящите геометрични параметри. Всички повърхнини, подготвяни за изследването са измервани с шублер и микрометър с точност до 0,01 mm.

в) Динамометрична уредба

За измерване на въртящия момент е използван динамометър с еластични звена Д35, конструиран и изработен в Лабораторията по режещи инструменти на РУ.



Фиг.5.4. Динамометър за измерване на въртящ момент Д35 1 – втулка за закрепване на плашка; 2 – подвижна плоча; 3 – неподвижна плоча; 4 – еластични звена; 5 – опашка МК4; 6 – индуктивен датчик IWT102; 7 – тарировъчно рамо.







- 115 -

Динамометърът (фиг 5.4) е с диапазон на измерване 0 – 35 Nm и чувствителност 0,01 Nm. Приложеният от плашката центричен въртящ момент предизвиква пропорционално микропреместване – завъртане на подвижната плоча 2 спрямо неподвижната 3, чиято стойност се регистрира от индуктивен датчик за микропреместване *IWT102*. Датчикът е с параметри: носеща честота 5 kH и най-малко измервано преместване 0,15 μ m. Сигналът на датчика се обработва от аналогов усилвател N2301 (фиг. 5.5). Към усилвателя е включено двукоординатно записващо устройство Endim 662.01, настроено за работа със скорост на преместване 2 s/sm по ос *X*.



Фиг.5.5. Схема на динамометрична уредба за измерване на вътящ момент

За подтискане на колебанията с висока амплитуда, които силно затрудняват точното отчитане на измерваните стойности на въртящия момент, след усилвателя N2301 е включен съгласуващ нискочестотен "Г" – образен R-С филтър (фиг. 5.6). При работа с ниски скорости на рязане, колебанията с честота f = 1Hz - 2Hz се потискат с R-С филтъра, в който капацитета се избира със стандартна стойност в определен диапазон (декада), а съгласуващото съпротивление се пресмята по зависимостта [49, 75]



Фиг.5.6. Схема на динамометрична уредба за измерване на въртящ момент със съгласуващ нископропускащ филтър

В съответствие със стойностите от табл. 5.4, за провеждане на експерименталните изследвания е избран филтър със съпротивление 24 kΩ и кондензатор 4,7 µF, работещ

при средна честота 1,5 Hz. На фиг.5.6 е показана принципната схема на динамометричната уредба, а на фиг.5.7 записи на измерения въртящ момент при еднакви условия на работа без съгласуващ филтър – крива 1 и със съгласуващ филтър – крива 2.

| зависимост от честотата Ј, Нг | | | | | |
|--|-------|--|--|--|--|
| $C = 4.7 \mu F$ | | | | | |
| Честота <i>f</i> , <i>Hz</i> Необходимо съпротивление R, k | | | | | |
| 1 Hz | 33 kΩ | | | | |
| 1,5 Hz | 24 kΩ | | | | |
| 2 Hz | 16 kΩ | | | | |

Таблица 5.4. Пресметнато съпротивление R на съгласуващ филтър в зависимост от честотата f, Hz

Динамометричната уредба е тарирана преди всеки цикъл експерименти с помощта на тарировъчно рамо с дължина 500 mm, на което последователно се окачват тежести - табл. 5.5 и се отчита съответното показание по оста Y на записващото устройство.

| Таблиц | a 5.5. | Тарировъ | чни стойнос | ти на това | ра и вър | ртящия момент |
|--------|--------|----------|-------------|------------|----------|---------------|
| , | | 1 1 | | | | , |

| | Тое | ap | Рамо | Деления | Върт. мог | мент, Nm | |
|-----------|---------|-----------|-------|---------|-----------|----------|--------|
| Единичен, | Obu ka | Единичен, | Общ, | m | на инд. | | 05110 |
| kg | ООЩ, кд | Ν | Ν | 111 | часовник | един. | оощо |
| 1,525 | 1,525 | 15,25 | 15,25 | 0,48 | 10,5 | 5,4 | 5,400 |
| 0,487 | 2,012 | 4,87 | 20,12 | 0,5 | 14 | 2,435 | 7,835 |
| 1,435 | 3,447 | 14,35 | 34,47 | 0,5 | 31 | 7,175 | 15,010 |
| 1,045 | 4,492 | 10,45 | 44,92 | 0,5 | 42,5 | 5,225 | 20,235 |
| 0,760 | 5,252 | 7,60 | 52,52 | 0,5 | 51 | 3,8 | 24,035 |







Фиг.5.8. Записи от експериментални измервания на въртящ момент с динамометричната уредба

По данните от таблицата е построен тарировъчен график, показан на фиг. 5.9.



Фиг. 5.9. Тарировъчен график за настройване на динамометричната уредба.





Фиг.5.10. Моменти от провеждане на експериментални изследвания с динамометричната уредба

г) Заготовки и материал на заготовките

При експерименталните изследвания са нарязвани резби на заготовки от конструкционна стомана 40Х, въглеродна инструментална стомана У10, неръждясваща стомана 12Х18Н9Т, алуминиева сплав Д16, алуминиева сплав 5086Н26, бронзов и месингов прокат. Основните им характеристики якост на опън R_m , твърдост по Бринел и относително удължаване A_5 са представени в табл.5.6. Алуминиевата сплав 5086Н26 има най-малка твърдост от всички използвани материали. Тя се използва за изработване на електрозаварени алуминиеви тръби чрез огъване на ленти с дебелина от 1,25 до 2,5 mm в ненагрято състояние и има малка жилавост.

Независимо дали заготовките са прокат или тръби, преди всеки опит чрез обстъргване са подготвяни така, че да се оформи водеща шийка с диаметър d_{6} , равен на вътрешния диаметър на нарязваната резба (фиг. 5.11).

| Материал | R _m , MPa | HB | A5, % |
|--|----------------------|---------|-------|
| Стомана У10А ГОСТ 1435-74 | 590 | 180 | 28 |
| Стомана X18Н9Т БДС 1799-74 | 620 | 140-170 | 38 |
| Стомана 40Х БДС 6354-74 | 800-930 | 217 | 12 |
| <i>Бронз</i> БрОФ6,5-0,4 ГОСТ5017-74 | 295-372 | 93 | 45-50 |
| <i>Месинг</i> CuZn39Pb2 БДС 2086-71 | 441 - 490 | 85-95 | 15 |
| Алуминиева сплав Д16 ГОСТ4784-74 | 450 | 107 | 17 |
| Алуминиева сплав 5086H26 | 257 | 72 | 22 |

Таблица 5.6. Механични характеристики на изследваните материали

Преходът между водещата шийка и следващата я обработвана повърхнина е формиран по два начина – без входяща фаска (фиг.5.11 а) или с входяща фаска под ъгъл равен на установъчния ъгъл на плашката (фиг.5.11 б). Дължината на нарязваната повърхнина L, е определяна така, че да бъде с 3 – 4 навивки по-голяма от общата работна широчина на изследвания инструмент. С цел запазване на направлението на оста на нарязваната резба, след нея е формирана изходяща шийка, чийто диаметър d_u е с 0,1 mm по-малък от този на водещата входяща повърхнина.



Фиг.5.11. Конфигурация на заготовките за провеждане на експериментите – без и със входяща фаска

д) Измервания

Малките разлики във формата на изследваните заготовки предоставят възможност за получаване на важна информация за механизма на нарастване на M_B и за диференцирането му на отделни съставящи, съгласно анализа в т. 4.2, както следва:

• при експериментите, провеждани на заготовки без входяща фаска, от началния момент на контакт по окръжност с инструмента, се отчита постепенното нарастване на сечението на срязвания слой и пропорционалното нарастване на M_B , формиран само от Mpew, до следващ момент, в който инструментът е навлязъл на разстояние Lpew, колкото е дължината на режещата му част. Подходящо настроената скорост на преместване по ос X на записващият уред – 2 s/sm и точно определената ниска честота на въртене на заготовката – 22,5 min⁻¹, позволяват във всеки момент от формирането на резбата, да се определи участието в работата на съответния елемент на плашката и приносът му за формиране на въртящия момент. Резкият преход на нарязваната повърхнина в изходяща шийка, от своя страна дава възможност за точното определяне на момента на излизане на режещата част от работа (границата между четвърти и пети участъци – т.4.2.) и измерването само на момента от триене M_{KAT} на калиброващите цели навивки като цяло и на всяка навивка поотделно.

• в случаите, когато между входящата шийка и нарязваната повърхнина е формирана преходна фаска с ъгъл, равен на установъчния ъгъл на режещата част на плашката, в рамките на един оборот на заготовката се наблюдава набирането на пълното сечение на срязвания слой поради едновременното навлизане в работа на всички режещи ръбове на инструмента. Останалите етапи от формирането на въртящия момент не се различават от работата без фаска.

е) Мазане и охлаждане

Експерименталните изследвания са провеждани без използването на мазане и охлаждане, т.е. в условията на сухо триене. Въпросите, касаещи влиянието на различните мажещо-охлаждащи вещества върху процесите на рязане са подробно изяснени в специализираната литература [10,13,26,31]. Същото е в сила и за работата на винтова двоица в условията на полусухо и течно триене. Следователно за режещата и калиброващо-деформиращата части на плашките са в сила изяснените и общоприети в специализираната литература условия и препоръки за прилагане на мажещи и охлаждащи вещества. Препоръчва се големината на поправъчния коефициент K_{MOT} за влиянието МОТ в зависимост от условията на работа и от вида на използваните мажещи вещества при обработване на стомани да бъде в границите 0,97 – 0,75.

5.2. Резултати от експерименталните изследвания

5.2.1. Определяне на специфичната сила $k_{c_{wc}}$ и на коефициента K_M

За определяне на коефициента K_M , специфичната сила $k_{c_{yc}}$ и поправъчните коефициенти са проведени подробни изследвания на съпротивителния момент.

По записите на диаграмите на изменение на съпротивителния момент са определени някои от параметрите в зависимости (5.8) и (5.9).

На фиг. 5.10, 5.11 и 5.12 са показани някои от диаграмите на изменение на съпротивителния момент M_C , при нарязване на триъгълни резби M16x1,5 и M25x1,5 с комбинирани плашки върху заготовки от седемте вида материали. Определените максимални стойности на M_{pexe} , M_C , условната специфична сила на рязане k_{cyc} и коефициентът K_M са представени в табл. 5.7.

Резултатите от експеримента показват че, специфичната сила на рязане при резбонарязване е най-голяма при неръждясваща стомана 12Х18Н9Т. Най-малка е при алуминиева сплав 5086Н26, която има и най-малка твърдост от всички използвани материали.

При алуминиевите сплави, калиброващата част на плашката добавя минимален съпротивителен момент – до 10% (т.5.2.2. б). Това може да се обясни с незначително еластично възстановяване на обработената повърхнина след контакт с режещия клин на инструмента, с минимално съпротивление на повърхностния слой срещу деформиране и с малки стойности на коефициента на триене.

При стоманите, съпротивителният момент в калиброващата част е от 10 до 30%. Прави впечатление значително по-голямата специфична сила при стомана У10 в сравнение със стомана 40Х.

Таблица 5.7.

Максимални стойности на съпротивителните моменти M_{pex} и M_C , условната специфична сила $k_{c_{yc}}$ и коефициента K_M при нарязване на метрична резба с комбинирани плашки

| qəd ou _ö N | Обработван материал | Твърдост НВ | Размери на резбата, тт | Съпр. момент от режещата част М _{реж} | Сумарно сечение f, mm² | Усповна специфична сила к _{сус} N/тт ² | Общ съпротивите лен момент М _С , Nm | Коефициент К _М |
|-----------------------|------------------------|-------------|---------------------------|--|---------------------------|---|---|------------------------------|
| 1 | Стомана 40Х | 200 | M16x1,5 | 16,56 | 0,60 | 3505 | 21,50 | 1,30 |
| 2 | Стомана У10 | 180 | M16x1,5 | 25,10 | 0,63 | 5043 | 28,50 | 1,14 |
| 3 | Стомана 12X18Н9Т | 170 | M16x1,5 | 23,05 | 0,57 | 5151 | 25,65 | 1,11 |
| 4 | Бронз БрФ6,5- 0,4 | 93 | M16x1,5 | 16,70 | 0,63 | 3365 | 30,20 | 1,81 |
| 5 | Месинг | 88 | M16x1,5 | 8,63 | 0,63 | 1734 | 12,50 | 1,45 |
| 6 | Ал. сплав Д16Т | 107 | M25x1,5 | 19,20 | 0,74 | 2076 | 20,60 | 1,08 |
| 7 | Ал. сплав 5086H26 | 72 | M25x1,5 | 9,63 | 0,63 | 1156 | 10,60 | 1,10 |



Фиг. 5.10 Диаграми на изменение на съпротивителния момент M_C при нарязване на метрична резба M16x1,5 на стоманени заготовки с комбинирани плашки: a) – стомана X18H9T, б) - стомана 40Х, в) - стомана У10.



Фиг. 5.11 Диаграми на изменение на съпротивителния момент M_C при нарязване на метрична резба M16x1,5 на заготовки от медни сплави с комбинирани плашки: а) – бронз БрФ6,5-0,4, б) - месинг.



Фиг. 5.12 Диаграми на изменение на съпротивителния момент M_C при нарязване на метрична резба M25x1,5 на заготовки от алуминиеви сплави с комбинирани плашки: а) – сплав 5086H26, б) – сплав Д16Т.

При медните сплави е нужно да се отбележи, че специфичната сила за бронза е почти два пъти по-голяма от тази при месинга, а също така и големият относителен дял на момента от калиброващата част на плашката, по-конкретно от целите деформиращи

навивки – от 40 до 85%. Обяснение за първото може да се търси в по-голямата твърдост на бронза, а за второто с подчертано по-голямата му еластичност.

Потвърждава се хипотезата, че материалите с по-голяма пластичност, имащи съответното увеличаващо се еластично възстановяване (неръждясваща стомана, бронз и месинг), формират и по-голямо триене в калиброващите навивки поради нарастващата стегнатост с обработените повърхнини.

Нужно е да се отбележи също така, че стойностите, посочени в табл. 5.7, са валидни само за условията, при които са провеждани експериментите. Зависимост (5.9) отчита влиянието на почти всички фактори, от които зависи конкретната стойност на k_c , но в действителност някои от тях се променят в съвсем тесни граници, поради което следва да отпаднат поправъчните им коефициенти. Такива са задният ъгъл α_p , чиято стойност е около 8° за всички изследвани инструменти и скоростта на рязане v_c , която при работа с плашки е в границите от 0,5 до 3 m/min.

Твърдостта на обработвания материал като фактор, от който зависи специфичната сила, не може да се разглежда и оценява изолирано от другите му характеристики – химичен състав, структура, пластичност, жилавост якостни показатели. Затова не е възможно за различните материали да се препоръчват единни стойности за K_{HB} . С конкретизирането на специфичната сила k_c до голяма степен отпада необходимостта от въвеждането на такъв коефициент, например за цветните сплави. При стоманите, обаче, използването на K_{HB} е необходимо, тъй като дори и да не са термообработени, твърдостта им се променя в сравнително широк диапазон – *HB 150 – 250*. За тази група могат да се ползват резултати от други източници [22], представени в табл. 5.8.

Таблица 5.8. Стойности на поправъчния коефициент К_{НВ}, отчитащ влиянието на твърдостта на стоманите върху специфичната сила [4]

| Твърдост НВ | 140 - 170 | 170 - 200 | 200 - 230 | 230 - 260 | 260 - 290 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Коефициент К _{нВ} | 0,91 | 0,96 | 1 | 1,04 | 1,08 |

Следва да се отбележи, че нарязването на резби на заготовки с твърдост *HB*>250 не е желателно, тъй като, режещата част на плашката много бързо се амортизира.

Тъй като при работа с комбинираните режещо-деформиращи плашки дебелината на срязвания слой е от същия порядък, както при класическите – a = 0,1 *до* 0,25 mm. Тъй като условията на работа са идентични, то и износването протича при едни и същи условия и се развива както по задните, така и по предните повърхнини на инструмента. По-големите стойности на предните ъгли γ_p при комбинираните плашки, водят до преобладаващо износване по задните повърхнини, което повече кореспондира с

характера на износването при метчиците [21, 36]. Прието е като критерий за допустимо износване h_{α} да се отчитат площадките, образувани по задните повърхнини на последните режещи и на първите калиброващи (с цял профил) зъби [10, 21]. Целите деформиращи навивки на комбинираните плашки също се износват в процеса на работа, като наблюдаваното при тях износване се изразява в заглаждане на повърхнините и протича със значително по-бавни темпове спрямо режещите зъби. Установено е, че с нарастване на износването, поради промяната на профила и размерите на срязвания слой и поради нарастването на триенето по износените участъци, се увеличава съпротивителния момент като цяло. За количествено изразяване на връзката между износването и съпротивителния момент, респ. специфичната сила, е удачно да бъде установен силов или технологичен критерий и да бъде проведено допълнително изследване. За целите на настоящата работа, точността на препоръките от специализираната литература [10, 21, 36] е достатъчна, което дава основание за комбинираните плашки да се приеме допустимо износване V_B в границите от 0,05D до 0,1D.

5.2.2. Определяне влиянието на параметрите на плашката брой гребени z, установъчен ъгъл к_r и преден ъгъл γ_p върху специфичната сила на рязане k_c

За определяне на влиянието на параметрите на плашката брой гребени z, установъчен ъгъл κ_r и преден ъгъл γ_p върху специфичната сила на рязане k_c , по метода на статистическото планиране е проведен трифакторен експеримент от вида 2³ [27]. В табл. 5.9. са дадени реалните и кодираните стойности на факторните нива, а в табл. 5.10 е представена матрицата на планиране и средните стойности на измерените резултати от проведените опити.

| Нива на | Фактори (кодирано означение) | | | | | | |
|-----------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|--|
| факторите | Z, бр. (х ₁) | $\kappa_r^{o}, (x_2)$ | $\gamma_p^{o}, (x_3)$ | | | | |
| Горно | 8, (+1) | 30°, (+1) | 20°, (+1) | | | | |
| Основно | 6, (0) | 20°, (0) | 10°, (0) | | | | |
| Долно | 4, (-1) | 16°, (-1) | 0°, (-1) | | | | |

Таблица 5.9. Нива на факторите и интервали на вариране

| | $\Lambda_r u$ | γ_p . | | | | | _ | |
|-------|----------------|--------------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|-------|--------------------------|
| № на | | | Резултати | | | | | |
| | $Z_{1}(x_{1})$ | | $\kappa_{r,}(x_2)$ | | $\gamma_{p,}(x_3)$ | | Мреж, | k_c , |
| onumu | Бр. | Код | Град. | Град. Код | | Град. Код | | <i>N/mm</i> ² |
| 1 | 4 | -1 | 16 | -1 | 0 | -1 | 28,70 | 2501 |
| 2 | 8 | +1 | 16 | -1 | 0 | -1 | 31,40 | 2736 |
| 3 | 4 | -1 | 30 | +1 | 0 | -1 | 25,40 | 2214 |
| 4 | 8 | +1 | 30 | +1 | 0 | -1 | 27,80 | 2423 |
| 5 | 4 | -1 | 16 | -1 | 20 | +1 | 22,60 | 1917 |
| 6 | 8 | +1 | 16 | -1 | 20 | +1 | 27,80 | 2353 |
| 7 | 4 | -1 | 30 | +1 | 20 | +1 | 17,04 | 1485 |
| 8 | 8 | +1 | 30 | +1 | 20 | +1 | 19,00 | 1678 |
| | | | | | | | 27,80 | 2427 |
| 9 | 6 | 0 | 20 | 0 | 10 | 0 | 26,70 | 2327 |
| | | | | | | | 27,50 | 2400 |

Таблица 5.10. Матрица на планиране и експериментални резултати за определяне на зависимостта на специфичната сила k_c от параметрите на плашката z,

След обработване на резултатите, за коефициентите на приетия модел (уравнение 5.9) се получава:

| $b_0 = 2001$ | $b_{12} = -34$ |
|-----------------------|-----------------|
| $b_1 = 134$ | $b_{13} = 23$ |
| b ₂ = -213 | $b_{23} = -63$ |
| $b_3 = -305$ | $b_{123} = -27$ |

При тези коефициенти, уравнението на регресия в кодиран вид добива вида:

$$k_c = 2001 + 134x_1 - 213x_2 - 305x_3 - 34x_1x_2 + 23x_1x_3 - 63x_2x_3 - 27x_1x_2x_3$$
(5.20)

При статистическата обработка за определяне на дисперсията на възпроизводимост се използват резултатите за централната точка от плана:

$$S_9^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{ik} - \overline{y_i})^2 = \frac{(2427 - 2385)^2 + (2327 - 2385)^2 + (2400 - 2385)^2}{2} = \frac{1764 + 3364 + 225}{2} = 2677.$$

Тогава за дисперсията се получава: $S_9 = 51.74$. (5.21)

Проверката за значимост на коефициентите на модела е направена чрез използването на t-критерия на Стюдънт. Дисперсията на коефициента на регресия се намира по зависимост 5.13 или:

$$S^{2}\{b_{i}\} = \frac{S^{2}\{y\}}{N_{9}m} = \frac{2677}{1.3} = 892, \text{ сл. } S\{b_{i}\} = \sqrt{892} = 29,87$$
(5.22)

Тогава определеният t-критерий за всеки фактор е:

| $t_0 = 2001/29,87 = 66,77$ | $t_{12} = -34/29,87 = 1,14$ |
|----------------------------|------------------------------|
| $t_1 = 134/29,87 = 4,48$ | $t_{13} = 23/29, 87 = 0,76$ |
| $t_2 = -213/29,87 = 7,13$ | $t_{23} = -63/29,87 = 2,11$ |
| $t_3 = -305/29.87 = 10.18$ | $t_{123} = -27/29.87 = 0.90$ |

Критичната стойност на критерия е определен таблично при (m - 1) = 2 степени на свобода и при ниво на значимост $\alpha = 5\%$ и има стойност tкр. = 4,302 [33]. Видно е, че изчислените стойности на t-критерия от t₀ до t₃ са по-големи от критичните, което означава, че коефициентите на модела b₀, b₁, b₂, b₃ са значими, а коефициентите - b₁₂, b₁₃, b₂₃, b₁₂₃ не издържат на проверката за значимост.

След отпадането на определените като незначими коефициенти от модела (5.20), той добива вида:

$$k_c = 2001 + 134x_1 - 213x_2 - 305x_3 \tag{5.23}$$

Проверката за адекватност на модела изисква да се намерят стойностите на дисперсията S_Y^2 на показателя *Y* спрямо неговата обща средноаритметична стойност \overline{Y} и на остатъчната дисперсия S_{acm}^2 .

При изчислените по зависимости (5.15) и (5.16) стойности за $S_Y^2 = 186328$ и $S_{ocm}^2 = 65567$, стойността на критерия на Фишер е:

$$F_0 = \frac{S_Y^2}{S_{ocm}^2} = \frac{186328}{65567} = 2,84$$
(5.24)

При ниво на значимост 0,05 и степени на свобода:

 $k_1 = N - 1 = 7 \,, \quad k_2 = N - m' = 4 \,,$

е определена таблична стойност на $F_{0r} = 21,62$ [33]. Тъй като $F_{0r} > F_0$, хипотезата за адекватност на регресионния модел (5.23) се приема.

След преобразуване на кодираните фактори x₁, x₂ и x₃ и преработване е получен крайният вид на математичния модел в натурален вид:

$$k_c = 2603,85 + 67z - 16,14\kappa_r - 30,5\gamma_p, \text{ N/mm}^2$$
(5.25)

Влиянието на трите параметъра на плашката, изразено чрез уравнение (5.25) отразява адекватно връзката им със сечението на срязвания слой, разпределено между режещите зъби и механизма на стружкообразуване. Броят на режещите гребени z и установъчният ъгъл к_г определят дебелината на срязвания слой *а* противопосочно, което се вижда от геометричната им връзка:

$$a = P \frac{\sin \kappa_r}{z} \,. \tag{5.26}$$

Нарастването на ъгъл *к*_r води до увеличаване на дебелината *a*, и обратно – с нарастването на *z*, дебелината *a* намалява (табл. 5.11). Това се отразява съответно на относителната деформация на сечението на срязвания слой и на специфичната сила на рязане.

Таблица 5.11. Стойности на дебелината на срязвания слой а в зависимост от броя на режещите гребени z и установъчния ъгъл к_r при различни стъпки на резбата Р

| | P, mm | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| z | 1,5 | | | | 2 | | | | 2,5 | | | |
| | Kr, ° | | | | | | | | | | | |
| | 15 | 20 | 25 | 30 | 15 | 20 | 25 | 30 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 3 | 0,1294 | 0,1710 | 0,2113 | 0,2500 | 0,1725 | 0,2280 | 0,2817 | 0,3333 | 0,2157 | 0,2850 | 0,3522 | 0,4167 |
| 4 | 0,0971 | 0,1283 | 0,1585 | 0,1875 | 0,1294 | 0,1710 | 0,2113 | 0,2500 | 0,1618 | 0,2138 | 0,2641 | 0,3125 |
| 5 | 0,0776 | 0,1026 | 0,1268 | 0,1500 | 0,1035 | 0,1368 | 0,1690 | 0,2000 | 0,1294 | 0,1710 | 0,2113 | 0,2500 |
| 6 | 0,0647 | 0,0855 | 0,1057 | 0,1250 | 0,0863 | 0,1140 | 0,1409 | 0,1667 | 0,1078 | 0,1425 | 0,1761 | 0,2083 |
| 7 | 0,0555 | 0,0733 | 0,0906 | 0,1071 | 0,0739 | 0,0977 | 0,1207 | 0,1429 | 0,0924 | 0,1222 | 0,1509 | 0,1786 |
| 8 | 0,0485 | 0,0641 | 0,0792 | 0,0938 | 0,0647 | 0,0855 | 0,1057 | 0,1250 | 0,0809 | 0,1069 | 0,1321 | 0,1563 |

Резултатите от планирания експеримент позволяват да се построи в графичен вид опитната зависимост $k_c = f(a)$ за сплав Д16Т в изследвания диапазон (фиг. 5.14). Прекъсването на монотонността при $a \approx 0,1$ mm може да се обясни със смущаващото влияние на триенето по страничните повърхнини на режещите зъби върху специфичната сила, което също зависи от *z* и κ_r .



Фиг. 5.13. Графична зависимост на въртящия съпротивителен момент М_{реж} от дебелината на срязвания слой а.

Опитната зависимост (5.25) и особено графиките на фиг. 5.14 добре представят значителното влияние на предния ъгъл γ_p . Специфичната сила намалява с увеличаването на γ_p поради намаляването на деформациите в зоната на рязане. Този ефект е ясно изразен, тъй като при работа с метчици и плашки се изрязват слоеве със сравнително малка дебелина – a = 0,05 - 0,25 mm. По тази причина с нулеви и отрицателни стойности на γ_p може да се работи по изключение.



Фиг. 5.14. Графична зависимост на специфичната сила k_c от дебелината на срязвания слой а.

За удобство при пресмятането на съпротивителния момент, влиянието на параметрите на плашката z, κ_r и γ_p е представено чрез поправъчни коефициенти, изчислени от уравнението на регресия (5.25). Техните стойности са представени в таблица 5.12 и са валидни за тази зависимост при промяна на факторите в изследваните граници.

| | рязине к _с . | | | | |
|------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|
| <i>z</i> , бр. | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| k_z | 0,96 | 1,0 | 1,04 | 1,08 | 1,12 |
| <i>к</i> , град. | 15° | 20° | | 25° | 30° |
| k _{ĸr} | 1,05 | 1,0 | | 0,96 | 0,91 |
| <i>ү_р</i> , град. | 0° | 5° | 10° | 15° | 20° |
| kγ | 1,41 | 1,31 | 1,21 | 1,10 | 1,0 |

Таблица 5.12. Стойности на коефициентите k_z , $k_{\kappa r}$ и k_{γ} за специфичната сила на рязане k_c .

Резултатите от планирания експеримент дават възможност да се определят оптималните стойности на геометричните параметри на плашката, при които се постига минимален съпротивителен момент. Това са:

- брой на режещите гребени z = 4;
- главен установъчен ъгъл $\kappa_r = 30^\circ$;
- преден ъгъл в установъчната равнина $\gamma_p = 20^{\circ}$.

При отсъствие на други допълнителни ограничения или съображения, тези стойности трябва да са предпочитани при изработване на комбинираните режещодеформиращи плашки.

5.2.3. Разпределение на натоварването на инструмента по работни елементи

а) натоварване на режещата част

В резултат от извършените експериментални изследвания, е получена възможност за точно описване на натоварването на плашките при работа, както по отделни режещи ръбове, така и по режещите гребени. В табл. 5.13 са представени стойностите на разпределението на момента $M_{peж}$, Nm, в зависимост от площите на елементарните сечения на срязвания слой A, mm^2 и радиусите на центрите на тежест на тези сечения. Представените резултати са валидни при работа на режещо-деформираща плашка M20x1,5, но резултатите от обработените експериментални данни показват, че картината е подобна при всички останали изследвани плашки, с което се потвърждават изводите от т. 4.

| цен | | | | | | | | | | |
|--|---|---|--|--|--|---|--|--|--|--|
| № на сечението на срязвания слой | Горна основа на трапеца <i>а</i> , mm | Долна основа на трапеца <i>c</i> , mm | Височина на трапеца <i>h</i> , mm | Радиус на центъра на тежестта г _{ит. mm} | Площ на сечението <i>A</i> , mm ² | Съпр. момент от режещата част М _{реж.} Nm | | | | |
| 1 | Tp | иъгълна ф | орма | 9,950 | 0,0300 | 0,6197 | | | | |
| 2 | 0,3220 | 0,5820 | 0,1 | 9,920 | 0,0452 | 0,9308 | | | | |
| 3 | 0,5820 | 0,8520 | 0,1 | 9,890 | 0,0717 | 1,4721 | | | | |
| 4 | 0,8520 | 1,1120 | 0,1 | 9,835 | 0,0982 | 2,0050 | | | | |
| 5 | 1,1120 | 1,1820 | 0,03 | 9,804 | 0,0344 | 0,7004 | | | | |
| 6 | 1,1820 | 1,0720 | 0,07 | 9,724 | 0,0789 | 1,5926 | | | | |
| 7 | 1,0720 | 0,9320 | 0,1 | 9,620 | 0,1002 | 2,0011 | | | | |
| 8 | 0,9320 | 0,7952 | 0,1 | 9,506 | 0,0864 | 1,7043 | | | | |
| 9 | 0,7952 | 0,6520 | 0,1 | 9,397 | 0,0724 | 1,4116 | | | | |
| 10 | 0,6520 | 0,5120 | 0,1 | 9,275 | 0,0582 | 1,1206 | | | | |
| 11 | 0,5120 | 0,3720 | 0,1 | 9,160 | 0,0442 | 0,8405 | | | | |
| 12 | 0,3720 | 0,1200 | 0,1 | 9,043 | 0,0246 | 0,4618 | | | | |
| 13 | К | ръгов сект | 9,041 | 0,0027 | 0,0497 | | | | | |
| | Общо з | | 0,7470 | 14,9102 | | | | | | |

Таблица 5.13. Разпределение на момента $M_{peж}$, Nm, в зависимост от площите на елементарните сечения на срязвания слой A, mm² и радиусите на центрите на тежест $r_{um, mm}$.

При групирането на горните данни по режещи гребени на плашката се оформя картината, представена в табл.5.14, а графичната и интерпретация - на фиг.5.15.

| по режещите гребени на плашкити | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|---|--|---|--|---------------------------|---------------------------|--|
| Режещ гребен № | Режещи ръбове № | Площ на сечението по реж. гребени <i>А_{греб}</i> , mm ² | Радиус на центъра на тежестта <i>r_{um-cp,} mm</i> | Съпр. момент М _{реж-гр,} Nm | Сила на рязане <i>Fc_{гр,}</i> N | Отн. отклоне ние, % | Абс. отклоне ние, N | |
| I гребен | 5+6+11 | 0,1575 | 9,5832 | 3,1334 | 327,0 | - | - | |
| II гребен | 1+7+12 | 0,1548 | 9,5923 | 3,0826 | 321,4 | 1,70 | -5,60 | |
| III гребен | 2+8+13 | 0,1342 | 9,6362 | 2,6849 | 278,6 | 17,00 | -48,40 | |
| IV гребен | 3+9 | 0,1441 | 9,6424 | 2,8837 | 299,1 | 9,33 | -27,90 | |
| V гребен | 4+10 | 0,1564 | 9,6266 | 3,1256 | 324,7 | 0,70 | -2,30 | |
| Общо: | | 0,7470 | | 14,9102 | 1550,7 | | | |

Таблица 5.14. *Разпределение на момента* $M_{peж-гp}$, Nm и главната сила на рязане Fc_{rp} , N по режещите гребени на плашката

Видно е, че разликата в силовото натоварване на гребен №3 спрямо приетия за първи гребен достига 48,4 N, което изразено като относителна величина съставлява 17%. Получаваният по такъв начин дебаланс при работа на инструмента води до стремеж към кръстосване на осите на резбата и на заготовката и се преодолява единствено благодарение на целите навивки от деформиращата част на плашката.



Фиг.5.15. Неравномерност при разпределение на главната сила на рязане Fc_{гр} по режещите гребени на плашката

б) Натоварване от деформиращите навивки на плашката

От съществено значение за обосновката и оптимизирането на новата конструкция плашки е изясняването на делът на калиброващо-деформиращата част във формирането

на въртящия момент при работата, влиянието ú върху качествените параметри на получаваните резби и като краен резултат, отговорът на въпроса какъв да бъде броят на деформиращите навивки като важен конструктивен параметър на плашките.

За да бъде получен отговорът на тези въпроси, са анализирани резултатите от експерименталните изследвания и по-конкретно данните от работата при етапи 4 и 5, съгласно приетата схема в т. 4 (фиг. 4.7.). При условие, че дължината на нарязваната повърхнина за всички разглеждани опити е 12 mm, в режещата част на изследваните плашки са поместени по 3 навивки и калиброващо-деформиращите навивки са 3,25 и 3 съответно за плашки M16x1,5 и M25x1,5 следва, че в края на рязането (дванадесетия милиметър от обработваната повърхнина) са формирани 8 навивки и че от този момент започва излизането на режещата част от работа и $M_{PEЖ}$ постепенно намалява, а $M_{KAЛ}$ е включен като постоянна съставяща поради триенето на целите навивки. След достигането на дължина на работа 16,5 mm от началната точка от работната част (навивка № 11), рязането се прекратява и $M_{PEЖ} = 0$, а целите навивки още не са започнали да излизат от контакт със заготовката и M_{KAJI} е на максималната си стойност - фиг.5.16. За яснота на изложението, условно е прието, целите калиброващи навивки да бъдат означени както следва: граничната точка между работната и калиброващата части (16,5 mm) е приета за 0, първата излизаща от работа цяла навивка е №1, следващата я втора - №2, третата - №3 и т.н. До достигането на L=21,37 mm и съответно 21 mm за M25x1,5 (навивки № 1, 2, 3 и 4), се наблюдава постепенно намаляване на *М*_{КАЛ} до стойност 0 Nm, в съответствие с излизането на целите навивки от работа. Диаграмата на изменение на M_{PEW} и M_{KAT} само на последните два етапа от работата на плашките по групи материали е показан на фиг. 5.17. – 5.19, а стойностите за промяната на $M_{KA\Pi}$ за целите навивки в табл. 5.15.



Фиг. 5.16 Взаимно разположение между инструмента и заготовката в момента на работа само на калиброващо-деформиращата част.



Фиг. 5.17 Диаграми на изменение на моментите $M_{PEЖ}$ и $M_{KAЛ}$ при нарязване на метрична резба M16x1,5 на стоманени заготовки с комбинирани плашки: а) – стомана 40Х, б) - стомана У10, в) - стомана X18Н9Т.



Фиг. 5.18 Диаграми на изменение на моментите $M_{PEЖ}$ в $M_{KAЛ}$ при нарязване на метрична резба M16x1,5 на заготовки от бронз и месинг с комбинирани плашки: a) - бронз, б) - месинг.



Фиг. 5.19 Диаграми на изменение на моментите M_{PEK} и $M_{KAЛ}$ при нарязване на метрична резба M25x1,5 на заготовки от алуминиеви сплави с комбинирани плашки: а) – Ал. сплав 5086H26 - тръба, б) - Ал. сплав Д16Т.

При проведените експериментални изследвания с режещо-деформиращи плашки, също е установено, че основен влияещ фактор върху еластичното възстановяване и върху стегнатостта между заготовката и целите навивки на инструмента е вида на обработвания материал. Наблюденията и експерименталните данни показват, че найголеми стойности за $M_{KAЛ}$ се получават при нарязване на резби върху бронз, докато при месинг и стомани отчетените стойности за $M_{KAЛ}$ са средно 3,5 пъти по-малки, а при алуминиевите сплави разликата достига до 10 – 10,55 пъти. Тези резултати изцяло кореспондират с еластичните характеристики и съответното еластично последействие на изследваните обработвани материали. В случая за удобство при обобщаването на резултатите е прието различните начални стойности на $M_{KAЛ}$ за отделните материали, да бъдат приети за 100%, което позволява да се намери поотделно относителният дял в проценти на всяка една от целите навивки на плашките във формирането на $M_{KAЛ}$. Разработване и изследване на нова конструкция режещо-деформираци резбонарезни плашки

Таблица 5.15. Промяна на въртящия момент от триене на калиброващата част М_{КАЛ}, в съответствие с излизането на целите 3,40 0,00 0,00 3,99 0 7,25 4,00 2,72 10,59 % На Момент от триене на калиброващата част Мкал при дължина на рязане L, Nm/условен пореден номер Camo 3a Nº4, Nm 0,500,12 0 0,280,140,370 нав. , Nm 22,5/4 0,500,280,140,37 0,120 0,2 0 38,14 48,57 22,66 30,79 40,41 27,02 20,14 18,607,69 % №3, Nm Само за 1,801,56 1,44 1,70 3,68 0,80 0,290,24 Hab. 0,12 0 0 0,2 21/3, 0,50 0,28 0,140,37Nm работещата цяла навивка 12,18 10,29 31,16 9,72 47,29 22,14 38,46 23,31 21,07 % №2, Nm Camo 3a 1,100,47 0,36 2,87 1,100,140,95 0,61 Hab. 19,5/2 , Nm 2,301,841,84 4,05 0,92 0,29 0,241,64 40,1669,2 37,14 49,19 42,78 70,14 34,11 27,97 43,1% Само за Nel, Nm 0,441,321,55 6,70 1,98 1,301,51 1,01 нав. 3,40 2,59 2,200,43 0,85 6,92 2,022,3118/1, Nm 100 100 100100100100 100 100100% навивки от работа. 16,5/0, 4,72 3,86 3,50 13,62 3,53 1,44 1,29 4,57 Nm Ал. сплав 5086Н26 Ал. сплав Д16Т Материал Теоретично Средно X18H9T Месинг Бронз **V10A** 40X

135



Фиг. 5.20. Изменение на момента $M_{KAЛ}$ при излизане на калиброващодеформиращите навивки на комбинирана плашка от работа.



Фиг. 5.21. Изменение на относителния дял на момента M_{КАЛ} за отделните калиброващо-деформиращи навивки на комбинирана







Фиг. 5.22. Изменение на относителния дял на момента М_{клл} за отделните калиброващодеформиращи навивки на комбинирана плашка по групи обработвани материали.

Получените експериментални резултати (табл.5.15.) и тяхната графична интерпретация – фиг. 5.20. – 5.22. дават възможност да се направят следните изводи:

1. Като цяло стойностите на $M_{KA,T}$ в съответствие с излизането на целите навивки на инструмента от работа са по-малки от приетите условни теоретични стойности, с най-голямо отклонение за първата навивка – 12,7%, 3,7% за втората и 4,3% за третата (фиг. 5.20).

2. Относителният дял на отделните навивки при формирането на $M_{KA\Pi}$ е с по-големи отклонения. Първата цяла навивка е със среден принос от 42%, втората с 23,3% и третата с 30,6%. Останалите около 4% се формират от непълната четвърта навивка за M25x1,5 (фиг. 5.21).

Коментарът на тези два общи извода дава в определена степен яснота за промяната на $M_{KA,T}$: основната част от работата в условията на сухо триене се извършва от първата цяла навивка, при която стегнатостта в условното резбово съединение е най-голяма. В резултат от захващанията и провлачването на материала, микрограпавините се заглаждат, протичат повърхностни пластични деформации на обработвания материал и стегнатостта в съединението намалява почти наполовина при втората навивка.

Моментът, формиран от третата цяла навивка, е с по-голям относителен дял от този на предходната навивка. Наблюденията в хода на експерименталните изследвания показват, че последната навивка е недостатъчна да осигури стабилност на положението на инструмента при условията на плаващото му закрепване и под действие на силите по винтовата повърхнина и на теглото на инструмента и екипировката се получава отклонение от оста на заготовката, водещо до дестабилизиране на технологичната и динамометричната системи и се отчита относително по-голямо съпротивление. При измерени стойности на $M_{KAЛ}$ от 0,12 до 0,5 Nm за третата цяла навивка, малките отклонения на момента дават голямо нарастване на относителния дял. Може да бъде направен важният извод, че само една цяла калиброващо-деформираща навивка е недостатъчна за стабилното установяване и водене на плашката при работа.

3. По групи обработвани материали картината е идентична. Относителният дял на момента от първата цяла навивка е най-голям при материалите с най-малка твърдост и еластичност – алуминиевите сплави с 48,65% и най-малък при стоманите – 35,1%. Същото е разпределението и за втората цяла навивка – 15,3% за стомани, 26,1% за медни сплави и 32,7% за алуминиеви сплави.

4. Интерес представляват резултатите само за групата на алуминиевите сплави. За изследвания материал Д16Т общият вид на разпределението на момента $M_{KAЛ}$ е с найслабо изразен дебаланс при третата навивка спрямо другите две групи материали, а относителния дял на първата цяла навивка е най-голям – 63,2%. Заготовките от алуминиева сплав 5086H26 представляват тънкостенни тръби с малка радиална стабилност. На Фиг. 5.22. ясно се вижда, че дебаланса на инструмента започва още след излизането на първата цяла навивка. Следователно при подобни случаи на резбонарязване – тънкостенни тръби с малка твърдост, минимално необходимият брой на целите калиброващо-деформиращи навивки е три. За останалите случаи на обработвани материали и заготовки, изработените четвърта и пета цели навивки не оказват съществено влияние върху стабилното водене на плашките, допълнително увеличават $M_{KAЛ}$ и се оказват излишни.

5.2.4. Качествени параметри на нарязваните резби

При провеждане на експерименталните изследвания е проведен контрол на основните параметри на качеството на нарязваните резби M16x1,5 6g, както следва:

- външен диаметър d, mm;
- вътрешен диаметър d₁, mm;
- среден диаметър d₂, mm;
- стъпка на резбата Р, mm;
- ъгъл на профила на резбата α, °;
- грапавост на резбата.

Съгласно стандарт ISO 261:1998, горните отклонения за трите диаметъра на резбата са еднакви: $g_{d1} = g_{d2} = g_d$ (фиг.5.23.). За резба на болт М16х1,5 6g допусковите полета са:



- за горното отклонение на диаметъра на резбата es = -32 μm;
- за долното отклонение на измервания диаметър на резбата еі = - 172 µm за d₂ или еі = - 268 µm за d;
- ei за d_1 не се нормира.

Допуските на средния диаметър на формираната външна резба са сумарни и регламентират

Фиг. 5.23. Отклонения на размерите на диаметрите на външни метрични резби съгл. ISO 261:1998

сумата от отклоненията на средния диаметър, стъпката и половината на профилния ъгъл.

За получаване на стойностите от измерванията е прилаган поелементен подход (диференциален метод) - d и d₂ са измервани с контактни измервателни инструменти съответно микрометър за цилиндрични повърхнини и микрометър-резбомер и двата с точност до 0,01 mm; d₁, P и профилния ъгъл α са измервани с инструментален микроскоп ИМЦ по сянката на профила с точност 0,001 mm.

Поради технологични ограничения, грапавостта на нарязаната резба е определяна визуално чрез сравняване с еталонни плочки.

Резултатите от измерванията са представени в табл. 5.16.

| Стандартни размери за M16x1,5 6g | | | Измерени размери на резбата | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|
| | | | | d ₂ , 1 | mm | | Стъпка | ı P, mm | |
| d, mm | d ₂ , mm | d ₁ , mm | d, mm | Сечение I | Сечение II | d ₁ , mm | Нараства не на стъпката | Натрупа на грешка, µm | |
| | $l_{2max} = 14,994$ $l_{2min} = 14,854$ | = 14,854 = 14,0195 | ометър МЦ | 14,84 | 14,85 | 13,938 | 1,506 | 6 | |
| | | | | 14,85 | 14,85 | | 3,010 | 10 | |
| | | | икр ос И | 14,85 | 14,84 | | 4,511 | 11 | |
| ,968 ,732 | | | осм | 14,86 | 14,86 | | 6,015 | 15 | |
| = 15 = 15 | | | ренс | 14,87 | 14,86 | | 7,516 | 16 | |
| d _{max} d _{min} | | 1 max | 15,85 mm, изме 15,857 mm, и | 14,86 | 14,86 | | 9,023 | 23 | |
| 5 5 | | g d | | 14,87 | 14,86 | | 10,530 | 30 | |
| | | | | 14,86 | 14,86 | | | | |
| | | | | 14,86 | 14,87 | | | | |
| (| | | Средно: | 14,858 | 14,857 | | | | |

Таблица 5.16. Размери на нарязвана резба М16х1,5 6g, обработван материал - бронз.

Резултатите от направените измервания дават основание да се направят следните изводи:

- Всички диаметрални размери на резбата, измерени по външния, средния и вътрешния диаметри, се поместват в допусковите полета за 6g степен на точност.
- 2. При условие, че най-малката гарантирана хлабина по средния диаметър на резбово съединение M16x1,5 6H/6g е 32 µm, а при най-голяма стойност на местното отклонение на стъпката ΔPn = 10 µm, измерено за две съседни стъпки, нужната диаметрална компенсация на грешката на стъпката на резбата f_p ще бъде: f_p = ΔP_n.ctgα/2=17,3 µm, което е значително по-малко от хлабината.
- 3. При измерванията с инструментален микроскоп по сянката на профила не е установено значимо отклонение от профилния ъгъл α.
- Визуалното сравняване на грапавостта на резбата с еталон, дава основание да се твърди, че получаваната грапавост е в границите Ra = 1,5 – 2,5 μm, като при това не не са констатирани локални задирания на материала или други подобни дефекти при наблюдение под увеличение.

5.3. Заключение за пета част

В резултат от анализа на формирането на сечението на срязвания слой и на последователността на работа на режещите зъби, влияещи върху общия съпротивителен момент M_C и отделните му компоненти са определени и основните фактори, които оказват съответното влияние върху големината и изменението му.

Приета е методика за експериментално определяне на общия съпротивителен момент M_C и на зависимостта му от определени променливи фактори чрез динамометриране при различни предварително определени условия на работа. Изследвано е влиянието на обработвания материал – Табл. 5.6. и Табл. 5.7. изразено чрез коефициента K_M , а за определяне на влиянието на геометричните и конструктивни параметри на плашката - брой гребени *z*, установъчен ъгъл κ_r и преден ъгъл γ_p върху специфичната сила на рязане k_c , по метода на статистическото планиране е проведен трифакторен експеримент от вида 2³. На заготовки от алуминиева сплав Д16Т е нарязвана резба с девет вида режещо-деформиращи плашки M32x1,5, изработени с различни параметри.

Изследвано е разпределението на натоварването на инструмента по работни елементи - натоварване на режещата част и натоварване на калиброващата част, а чрез измерване са определени основните качествени показатели на получаваните резби – точност на размерите, геометрични параметри на профила и грапавост на повърхнините.

Като обобщение могат да бъдат направени следните изводи и заключения:

1. При различните обработвани материали, специфичната сила на рязане k_c се променя в широки граници – от 1156 N/mm² за алуминиева сплав 5086H26 до 5151 N/mm² за неръждаема стомана 12X18H9T (Табл.5.7.), в резултат на което *Мреж* също варира в широки граници – от 9,63 Nm до 25,1 Nm, а коефициента K_M се променя от 1,1 до 1,81. Получените резултати определят обработвания материал като един от най-силно влияещите фактори върху формирането на k_c и M_C .

2. Потвърдена е хипотезата, че материалите с по-голяма пластичност, имащи съответното увеличаващо се еластично възстановяване (неръждясваща стомана, бронз и месинг), формират и по-голямо триене в калиброващите навивки поради нарастващата стегнатост с обработените повърхнини.

3. В резултат от проведен планиран експеримент е установено влиянието на трите параметъра на плашката - брой гребени *z*, установъчен ъгъл *к*, и преден ъгъл *γ*, върху

специфичната сила на рязане *k_c*, изразено чрез уравнение (5.25), което отразява адекватно връзката им със сечението на срязвания слой, разпределено между режещите зъби и механизма на стружкообразуване.

4. Нарастването на ъгъл κ_r , чрез увеличаване на дебелината на срязвания слой *a*, води до съответно увеличение на относителната деформация на сечението на срязвания слой и на специфичната сила на рязане (табл. 5.12). С нарастването на *z*, дебелината *a* намалява (табл. 5.12), намалява и специфичната сила. Това се отразява съответно на стойностите на поправъчните коефициенти $k_{\kappa r}$ и k_z .

5. Установено е, че специфичната сила намалява с увеличаването на предния ъгъл γ_p поради намаляването на деформациите в зоната на рязане. В резултат на това, поправъчният коефициент k_γ се променя от 1,0 до 1,41 в изследвания интервал на промяна на γ_p - от +20° до 0° (табл. 5.12).

 Доказано е, че неравномерното разпределение на сечението на срязвания слой по режещи гребени води до съответните разлики в силовото натоварване на гребените (до 17-20%), предизвикващо дебаланс при работа на плашките – табл. 5.14.

7. Целите деформиращи навивки на комбинираните плашки изпълняват функциите на подвижна опора на инструмента. Момента от триене $M_{KA,T}$ на целите навивки е с различен относителен дял за всяка навивка - 42%, 23,3% и 30,6%, съответно за първа, втора и трета. Доказано е, че оптималният брой цели навивки в зависимост от обработвания материал и съответното еластично последействие е 2 до 4 навивки.

8. Измерените качествени параметри на резбите, нарязвани с комбинирани плашки са по-добри от тези, получавани с класически плашки при равни условия на работа и могат да достигнат параметрите за степен на точност 6g и грапавост в границите $Ra = 1,5 - 2,5 \mu m$.

ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. Създадена е нова конструкция кръгли резбонарезни плашки с подобрени геометрични и конструктивни параметри, използването на които, води до получаването на по-качествени резби;

2. Чрез методите на векторния анализ е изведено общото уравнение на архимедовите винтови повърхнини, оформящи производящата инструментална повърхнина на плашките. На тази база са разработени и математични модели за определяне на параметрите на сечението на срязвания слой при всеки момент на работа на инструмента.

3. Дефинирани и изследвани са геометричните параметри в инструменталната и работната системи на новата конструкция плашки и са определени връзките между тях;

4. Чрез методите на диференциалната геометрия е разработен математичен модел за определяне на задните ъгли на плашката при осово затиловане с коничен инструмент и е доказана и изследвана тяхната променливост по дължина на главните режещи ръбове;

5. Доказана е променливостта и са установени зависимостите за промяна на предните ъгли в различните участъци на режещите ръбове на плашките;

6. Проведен е теоретичен анализ на натоварването на плашката при работа и са изведени зависимости за определяне на специфичната сила на рязане и въртящия момент в произволен момент от работата на гребеновидни резбови инструменти.

7. Изследвано и доказано е неравномерното натоварване на режещите зъби на гребеновидните резбонарезни инструменти, което е предпоставка за тяхната нестабилност по време на работа и за неблагоприятното влияние върху качеството на резбите;

8. Изследвано е формирането на въртящия момент във всички етапи от работата на плашките и е определен относителният дял на отделните му компоненти.

Приложни приноси

1. Получени са данни за стойностите на специфичната сила на рязане при различни условия на работа на плашките и са препоръчани оптималните параметри на плашките;

2. Получена са опитни зависимости за определяне на въртящите моменти при различни условия на работа на новата конструкция плашки

3. Доказано е, че целите калиброващи навивки на новата конструкция плашки значително допринасят за уравновесяване на радиалното натоварване и за подобряване на качеството на резбата;

4. Новата конструкция плашки е внедрена в серийното производство на триъгълни резби със ситна стъпка върху тънкостенни електрозаварени тръби от алуминиеви сплави.
Литература

1. Адлер Ю. П., Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский, Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий, М., Наука ,1976.

2. Аршинов В. А., Г. А. Алексеев, Резание металлов, М., Машгиз, 1953.

3. Армарего И. Дж. А., Р.Х. Браун. Обработка металлов резанием. Пер. с англ., М., "Машиностроение", 1977, с. 326.

4. Барбашов.Ф.А., Резьбо-фрезерные работы, М, Высшая школа, 1977

5. БДС 14.201-204—76. ЕСТПП. Технологичност на конструкцията.

6. БДС EN 225 568:2006. Кръгли ръчни и машинни плашки и държачи за ръчни плашки.

7. БДС EN 25 968:2006. Кръгли плашки. Терминология. (ISO 5968:1981)

8. Блюмберг В. А., Справочник фрезеровщика, Ленинград, Машиностроение, 1972.

9. Бобров, В. Ф., Многопроходное нарезание крепежных резьб резцом, М., Машиностроение, 1982.

10. Бобров, В. Ф., Основы теории резания металлов, М., Машиностроение, 1975.

11. Бурмистров, Е.В. Изследование некоторых показателей обработываемости жаропрочных И титановых сплавов при нарезание резбы метчиками, Высокопроизводительное машиностроении, стр.329.-335, резание В М., Машиностроение, 1966.

12. Вачев А. А., Рязане на материалите, Част 1: Геометрични, кинематични и технологични параметри на процеса рязане, ТУ Пловдив, Пловдив, 2000.

13. Велчев С. Д., Рязане на металите, Русе, Печатна база при ВТУ, 1993.

14. Велчев С.,И. Колев, К. Иванов, Изследване влиянието на дебелината на срязвания слой върху специфичната сила на рязане при струговане - I част Хипотетични математични модели, Международен конгрес – Машиностроителни технологии, Варна, 2004

15. Велчев С., И. Колев, К. Иванов, Изследване влиянието на дебелината на срязвания слой върху специфичната сила на рязане при струговане - II част Експериментални изследвания, Международен конгрес – Машиностроителни технологии, Варна, 2004

16. Велчев С., И. Колев, К. Иванов, Изследване ефекта на взаимодействие на скоростта на рязане и дебелината на срязвания слой върху специфичната сила на рязане при струговане, Научни трудове на РУ "А. Кънчев", Русе, 2004

17. Вичев С., К. Иванов, Съпротивителен момент при нарязване на триъгълна резба с кръгли комбинирани плашки, НК МММЕ – Сливен, 2008.

18. Вичев С., К. Иванов, В. Иванов, Разпределение на сечението на срязвания слой при нарязване на триъгълна резба с кръгли плашки, АМТЕСН'07, том 1, стр. 218, Габрово, 2007.

19. Воронов В. Н., Способ нарезания резьбы гребенкой, Ковр. техн. ин-т., 1995.

20. Воронов В. Н., Состояние и перспективы развития технологии обработки винтовых поверхностей, Инструмент, Тула, 1997.

21. Грановский Г.И., В.Г.Грановский, Резание металов, М, Высшая школа, 1985.

22. Димитров В. П., Силови зависимости при резбонарязване, Дисерт. труд – автореферат, РУ "А.Кънчев", Русе, 2003.

23. Завод за резбонарезни инструменти – Габрово, Каталог 2007.

24. Иванов К. А., Геометрични параметри на комбинирани режещо-деформиращи плашки, ЮНК на РУ "А. Кънчев", Русе, 2004.

25. Иванов В. К., К. А. Иванов, Иванов А. К., Затиловане на резбонарязващи плашки, НК на НТС - МТМ'09, София, 2009.

26. Ивкович Б., Трибология резания, Наука и техника, Минск, 1982.

27. Кацев П. Г., Статистические методы исследования режущего инструмента, М, Машиностроение, 1974

28. Киселев В. Н., В. М. Красильников., К вопросу определения осевой состовляющей силы резании при нарезание резьб, Тул.гос.техн.у-т., Тула ,1994.

29. Клушин М. И., Резание металлов. Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя, Машгиз, М., 1958.

30. Литвин Ф.Л., Теория зубчатых зацеплений, М., Наука ,1968.

31. Лоладзе Т. М. Износ режещего инструмента, М. Машиностроение, 1958.

32. Люкшин В. С., Теория винтовых поверхностей в проектирование режущих инструментов, Машиностроение, М., 1968.

33. Митков Ат., Минков Д., Математически методи на инженерните изследвания, Русе, П. Б. при ВТУ, 1985.

34. Митков А и др. Апроксимиране на данни при функция на една променлива, ВТУ "А. Кънчев", Русе, 1982, с.79.

35. Мягков В. Д., М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брашинский, Допуски и посадки. Справочник, том 2, Л., Машиностроение, 1983.

36. Нгуен Туан Хиеу, Разработка конструкций и исследование работоспособности метчиков с внутренном размещением стружки, Дисерт. труд – автореферат, МГТУ "Н.Э.Бауман", М.,2008

37. Орлов, П. И., Основы конструирования, том 1, М., Машиностроение, 1988.

38. Развитие науки о резании металлов. Под ред. Н. Н. Зорева. М. Машиностроение, 1967, с.416.

39. Родин П.Р., Металлорежущие инструменты, Киев Вища школа, 1974.

40. Родин П. Р., Основы формообразования поверхностей резанием, Вища школа, Киев, 1977.

41. Розенберг Ю. А., Тахман С. И., Развитие теоретических методов расчета сил резания, Прогрес. технол. процессы в машиностр., Томск, 1997.

42. Попов С. А., Л. Г. Дибнер, А. С. Каменкович, Заточка режущего инструмента. М., "Высшая школа", 1970.

43. Сахаров Г.Н., О.Б. Арбузов, Ю. В. Боровой, В.А.Гречишников, А.С. Киселов, Металлорежущие инструменты, М, "Машиностроение", 1989.

44. Семенченко И. И., В. М Матюшин, Г. Н. Сахаров., Проектирование металлорежущих инструментов, М., "Машгиз", 1962.

45. Сидоренко С. М., Вычислительная геометрия в машиностроении, Машиностроение, М., 1983.

46. Силин С. С., Метод подобия при резании материалов, М., Машиностроение, 1979, с. 152.

47. Справочник на технолога по механична обработка, том II под общата редакция на Пашов С., С., Техника, 1990

48. Справочник технолога - машиностроителя том II, под ред. Г. Косиловой., Р. К. Мещерякова, М., Машиностроение, 1985.

49. Стоилов Г., Електронни схеми – измерване, контрол и регулиране на неелектрични величини, С., Техника, 1989.

50. Събчев П. М., Металорежещи инструменти, С., Техника, 1982.

51. Тодоров.Т.П, С.В.Вичев, Рязане на материалите, режещи инструменти и машини, Русе, Печатна база при ВТУ, 1988.

52. Ульд Хадрами С. А., Сравнительная эффективность различных методов нарезания резьбы, Тул. гос. ун-т., стр. 24, 1999.

53. Ульд Хадрами С. А., Исследование стружкообразования при резьбонарезании, Тул. гос. ун-т., стр.11, 1999.

54. Федин Е. И., Лю Шухуа, Матричный метод определения параметров срезаемого слоя при моделировании процессов резьбонарезания мерными инструментами, Тул. гос. ун-т, стр.7, 1999.

55. Федин Е. И., Лю Шухуа. Методика определения составляющих силы резания при логико-математическом моделировании процессов резьбонарезания мерными инструментами, Тул. гос. ун-т, стр.5, 1999.

56. Филлипов Г. В., Режущий инструмент, Машиностроение, Л., 1981

57. Ханс-Йохен Барч, Математически формули. С., "Наука и изкуство", 1986.

58. Шатин В.П., Ю. В. Шатин, Справочник конструктора - инструментальщика. М., "Машиностроение", 1975.

59. Шпур Г., Т. Штеферле, Справочник по технологии резания материалов, М., Машиностроение, 1985.

60. Якухин.В.Г., В.А.Ставров, Изготовление резьбы - справочник, М., Машиностр., 1989.

61. Якухин.В.Г., Оптимальная технология изготовления резьб, М., Машиностроение, 1985

62. Araujo A. C., Silveira J. L., Analysis of the specific forces on end milling. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brazil, 2002.

63. Boothroyd, G., Knight, W., Fundamentals of Machining and Machine Tools, Third Edition, Taylor & Francis, New York, 2006.

64. Couns D. Zur rechnenrischen Erfassung des Snittggeschwindig-keitseinflusses auf die Schittkraft beim Spanen. Fertigungstechik und Betrieb, Berlin 37, 1987, H.12, S.717.

65. Degner W., H. Lutze, E. Smeikal. Spanende Formung : Teorie, Berechnung, Richtwerte, Munhen, Wien, C. H. Verlag, 1993.

66. DIN EN 22 568, HSS circular screwing dies.

67. DIN 223 Round dies.

68. ISO 3002/1, Basic quantities in cutting and grinding – Part 1: Geometry of the active part of cutting tools – General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers.

69. ISO 3002/2, Basic quantities in cutting and grinding – Part 2: Geometry of the active part of cutting tools – General conversion formulae to relate tool and working angles.

70. ISO 3002/3, Basic quantities in cutting and grinding - Part 3: Geometric and kinematic quantities in cutting.

71. ISO 68-1, General purpose screw threads – Basic profile – Metric screw threads.

72. König W., Essel K, Spezufische Schittkraftwerte die Zerspanung metallischer Werkstofe. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1973.

73. Kienzle, O., Die bestimmung von Kräften ung Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werzeugmaschinen, VDI-Z 94 (1952) 11/12, S.299-305

74. Lee B.Y., Tang Y.S. Prediction of specific force ratio in turning. Journal of Materials Technology. Vol.41, N 1, 1994, p.p 71 - 80.

75. Manukova-Marinova, A., A. Borodjieva, Analysis and design of Active Low-Pass Filters Using Sallen-Key Architecture, Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, 2003.

76. Sandvik Coromant, Rotating tools, metalworking products.

77. Sandvik Coromant, Turning tools, metalworking products.

78. Shiang S. - T., C.-M. Tsai, A-C. Lee, Analysis of cutting forces in ball-end milling. Journal of Materials Processing Technology. Vol.47, N 3-4, 1995, p.p 231-249.

79. Sinh – Tarung, Ciang - Min Tsai, An-Chen Lec. Analysis of cutting forces in ballend milling. Journal of Materials Technology, Vol.47, N 3-4, 1995, p.p 231-249.

80. Tarung Y. S., Hwang T. S. An investigation of specific force and its direction factors in turning. Computers & Structures, Vol. 53, N 4, 1994. p.p.937 - 945.

81. TITEX – Plus, Der Gesamtkatalog 2005. Gewinde – schneideisen. Frankfurt am Main. 2005

82. Tönshoff H. K., C. Arendt, R. Ben Amor. Cutting of Hardness Steel, Annals of the CIRP, Vol. 49/2, 2000, p.p. 547-566.

83. US Patent №№: 689 555; 1 312 345; 1 857 493; 2 010 913; 2 054 745; 4 256 421; 4 408 363; 4 743 146; 6 089 982.

84. Wang M.-Y., H.-Y. Chang. A simulation shape error for end milling AL6061-T6. Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 22, № 9, 10, 2003, p.p. 689-696.

85. Yun W.-S., D.-W. Cho. Accurate 3-D cutting force prediction using cutting condition independent coefficients in end milling. Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 41, 2001, p.p. 463-478.

86. <u>http://www.info.instrument.ru</u>

87. <u>http://www.widell.com</u>

88. http://www.kistler.com

СЪДЪРЖАНИЕ

| 1. Развитие на резбонарязването с режещи плашки | 3 |
|--|----|
| 1.1. Методи за обработване на резби | 3 |
| 1.2. Конструкции плашки | 4 |
| 1.3. Технологични възможности | 10 |
| 1.4. Силови характеристики на процеса рязане | 13 |
| 1.4.1 Общи положения | 13 |
| 1.4.2 Специфична сила на рязане | 15 |
| 1.4.3 Теоретични математични модели на специфичната сила на | |
| рязане | 19 |
| 1.5. Особености на сечението на срязвания слой при резбонарязване с | |
| метчици, плашки, и резбонарезни гребени и глави | 26 |
| 1.6. Технологична оценка на разпространените конструкции плашки | 32 |
| 1.7. Проблеми с нарязването на резби върху тънкостенни електрозава- | |
| рени тръби | 35 |
| 1.8. Изводи | 35 |
| Цел и задачи за изпълнение | 37 |
| 2. Разработване на нова конструкция плашки | |
| 2.1. Технологичност на конструкцията | 38 |
| 2.2. Изисквания към новата конструкция плашки | 39 |
| 2.3. Описание на конструкцията | 40 |
| 2.4. Дефиниране на геометричните параметри на новата конструкция | |
| плашки | 44 |
| 2.4.1. Инструментална координатна система | 44 |
| 2.4.2 Работна координатна система | 45 |
| 2.4.3. Ъгли в системата на инструмента | 47 |
| 2.5. Определяне на връзките между геометричните параметри | |
| 2.5.1. Общо уравнение за режещата част | 48 |
| 2.5.2. Определяне на действителните стойности на предните ъгли | |
| γ_p и γ_f | 50 |
| 2.5.3. Определяне на действителните стойности на задните ъгли α_p | |
| и α _f | 51 |

| 2.6 Математично моделиране на действителните задни ъгли при осово |
|---|
| затиловане с коничен абразивен инструмент |

| | 2.6.1 Основни положения и параметри на схемата при изграждане |
|-------|--|
| | на модела. |
| | 2.6.2. Математичен модел |
| | 2.6.3. Алгоритъм за определяне на задните ъгли |
| | 2.6.4 Влияние на параметрите на технологичната схема върху |
| | стойностите на задните ъгли. |
| | 2.7. Определяне на предните ъгли по дължина на главния режещ ръб |
| | 2.8. Заключение за втора част |
| 3. Ma | тематично моделиране на процеса |
| | 3.1. Сечение на срязвания слой при нарязване на външни резби |
| | 3.2. Уравнение на архимедова винтова повърхнина |
| | 3.3. Уравнение на конусната инструментална повърхнина на режещата |
| | част |
| | 3.4. Проекции на винтовите линии в равнината Оху |
| | 3.5. Разположение на върховите режещи ръбове върху инструменталната |
| | режеща част |
| | 3.6. Площ на сечението на срязвания слой |
| | 3.7. Силово натоварване на режещата част на плашка |
| | 3.8. Числов пример |
| | 3.9. Заключение за част трета |
| 4. Ан | ализ и моделиране на натоварването на плашките |
| | 4.1. Сечение на срязвания слой |
| | 4.1.1 Форма и параметри на впадината на резбата |
| | 4.1.2. Разпределение на сумарното сечение между режещите зъби |
| | 4.1.3. Разпределение на сумарното сечение между режещите гребе- |
| | ни |
| | 4.2. Съпротивителен момент при нарязване на триъгълна резба с кръгли |
| | комбинирани плашки |
| | 4.3. Заключение за четвърта част |
| 5. Ек | спериментални изследвания |
| | 5.1. Методика и условия на експерименталните изследвания |

| 5.1.1. Методика за определяне на въртящия момент | 106 |
|--|-----|
| а) Компоненти на въртящия момент | 106 |
| б) Методика на планирания експеримент | 108 |
| в) Определяне на специфичната сила на рязане k _c | 111 |
| г) определяне на момента от триене на калиброващо-деформи- | |
| ращата част | 112 |
| 5.1.2. Условия на експерименталните изследвания | |
| а) Изследвани инструменти | 113 |
| б) Металорежеща машина и измервателни инструменти | 114 |
| в) Динамометрична уредба | 114 |
| г) Заготовки и материал на заготовките | 119 |
| д) Измервания | 120 |
| е) Мазане и охлаждане | 121 |
| 5.2. Резултати от експерименталните изследвания | |
| 5.2.1. Определяне на специфичната сила $k_{c_{yc}}$ и на коефициента K_{M} | 121 |
| 5.2.2. Определяне влиянието на параметрите на плашката брой | |
| гребени z, установъчен ъгъл κ_r и преден ъгъл γ_p върху специ- | |
| фичната сила на рязане k _c | 125 |
| 5.2.3. Разпределение на натоварването на инструмента по работни | |
| елементи | |
| а) Натоварване на режещата част | 130 |
| б) Натоварване от деформиращите навивки на плашката | 131 |
| 5.2.4. Качествени параметри на нарязваните резби | 138 |
| 5.3. Заключение за пета част | 141 |
| ПРИНОСИ | |
| Литература | |