

Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 52'2016 (29-44)

РАЗРАБОТВАНЕ НА СПЕЦИАЛИЗИРАН ТЕХНОЛОГИЧЕН СОФТУЕР (ЕЛЕКТРОНЕН СПРАВОЧНИК) ЗА ПОТРЕБИТЕЛИТЕ НА НОВА ТЕХНОЛОГИЯ, РЕАЛИЗИРАЩА МЕТОДА СФЕРИЧНО ДОРНОВАНЕ

DEVELOPING A SPECIALIZED TECHNOLOGICAL SOFTWARE (ELECTRONIC GUIDE) FOR THE USERS OF NEW TECHNOLOGY, REALIZING THE SPHERICAL MANDRELLING METHOD

Галя Дунчева^{*} ТУ- Габрово

Милка Атанасова

ТУ- Габрово

Иван Амуджев ТУ- Габрово

Статията е постъпила на 01 октомври 2015 г.; приета за отпечатване на 18 януари 2016 г.

Abstract

This article presents a Specialized Technological Software (Electronic Guide) for the users of a new hardening technology, implementing the "Spherical mandrelling" method. This method belongs to the methods for finishing mashining of holes through surface plastic deformation. The algorithm for conducting of the calculating procedure is based on: the results from planned experiment under production conditions and subsequent two-objective optimization of the process; finite-element study based on a generalized "pseudo" 2D model of the process. This model is developed on the basis of a combined theoretical and experimental approach in order to model the axial force and the rotating moment. The potential of the Specialized Technological Software is demonstrated by concrete examples.

Keywords: surface plastic deformation, spherical mandrelling, specialized technological software, optimization, generalized finine element model

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Доминираща тенденция в съвременното индустриално производство е създаването на нови технологии, целящи повишаване на срока на експлоатация и сигурността на техническите изделия в условията на намалени енергийни разходи. Като цяло, обект на такива разработки са конструкционните елементи, подложени на динамични натоварвания и/или на контактно взаимодействие, съпроводено с относително движение. Лимитиращият фактор, определящ якостния ресурс на конструкционните елементи в тези случаи, е процесът на възникване и развитие на пукнатини в зоните с естествени концентратори на напрежение. Едни от най-широко разпространените естествени концентратори са скрепителните и конструктивни отвори.

В инженерната практика съществуват две основни групи методи за обработване на отвори посредством пластично деформиране: методи, целящи повишаване на качеството само на повърхностния слой [1, 2] и методи, реализиращи студена обемна пластична деформация (*cold expansion*) [3-5]. Последните осигуряват подълбока зона с полезни остатъчни напрежения на натиск около отворите, но изискват специално оборудване и висок енерго-силов разход.

На основа на проведения анализ и синтез на методите за довършващо обработване на отвори чрез повърхностно пластично деформиране (ППД) в [6] е обосновано, че методът "Сферично дорноване" (СД) позволява да се комбинират полезните ефекти от ППД и "cold working" в условията на конвенционално машиностроително оборудване – следствие от специфичната кинематика на метода. Деформиращият елемент със сферична работна повърхнина извършва сложно движение по отношение на неподвижна заготовка -суперпозиция от сферично движение и праволинейна транслация по направление на оста на обработвания отвор (фиг. 1). За реализирането на метода в практиката, освен подходящи устройства, снабдени със съответните деформиращи елементи, е необходимо и да се конкретизират технологичните и геометрични параметри на процеса с оглед постигане на оптимално съчетание на качествените характеристики на обработваните отвори и необходимите енерго-силови параметри на процеса.



Фиг. 1. Кинематична схема на метода СД

^{*} Тел.: 066 827 312; e-mail: duncheva@tugab.bg

ISSN 1310-6686© 2016 Известия на Технически университет Габрово

Липсата на систематизирана информация за посочените параметри, отнесена към конкретен обработваем материал, практически ограничават възможността за приложение на метода СД в машиностроителната практика. В настоящата статия се представя Специализиран технологичен софтуер (Електронен справочник), предназначен за потребителите на новата уякчаваща технология за обработване на отвори, реализираща метода СД.

2. КОНЦЕПЦИЯ И АЛГОРИТЪМ ЗА РАЗРАБОТ-ВАНЕ НА СПЕЦИАЛИЗИРАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕН СОФТУЕР

Специализирания технологичен софтуер е насочен към постигане на следните основни цели:

• Да презентира и популяризира новата уякчаваща технология, реализираща метода СД в машиностроителния бранш;

• Да улесни в максимална степен потребителите на новата уякчаваща технология, предоставяйки им необходимата информация за процеса СД и параметрите на качеството на обработваните отвори.

В съответствие с посочените цели концепцията за разработване на Електронния справочник е развита на основа на структура, съдържаща два основни модула:

Информационният модул запознава потребителите с основните характеристики на новата уякчаваща технология, областта й на приложение, разработената инструментална екипировка и условия за техническа реализация и постигнатите характеристики на качеството на обработените отвори.

Изчислителният модул се базира върху алгоритъма,

показан на фиг. 2. Необходимата информация за изпълнение на изчислителната процедура в съответствие с представения алгоритъм се генерира от:

• Резултатите от планиран експеримент, проведен в производствени условия и последваща двуцелева оптимизация на процеса СД;

• Провеждане на планиран числен експеримент на основа на "псевдо" 2D крайно-елементен модел на процеса.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСА СД В ПРОИЗВОДСТВЕНИ УСЛОВИЯ 3.1. Постановка на експерименталното изследване

Анализирайки приложенията на динамично натоварени конструкционни елементи с отвори, са избрани пет вида материали с жилаво-пластично поведение:

- Ниско-въглеродна стомана С20 БДС EN 10084:2000;
- Ниско-легирана конструкционна стомана 37Сг4 БДС EN 10083:2000;
- Алуминиева сплав D16T ISO 209-1:2010;
- Бронз CuAl9Fe3 БДС EN 10092-75;
- Месинг CuZn20Al2 БДС EN 10092-75.

Проведеното експериментално изследване цели да се оптимизира процеса СД, като за всеки вид материал се определят:

- Оптималните стойности на технологичните параметри на процеса: $n_e, tr / min$ и f, mm / tr;
- Оптималната стегнатост i_{opt} .

За тази цел е синтезиран ротатабилен оптимизационен план с три управляващи фактора. В табл. 1 са представени техните нива в натурални и кодирани стойности.





Таблица 1 Управляващи фактори и техните нива Управляващи фактори Нива на факторите Честота на въртене Натурални 63 160 315 500 630 x_1 ne,tr / min -1,73 0 1,73 -1 Кодирани 0,155 0,05 0,3 0,444 0,55 Подаване за оборот Натурални x_2 f.mm/tr-1.73 -1 0 1.73 Кодирани 1 0,25 0,05 0,134 0,366 0,45 Натурални Номинална стегнатост *x*₃ -1,73 -1 0 1 1.73 i. mm Кодирани

Планът на експеримента и нивата на управляващите фактори в кодирани стойности са показани в табл. 2.

| План н | План на експеримента | | | ца 2 |
|--------|----------------------|------------|-----------------------|------------|
| | N₂ | <i>x</i> 1 | <i>x</i> ₂ | <i>x</i> 3 |
| | 1 | -1 | -1 | 1 |
| | 2 | 0 | -1 | 0 |
| | 3 | 1 | -1 | -1 |
| | 4 | -1 | 0 | 0 |
| | 5 | 0 | 0 | 0 |
| | 6 | 1 | 0 | 0 |
| | 7 | -1 | 1 | -1 |
| | 8 | 0 | 1 | 0 |
| | 9 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | -1,73 | 0 | 0 |
| | 11 | 1,73 | 0 | 0 |
| | 12 | 0 | -1,73 | 0 |
| | 13 | 0 | 1,73 | 0 |
| | 14 | 0 | 0 | -1,73 |
| | 15 | 0 | 0 | 1,73 |

За целите на експерименталното изследване са изработени експериментални образци тип "втулка" (фиг. 3). Последните са с постоянен външен диаметър d_1 и височина h и променлив диаметър на отвора d_o , вариращ в диапазона 14,565÷14,965 mm за осигуряване на различна номинална стегнатост.



Фиг. 3. Геометрия на образците

За определяне на оптималните технологични параметри на процеса СД и оптималната стегнатост е формулирана и решена двуцелева оптимизационна задача. Приема се, че оптимални режими и оптимална стегнатост са тези, при които се изключват максимални натоварвания на техническото оборудване и се осигурява получена грапавост на обработваните отвори, близка до минималната за съответния вид материал. На тази база целевите функции са:

- Y_{Ra} получената грапавост, измерена по Ra, µm.
- Ура-измерена максимална стойност на осовата

сила Pa_{max} , N;

Използвано е техническо оборудване (фиг. 4), адаптирано за работа върху конвенционална фрезова машина. То съдържа механична част (фиг. 4б, 4в) и измервателна част, която в реално време осъществява трансфер и обработване на информацията за измерената осова сила от динамометъра през индуктивен сензор, инструментален усилвател, USB-DAQ платка до персонален компютър.



а) Техническо оборудване

1- конвенцинална фрезова ма-

шина; 2- устройство за СД; 3-

механична част; 4- измервател-

на част



б) Механична част
 1- подложна шайба;
 2- втулка; 3 пружина;4- винт; 5 закрепваща планка; 6 опора; 7- колонки; 8 динамометър



 в) Устройство за СД
 Фиг. 4. Опитна установка за провеждане на експерименталните изследвания в производствени условия

3.2. Моделиране на осовата сила и получената грапавост след СД

За всеки изследван материал, посредством програмния продукт QStatLab [7] са изведени регресионните модели за осовата сила и грапавостта. Същите са показани съответно в табл. 3 и табл. 4.

| | • • • |
|---------------------|---|
| Материал | Регресионен модел |
| Стомана С20 | $Pa = 7354,084 + 24,715x_1 + 292,553x_2 + 3349,962x_3 + 103,274x_2^2 - 102,933x_3^2 - 61,955x_1x_2 - 213,682x_2x_3^2 + 165,608x_1x_2x_3 - 22,479x_1x_2^2$ |
| Стомана 37Cr4 | $\begin{split} P_a &= 7881,276 + 417,294x_1 + 166,130x_2 + 687,251x_3 - 133,925x_2^2 - 68,382x_3^2 - \\ &- 143,109x_1^3 + 1836,569x_1x_2 - 1599,640x_2x_3 - 282,603x_1x_2x_3 \end{split}$ |
| Бронз СиАl9Fe3 | $P_a = 6948,418 + 128.591x_1 + 740,311x_2 + 3196,139x_3 - 256,017x_1^2 - 437,726x_2^2 - 360,943x_3^2 - 981,314x_1x_2 - 293,861x_2x_3 - 458,266x_1x_3$ |
| Mecuнг CuZn20Al2 | $P_a = 5112,710 + 65,489x_1 + 31,437x_2 + 2502,292x_3 - 156,471x_1^2 - 109,828x_2^2 - 203,016x_3^2 + 43,651x_1x_2 + 83,620x_1x_3$ |
| Ал. сплав D16T | $P_a = 9770,031 + 1389,534x_2 + 5015,306x_3 - 526,060x_1^2 - 743,369x_2^2 - 1278,795x_1x_2 + 929,334x_2x_3$ |

Регресионни модели за моделиране на осовата сила Таблица 3

G. Duncheva, M. Atanasova, I. Amudzhev / Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 52'2016 (29-44)

| | \mathbf{I} | | |
|---------------------|---|--|--|
| Материал | Регресионен модел | | |
| Стомана С20 | $\begin{split} R_a &= 0,375 + 0,125x_1 + 0,062x_2 + 0,132x_3 + 0,085x_2^2 + 0,053x_3^2 - 0,038x_1^3 + \\ &+ 0,024x_1x_2 - 0,037x_2x_3 - 0,056x_1x_3 - 0,042x_1x_2x_3 \end{split}$ | | |
| Стомана 37Cr4 | $R_a = 0,312 + 0,059x_1 + 0,040x_3 - 0,014x_1^2 + 0,055x_2^2 + 0,058x_3^2 - 0,019x_1^3 - 0,007x_2^3 - 0,006x_3^3 + 0,031x_1x_3 + 0,015x_2x_3 - 0,020x_1x_2x_3$ | | |
| Бронз CuAl9Fe3 | $R_a = 0,451 - 0,013x_1 + 0,096x_2 - 0,133x_3 - 0,053x_1^2 - 0,026x_2^2 + 0,059x_3^2 + 0,185x_1x_2 + 0,010x_2x_3 - 0,129x_1x_3$ | | |
| Месинг CuZn20Al2 | $R_a = 0,451 - 0,014x_1 + 0,066x_2 - 0,046x_3 - 0,061x_1^2 - 0,023x_2^2 - 0,024x_3^2 + 0,021x_1x_2 - 0,049x_2x_3 - 0,056x_1x_3$ | | |
| Ал. сплав D16T | $R_a = 0,687 + 0,108x_1 + 0,091x_2 - 0,078x_1^2 - 0,103x_2^2 - 0,086x_3^2 + 0,158x_1x_2 - 0,155x_2x_3$ | | |

Регресионни модели за моделиране на грапавостта Таблица 4

За изследване влиянието на технологичните параметри върху осовата сила и получената грапавост за всеки материал са визуализирани сечения на хиперповърхнината на модела за различни стойности на стегнатостта. На фиг. 5 и фиг. 6 е представено влиянието на технологичните параметри и стегнатостта за стомана 37Cr4, а в [8]- за месинг.

Оптималните технологични параметри на процеса и оптималната стегнатост са определени, като са взети предвид следните аргументи:

• Реализирането на процеса СД с относително голяма номинална стегнатост *i*, *mm* за всички изследвани материали води до значителни осови сили и до относително по-големи грапавости. Следователно, от гледна точка на минимизиране на енерго-силовия разход и получената грапавост, е целесъобразно процесът да се реализира с по-малка стегнатост.

• Влиянието на технологичните параметри върху осовата сила и получената грапавост има различен характер за различните материали. От тази гледна точка е целесъобраз но изборът на оптималните стойности за $n_e, tr/min$ и f, mm/rev да се направи за всеки материал на база на обследване на графиките, визуализиращи сечения на хиперповърхнината на изведените регресионни модели за осовата сила и получената грапавост с различни хиперравнини. Приема се, че резултатите, получени за всеки от петте вида изследвани материали, могат да се отнесат и за друг вид материал, чието механично поведение в еластичната и пластична области е близко.

• Тъй като една и съща номинална стегнатост, отнесена към различен номинален диаметър на отвора, води до различна степен на студено разширение, респ. до различна окръжна линейна деформация за точките от повърхнината на отвора, е целесъобразно оптималната номинална стегнатост *iopt* за всеки материал да се изрази като функция на номиналния диаметър.

Отчитайки посочените аргументи за всеки вид материал в табличен вид (табл. 5) са дадени оптималните стойности на технологичните параметри на процеса и формули, дефиниращи оптималната стегнатост.



Фиг. 5. Влияние на технологичните параметри и стегнатостта върху осовата сила за стомана 37Сr4



Фиг. 6. Влияние на технологичните параметри и стегнатостта върху получената грапавост за стомана 37Cr4

| Оптимални технологични параметри и оптимална стегнатост Таблица 5 | | | | | |
|---|---------------------------|---------------------------|---|--|--|
| | Оптимални технол | Определяне на оптималната | | | |
| Вид обработван материал | n _e , tr / min | f,mm/rev | стегнатост i _{opt} = i _{opt} (d), mm | | |
| Бронз | 500 | 0,15 | $i_{opt} = 0,011 d$ | | |
| Месинг | 500 | 0,15 | $i_{opt} = 0,008 \ d$ | | |
| Алуминиева сплав | 500 | 0,15 | $i_{opt} = 0,009 \ d$ | | |
| Нисковъглеродна конструкционна стомана | 160 | 0,3 | $i_{opt} = 0,006 \ d$ | | |
| Средновъглеродна конструкционна/легирана стомана | 500 | 0,25 | $i_{opt} = 0,008 \ d$ | | |

4. КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСА СД

4.1. Теоретико-експериментален подход за определяне на осовата сила и въртящия момент на процеса СД

При метода СД на отвори, инструментът осъществява сложно движение, което е суперпозиция от сферично движение с абсолютна ъглова скорост $\vec{\omega}_a$, и праволинейна транслация по оста на заготовката със скорост \vec{v}_f , при което ъгълът между двата вектора е: $\prec (\vec{\omega}_a, \vec{v}_f) = 90^0 \pm \theta^0$. Тъй като движението е равномерно, може да се разглежда момента от време, в който моментната ос на ротация лежи върху оста Oy' от подвижната координатна система, свързана неподвижно с инструмента (фиг.7).

Движението на инструмента също може да се представи като моментно винтово с ъглова скорост $\vec{\omega}_a$ извършвано около моментната винтова ос със скорост на

хлъзгане $\vec{v}_f^* = \frac{f\omega_e sin\theta}{2\pi}$, mm/s. Тя от своя страна лежи в равнина Ox'y' и разделя екватора на инструмента на две зони, определени от дъгите A_IBC_I и C_IDA_I . Те се въртят около оста Oz' с преносна ъглова скорост $\vec{\omega}_e$.



Фиг. 7. Схема за разпределение на интензивностите на технологичните съпротивления върху инструмента

Контактната повърхнина между инструмента и заготовката е функция от стегнатостта i_n , изразена с разликите в диаметрите на инструмента и предварително обработения отвор. Тази контактна повърхнина представлява част от тороидална повърхнина с ос на симетрия Oz', а технологичното съпротивление е повърхнинно разпределен товар по нея. Извършва се редукция на този товар към екватора на инструмента. Ако се вземат под влияние проекцията на редуцираното по екватора технологично съпротивление, остта на инструмента Oz' и дъгите по екватора, могат да се изразят две интензивности: $q_1(\alpha)$ и $q_2(\alpha)$. Първата е проекцията на интензивността на редуцираното към екватора технологично съпротивление по оста Oz' от дъгата A_IDC_I , а втората е проекцията на интензивността на технологичното съпротивление срещу оста Oz' от дъгата A_IBC_I . Ъгълът между \vec{q}_1 и \vec{v}_f е равен на ъгъла на нутация, а ъгълът между \vec{q}_2 и \vec{v}_f е равен на $90^o + \theta^o$. Съществува разлика в големините на двете интензивности поради това, че при движение на инструмента по оста на отвора са налице еластично-пластични деформации, а при обратен ход се наблюдават само еластични деформации. Следователно е в сила зависимостта: $q_1(\alpha) > q_2(\alpha)$.

Равнодействащите на двата разпределени товара са съответно \vec{Q}_1 и \vec{Q}_2 и лежат в равнина, съдържаща оста на инструмента и се определят по следния начин:

$$Q_{I} = D \int_{0}^{\frac{\pi}{2} + \alpha_{0}} \int_{0}^{\frac{\pi}{2} - \alpha$$

където:

$$\alpha_0 = \arcsin\frac{2\ell}{D} = \arcsin\frac{f}{\pi \, D t g \theta} \,. \tag{2}$$

 \vec{Q}_{1} и \vec{Q}_{2} , се редуцират в центъра на инструмента т.О в главен вектор \vec{Q} и главен момент \vec{M}_{a} , чийто големини са:

$$Q = D \begin{pmatrix} \frac{\pi}{2} + \alpha_0 & \frac{\pi}{2} - \alpha_0 \\ \int & q_1(\alpha) d\alpha - \int & q_2(\alpha) d\alpha \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$
(3)

$$M_{a} = D \begin{pmatrix} \frac{\pi}{2} + \alpha_{0} & \frac{\pi}{2} - \alpha_{0} \\ x'_{c_{I}} \int_{0}^{1} q_{I}(\alpha) d\alpha + x'_{c_{2}} \int_{0}^{1} q_{2}(\alpha) d\alpha \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \qquad (4)$$

където: x'_{c_i} са центровете на тежестта на нехомогенните дъги $A_I D C_I$ и $A_I B C_I$.

Векторът *M_a* е перпендикулярен на оста на инструмента и се върти около тази ос с ъглова скорост.

Връзката между силовите параметри на процеса (въртящият момент M_{e} , приложен върху машинното вретено и осовата сила P_{a} , приложена върху тялото на устройството) с главните вектор и момент съответно \overline{Q}

и \hat{M}_a върху оста Oz на заготовката, може да се изрази по следния начин:

$$P_a = Q\cos\theta \tag{5}$$

$$M_e - M_a \sin \theta$$

За изразите (5) и (6) се взима под внимание, че големината на необходимата за реализиране осова сила е равна на големината на проекцията на главния вектор \vec{Q} и големината на въртящия момент \vec{M}_{6} , която е равна на големината на проекцията на главния момент \vec{M}_{a} върху оста на заготовката.

Следователно, за определяне големините на енергосиловите параметри на процеса, е необходимо да се познават интензивностите на технологичните съпротивления \vec{q}_1 и \vec{q}_2 .

С цел експериментално да се определят неизвестните интензивности \overline{q}_1 и \overline{q}_2 се приема, че те са постоянни по дъгите A_IDC_I и A_IBC_I , защото ъгълът θ е малък ($\theta = 2^o$). Следователно стегнатостта по всяка от дъгите е практически постоянна. Работи се с осреднените стойности на функциите (осреднени специфични технологични съпротивления) $q_1(\alpha)$ и $q_2(\alpha)$, които са:

$$\overline{q}_{i} = \frac{\frac{\pi}{2} \pm \alpha_{0}}{\frac{\int q_{i}(\alpha) d\alpha}{\frac{\pi}{2} \pm \alpha_{0}}}, \quad i = 1, 2, \qquad (5)$$

като знакът "+" съответства на i = l.

Координатите x'_{C_i} на центровете на тежестта на хомогенните дъги $A_I D C_I$ и $A_I B C_I$ са :

$$x'_{c_i} = 0.5 D \frac{\cos \alpha_0}{\frac{\pi}{2} \pm \alpha_0},\tag{6}$$

като знакът "+" съответства на i = l.

На тази база са получени аналитичните модели за осовата сила P_a и въртящия момент M_b , изразени чрез осреднените специфични технологични съпротивления $\bar{q}_1(\alpha)$ м $\bar{q}_2(\alpha)$:

$$P_a = D\left[\overline{q}_1\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0\right) - \overline{q}_2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0\right)\right]\cos\theta; \qquad (7)$$

$$M_e = D^2 (\overline{q}_1 + \overline{q}_2) \cos \alpha_0 \sin \theta .$$
(8)

Представеният комбиниран подход е приложен в разработване на обобщен 2D крайно-елементен модел на процеса СД. В съответствие с него реалният процес е апроксимиран с два последователни процеса на деформиране само с транслационно движение. Това осигурява значителна редукция на изчислителното време в сравнение със симулирането на реалния процес, за който е необходим сложен 3D модел [9].

4.2. Постановка на крайно-елементното изследване

Крайно-елементното (КЕ) изследване на процеса СД е насочено към решаване на следните основни задачи:

• Изследване и моделиране на осовата сила на процеса за относително по-широки граници на параметрите му в сравнение с експеримента в производствени усло-

вия.

• Изследване влиянието на параметрите на процеса върху разпределението на остатъчните напрежения около обработените отвори;

• Изследване и моделиране на остатъчните премествания с оглед на оценка на отклонението от идеална цилиндричност.

За решаване на посочените задачи е проведен планиран числен експеримент, базиран върху оптимален композиционен план с четири фактора (стегнатост *i*; параметъра C_r ; относителната височина \overline{h} и диаметър на сферата D) на по три нива. Управляващите фактори и техните нива са показани в табл. 6, а планът на експеримента в табл. 7.

| | Управляващи фактори Таблица 6 | | | | | |
|--|--------------------------------------|-----------|--------|--------|-------|--|
| Управляващи фактори | | | Нива н | а факт | юрите | |
| x_I | Стегнатост | Натурални | 0,05 | 0,2 | 0,35 | |
| | i,mm | Кодирани | -1 | 0 | +1 | |
| <i>x</i> ₂ | Безразмерен | Натурални | 1,5 | 3 | 4,5 | |
| | $C_r = d_l/d_o$ | Кодирани | -1 | 0 | +1 | |
| <i>x3</i> | Диаметър на деформиращия | Натурални | 10 | 20 | 30 | |
| елемент D,тт | | Кодирани | -1 | 0 | +1 | |
| × 4 | Относителна височина на | Натурални | 0,5 | 1 | 1,5 | |
| л4 | отвора $\overline{h} = h/d_o$ | Кодирани | -1 | 0 | +1 | |
| Забележка: <i>d_o</i> е диаметър на предварително пробития отвор в | | | | | | |
| заготовката: <i>d</i> ₁ - външен диаметър на заготовката: <i>h</i> - височина | | | | | | |

на заготовката

| | Плаг | і на експер | лимента | 1 аолица |
|-----------------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| $\mathcal{N}_{\mathcal{O}}$ | <i>x</i> 1 | <i>x</i> ₂ | <i>x</i> 3 | <i>x</i> ₄ |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | -1 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | -1 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | -1 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | -1 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | -1 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | +1 |
| 10 | +1 | -1 | -1 | +1 |
| 11 | -1 | +1 | -1 | +1 |
| 12 | +1 | +1 | -1 | +1 |
| 13 | -1 | -1 | +1 | +1 |
| 14 | +1 | -1 | +1 | +1 |
| 15 | -1 | +1 | +1 | +1 |
| 16 | +1 | +1 | +1 | +1 |
| 17 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| 18 | 0 | +1 | +1 | +1 |
| 19 | -1 | 0 | -1 | -1 |
| 20 | +1 | 0 | +1 | +1 |
| 21 | -1 | -1 | 0 | -1 |
| 22 | +1 | +1 | 0 | +1 |
| 23 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| 24 | +1 | +1 | +1 | 0 |

Π

4.3. Обобщен "псевдо" 2D крайно-елементен модел

Разработеният 2D крайно-елементен модел е съставен от два деформиращи елемента, заготовка и опора (фиг. 8). Използвани са ососиметрични крайни елементи тип CAX4R, а процесът е симулиран в две последователни стъпки, съответстващи на транслационните премествания на двата деформиращи елемента. Осовите сили от двата хода са намерени като реакции в т. нар "reference point" (RP1 и RP2) на моделите на двата деформиращи елемента.

Граничните условия са дефинирани чрез указани премествания на RP1 и RP2.



Фиг. 8. Обобщен крайно-елементен модел

4.4. КЕ резултати за технологичните съпротивления и осовата сила

На база на резултатите, получени от планирания числен експеримент са съставени регресионни модели осреднените технологични съпротивления на $\overline{q}_1 = \overline{q}_1(i, C_r, \overline{h}, D)$ и $\overline{q}_2 = \overline{q}_2(i, C_r, \overline{h}, D)$:

$$\overline{q_i} = b_0 + b_1 . x_1 + b_2 . x_2 + b_3 . x_3 + b_4 . x_4 + b_5 . x_1 . x_2 + b_6 . x_2 . x_3 + b_7 . x_3 . x_4 + b_8 . x_1 . x_3 + b_9 . x_1 . x_4 + b_{10} . x_2 . x_4 + b_{11} . x_1 . x_2 . x_3 + b_{12} . x_1 . x_2 . x_4 + b_{13} . x_1 . x_3 . x_4 + b_{14} . x_2 . x_3 . x_4 + b_{15} . x_1 . x_2 . x_3 . x_4$$

$$(9)$$

Коефициентите им за петте изследвани материала са показани в табл. 8.

За определяне на осовата сила на процеса СД е използвана зависимост (7), като са приети следните постоянни параметри: диаметър на деформиращата сфера D=15,575mm; подаване за оборот f=0,3mm/tr и ъгъл на нутация $\theta = 2^{\circ}$.

На фиг. 9 са представени КЕ резултати за изменение на осовата сила във функция от псевдовремето за I и II преход за два материала (стомана С20 и бронз CuAl9Fe3) в произволно избрани точки от плана на експеримента с номера: 1, 2, 9 и 18.

За оценка на адекватността на КЕ резултати е направено сравнение с такива, получени от експеримент на процеса СД в лабораторни условия [10] за точка извън плана на експеримента. Наблюдават се относително малки разлики (не повече от 500N), дължащи се на изменението на коефициента на триене по време на процеса СД.

| | Коефициенти от регресионни модели Таблица | | | | | Габлица 8 | | | | |
|------------------------|---|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| Vaah | Стома | на С20 | 370 | Cr4 | CuAl | 9Fe3 | CuZn | 20Al2 | DI | '6T |
| κοεφ. | \overline{q}_{I} | \overline{q}_2 | \overline{q}_{I} | \overline{q}_2 | \overline{q}_{I} | \overline{q}_2 | \overline{q}_{I} | \overline{q}_2 | \overline{q}_{I} | \overline{q}_2 |
| b_o | 200,283 | 63,091 | 426,735 | 142,563 | 139,775 | 71,383 | 137,484 | 68,894 | 103,738 | 50,044 |
| b_I | 140,022 | 36,855 | 340,387 | 91,337 | 108,684 | 51,105 | 115,934 | 50,582 | 92,668 | 39,225 |
| b_2 | 82,538 | 36,792 | 167,502 | 63,674 | 51,916 | 42,256 | 54,231 | 38,634 | 42,482 | 24,409 |
| b_3 | 44,075 | 21,562 | 62,211 | 38,422 | 22,204 | 17,464 | 11,269 | 18,016 | -5,301 | 8,405 |
| b_4 | 55,584 | 29,906 | 115,130 | 44,212 | 30,818 | 29,774 | 40,786 | 32,551 | 26,329 | 17,510 |
| b_5 | 74,822 | 29,754 | 159,355 | 52,712 | 47,561 | 37,746 | 50,953 | 34,598 | 41,890 | 23,257 |
| b_6 | 9,339 | 9,680 | 6,900 | 11,220 | 3,994 | 5,379 | -2,039 | 5,556 | -10,262 | -0,438 |
| b_7 | 16,167 | 13,397 | 21,509 | 12,849 | 10,929 | 10,443 | 3,845 | 14,804 | -4,208 | 1,900 |
| b_8 | 36,849 | 16,907 | 70,952 | 35,546 | 26,309 | 18,879 | 17,050 | 19,493 | -1,329 | 10,495 |
| b_9 | 59,010 | 26,891 | 127,736 | 42,327 | 32,569 | 29,790 | 40,657 | 29,800 | 28,653 | 18,440 |
| b_{10} | 31,720 | 21,169 | 67,682 | 31,735 | 14,226 | 18,915 | 22,478 | 23,474 | 15,740 | 12,721 |
| b_{II} | 3,458 | 7,911 | 4,887 | 6,101 | -0,342 | 4,709 | -2,943 | 4,679 | -9,142 | -0,265 |
| b_{12} | 36,887 | 20,355 | 80,553 | 30,806 | 16,440 | 20,034 | 22,694 | 21,991 | 17,833 | 13,440 |
| b_{13} | 11,305 | 11,295 | 16,392 | 8,414 | 5,363 | 8,207 | -1,213 | 11,648 | -4,335 | 1,707 |
| b_{14} | 1,926 | 6,932 | -4,340 | 5,006 | 1,062 | 1,983 | -4,866 | 7,909 | -9,131 | -2,039 |
| <i>b</i> ₁₅ | -2,019 | 4,994 | -7,169 | 0,753 | -3,072 | -0,319 | -8,426 | 4,881 | -8,011 | -1,222 |











Бронз СиА19Fe3

Фиг. 9. Изменение на осовата сила във функция от псевдовремето за I и II преход

4.5. КЕ резултати за остатъчните напрежения

На фиг. 10 са посочени графичните зависимости на разпределението на σ_t^{res} около отвора в четири равнини (сечения), перпендикулярни на оста на отвора: entrance face- челната повърхнина на заготовката, съответстваща на страната на отвора, през която деформиращия елемент влиза в отвора; middle plane-равнината на симетрия на заготовката, перпендикулярна на оста на отвора, известна като средна равнина; *exit face*-противоположната на *entrance* челна повърхнина на за готовката, която контактува с опората; *max*-равнината, перпендикулярна на оста на отвора, в която възниква най-голямото по абсолютна стойност остатъчно окръжно напрежение на натиск.

В някои експериментални точки тази равнина съвпада със средната равнина или с тази на изхода. Избрани са произволни точки от плана на експеримента с номера: 1,4,7 и 22.





Фиг. 10. Крайно- елемнтни резултати за разпределението на остатъчните напрежения

По абцисата координатната система е нанесена координатата, мерена от ръба на отвора. По ординатата са нанесени стойностите на остатъчните окръжни нормални напрежения в MPa.

В специализирания технологичен софтуер, остатъчните окръжни нормални напрежения са изчислени за точките от повърхнината на отвора по средната равнина и изобразени в графичен вид (фиг. 11) със следните параметри: σ_0 - напрежение с нулева големина; σ_{max} - максимално по абсолютна стойност натисково остатъчно напрежение; a_1 и a_2 - разстояния, измерени в радиално направление от ръба на отвора, за които се регистрират съответно σ_{max} и σ_0 .



Фиг. 11. Схема на параметрите, дефиниращи полето на остатъчните напрежения

За всички изследвани материали са изведени регресионни модели за параметрите на полето на остатъчните окръжни нормални напрежения, показани в табл. 9. Регресионни модели за параметрите на полето на остатъчните напрежения Таблица 9

| Материал | Регресионни модели за параметрите на полето на остатъчните окръжни нормални напрежения |
|-------------------|---|
| Стомана С20 | $a_{I} = 1.036 + 0.442x_{I} + 0.478x_{2} + 0.258x_{3} + 0.234x_{4} + 0.355x_{I}x_{2} + 0.124x_{2}x_{3} - 0.051x_{3}x_{4} + 0.113x_{I}x_{3} + 0.173x_{I}x_{4} + 0.089x_{2}x_{4}$ |
| | $\begin{array}{l} a_2 = 3.106 + 1.409 x_1 + 1.140 x_2 + 1.139 x_3 + 0.383 x_4 + 0.797 x_1 x_2 + \\ + 0.420 x_2 x_3 + 0.111 x_3 x_4 + 0.518 x_1 x_3 + 0.488 x_1 x_4 + 0.148 x_2 x_4 \end{array}$ |
| | $\sigma_0 = -74.306 - 28.565x_1 - 6.121x_2 - 0.343x_3 + 2.824x_4 - 14.403x_1x_2 + 3.222x_2x_3 - 5.653x_3x_4 - 3.503x_1x_3 - 5.028x_1x_4 + 4.447x_2x_4$ |
| | $\sigma_{max} = -212.688 - 3.706x_1 - 7.928x_2 - 10.206x_3 + 2.516x_4 - 4.862x_1x_2 - 7.412x_2x_3 + 0.988x_3x_4 - 8.438x_1x_3 - 13.463x_1x_4 - 7.688x_2x_4$ |
| | $a_{I} = 0.531 + 0.374x_{I} + 0.153x_{2} + 0.243x_{3} + 0.106x_{4} + 0.116x_{I}x_{2} + 0.022x_{2}x_{3} - 0.077x_{3}x_{4} + 0.240x_{I}x_{3} + 0.106x_{I}x_{4} + 0.081x_{2}x_{4}$ |
| Стомана | $ a_2 = 2.116 + 1.481x_1 + 0.852x_2 + 0.659x_3 + 0.337x_4 + 0.705x_1x_2 + 0.244x_2x_3 + 0.213x_3x_4 + 0.729x_1x_3 + 0.368x_1x_4 + 0.184x_2x_4 $ |
| 37Cr4 | $ \sigma_0 = -411.014 - 117.389x_1 - 17.667x_2 + 61.056x_3 + 50.500x_4 + 8.431x_1x_2 + 34.131x_2x_3 - 41.819x_3x_4 - 71.769x_1x_3 - 16.519x_1x_4 - 42.119x_2x_4 $ |
| | $\sigma_{max} = -585.618 - 173.438x_1 - 8.993x_2 + 102.618x_3 - 2.216x_4 - 42.890x_1x_2 - 22.015x_2x_3 - 58.540x_3x_4 - 103.965x_1x_3 - 43.165x_1x_4 - 1.715x_2x_4$ |
| | $a_1 = 0.790 + 0.437x_1 + 0.340x_2 + 0.287x_3 + 0.160x_4 + 0.244x_{1}x_2 + 0.142x_{2}x_3 - 0.019x_{3}x_4 + 0.272x_{1}x_3 + 0.106x_{1}x_4 + 0.128x_{2}x_4$ |
| Бронз | $a_2 = 2.420 + 1.332x_1 + 1.023x_2 + 0.775x_3 + 0.344x_4 + 0.753x_1x_2 + 0.406x_2x_3 + 0.244x_3x_4 + 0.651x_1x_3 + 0.364x_1x_4$ |
| CuAl9Fe3 | $\sigma_0 = -85.444 - 16.843x_1 - 3.899x_2 - 11.621x_3 + 4.657x_4 - 15.672x_1x_2 + 1.628x_2x_3 - 13.772x_3x_4 - 24.322x_1x_3 - 17.072x_1x_4 + 3.878x_2x_4$ |
| | $\sigma_{max} = -192.403 - 26.480x_1 - 9.647x_2 + 6.242x_3 - 5.703x_4 - 20.214x_1x_2 - 24.114x_2x_3 - 17.814x_3x_4 - 23.814x_1x_3 - 28.414x_1x_4 + 10.786x_2x_4$ |
| | $ a_1 = 0.625 + 0.446x_1 + 0.286x_2 + 0.170x_3 + 0.152x_4 + 0.234x_{1}x_2 + 0.068x_{2}x_3 - 0.084x_{3}x_4 + 0.181x_{1}x_3 + 0.127x_{1}x_4 + 0.082x_{2}x_4 $ |
| Месинг | $a_2 = 2.176 + 1.509x_1 + 0.813x_2 + 0.585x_3 + 0.352x_4 + 0.699x_1x_2 + 0.332x_2x_3 + 0.202x_3x_4 + 0.656x_1x_3 + 0.419x_1x_4 + 0.157x_2x_4$ |
| CuZn20Al2 | $\sigma_0 = -169.285 - 61.324x_1 + 14.121x_2 + 28.399x_3 + 17.510x_4 - 10.624x_1x_2 - 9.124x_2x_3 - 33.224x_3x_4 - 18.624x_1x_3 - 29.224x_1x_4 + 6.724x_2x_4$ |
| | $\sigma_{max} = -272.847 - 82.870x_1 + 3.685x_2 + 45.352x_3 - 29.886x_{1}x_230.111x_2x_3 - 44.336x_3x_4 - 51.811x_1x_3 - 24.361x_1x_4 - 5.661x_2x_4$ |
| Ал. сплав D16T | $a_1 = 0.482 + 0.303x_1 + 0.248x_2 + 0.263x_3 + 0.030x_4 + 0.186x_1x_2 + 0.137x_2x_3 + 0.117x_1x_3 + 0.121x_1x_4 + 0.042x_2x_4$ |
| | $a_2 = 2.645 + 0.682x_1 + 1.025x_2 + 1.172x_3 + 0.280x_4 + 0.292x_2x_3 + 0.680x_3x_4 - 0.121x_2x_4 + 0.880x_1x_4$ |
| | $\sigma_0 = -191.167 - 83.592x_1 - 18.925x_2 + 36.297x_3 + 23.631x_4 - 14.533x_1x_2 + 7.642x_2x_3 - 41.133x_3x_4 - 51.308x_1x_3 - 34.558x_1x_4 + 15.892x_2x_4$ |
| | $\sigma_{max} = -260.924 - 127.837x_1 - 15.225x_2 + 52.108x_3 + 13.219x_4 - 13.893x_1x_2 - 13.068x_2x_3 - 41.843x_3x_4 - 56.393x_1x_3 - 32.918x_1x_4 + 3.657x_2x_4$ |

4.6. Моделиране на точността на обработваните отвори

Изследването на точността на формата на обработените отвори се основава върху КЕ резултати за остатъчните радиални премествания. Изследвано е отклонението от идеална цилиндричност на отвора $\Delta_{cyl.}$. Очаквано, обработените отвори имат седлообразна форма – остатъчните радиални премествания са най-големи в близост до свободните челни повърхнини поради по-малката радиална коравина в тези напречни сечения.

Регресионните модели за Δ_{cyl} са получени на база на максималните остатъчни радиални премествания за входната страна на деформиращата сфера (табл. 10).

Определянето на диаметъра на деформиращата сферична част на инструмента се базира върху корелацията, съществуваща между остатъчните диаметрални премествания след СД и оптималната стегнатост, дефинирана за всеки материала (табл. 5). На основа на крайноелементните резултати, получени от проведения планиран числен експеримент, са изведени регресионни модели за остатъчните диаметрални премествания Δd . По този начин се отчита ефекта от еластичните (възвратимите) деформации след финализиране на процеса СД. Изведените регресионни модели са показани в табл. 11. Г. Дунчева, М. Атанасова, И. Амуджев / Известия на Технически университет Габрово, том 52'2016 (29-44)

| Регресионни | Регресионни модели за отклонението от цилиндричност Табица 10 | | |
|---------------------|--|--|--|
| Материал | Регресионен модел | | |
| Стомана С20 | $\begin{split} & \varDelta_{cyl} = 28,591 + 25,619x_1 + 1,847x_2 + 11,697x_3 + 7,275x_4 + 12,082x_1x_3 + \\ & + 7,989x_2x_3 + 5,349x_3x_4 + 6,914x_1x_4 + 9,097x_2x_4 \end{split}$ | | |
| Стомана 37Cr4 | $\begin{aligned} \Delta_{cyl} &= 19,171 + 18,359x_1 + 4,314x_3 + 2,776x_4 - 2,829x_1x_2 + \\ &+ 5,181x_2x_3 + 4,991x_3x_4 + 4,536x_1x_3 + 2,281x_1x_4 + 5,526x_2x_4 \end{aligned}$ | | |
| Бронз CuAl9Fe3 | $\begin{aligned} \Delta_{cyl} &= 31,053 + 25,495x_1 + 2,207x_2 + \\ &+ 8,448x_3 + 8,373x_4 + 9,768x_1x_3 + 9,287x_1x_4 \end{aligned}$ | | |
| Mecuнг CuZn20Al2 | $ \Delta_{cyl} = 35,790 + 27,126x_1 + 0,369x_2 + 3,498x_3 + 3,661x_4 - 7,932x_1^2 - 0,951x_1x_2 + 4,945x_2x_3 + 3,898x_3x_4 + 3,755x_1x_3 + 3,151x_1x_4 + 7,017x_2x_4 $ | | |
| Ал. сплав D16T | $ \Delta_{cyl} = 18,690 + 19,783x_1 + 1,855x_2 + 4,538x_3 + 4,699x_4 + 4,682x_1x_3 + 5,124x_2x_3 + 5,339x_3x_4 + 4,804x_1x_4 + 5,672x_2x_4 + 1,239x_1x_2 $ | | |

| Регр | Регресионни модели за ост. диам. премествания Таблица 11 | | |
|---------------------|--|--|--|
| Материал | Регресионен модел за остатъчните диам. премествания | | |
| Стомана С20 | $\Delta d = 0.147 + 0.131x_1 - 0.030x_2 - 0.017x_3 - 0.022x_4 - 0.024x_1x_2 - 0.017x_2x_4 - 0.015x_1x_4 - 0.010x_1x_3$ | | |
| Стомана 37Cr4 | $\Delta d = 0.133 + 0.126x_1 - 0.011x_2 - 0.021x_3 - 0.008x_4 - 0.009x_1x_2 + 0.004x_2x_3 - 0.014x_1x_3 - 0.011x_2x_4 - 0.003x_1x_4$ | | |
| Бронз CuAl9Fe3 | $\Delta d = 0.125 + 0.116x_1 - 0.031x_2 - 0.019x_3 - 0.024x_4 - 0.029x_1x_2 - 0.013x_2x_4 - 0.021x_1x_4$ | | |
| Mecuнг CuZn20Al2 | $\Delta d = 0.132 + 0.127x_1 - 0.021x_2 - 0.022x_3 - 0.020x_4 - 0.020x_{1x2} - 0.016x_{1x3} - 0.016x_{1x4}$ | | |
| Ал. сплав D16T | $\Delta d = 0.116 + 0.113x_1 - 0.011x_2 - 0.026x_3 - 0.011x_4 - 0.011x_1x_2 - 0.008x_2x_4 - 0.023x_1x_3 - 0.008x_1x_4$ | | |
| | | | |

5. ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ НА ИЗЧИСЛИТЕЛНАТА ПРОЦЕДУРА

На фиг. 12 е дадена блок-схемата на последователността при изпълнение на изчислителната процедура на Специализирания технологичен софтуер.



Фиг.12. Блок-схема на изчислителния модул

Изчислителната процедура се захранва от въведената информация в три последователни и логически

свързани стъпки. За активиране (и подсещане за активиране) на съответната стъпка се предвижда визуализация посредством динамичен маркер.

Работи се в следната последователност:

Стъпка 1: Избор на обработвания материал от 5 алтернативни групи материали с жилаво- пластично поведение.

Предвижда се визуализация в табличен вид на различни видове марки материали, чиито механични характеристики в най-голяма степен се доближават до изследваните материали като типични представители на всяка основна материална група;

Стъпка 2: Избор на детайл и въвеждане на необходимите геометрични параметри;

Потребителят има възможност да избира детайл от 7 алтернативни, чиято конфигурация в най-голяма степен се доближава до конкретната. След като е избран конкретен детайл, се въвеждат необходимите геометрични параметри, включително финалния номинален диаметър на обработените отвори (според конструктивната документация). Въвеждането на геометричните параметри дава възможност да се изчислят относителната височина на отвора \overline{h} и параметъра C_r , от чиито големини зависи необходимата максимална осова сила за реализиране на процеса, полето на разпределение на остатъчните напрежения и остатъчните премествания след СД.

Потребителят предварително е запознат с обхвата на приложение на новата уякчаваща технология на база на информационната част. Независимо от това, при въвеждане на алогични или нереалистични размери от гледна точка на процеса СД, се предвиждат съответни ограничения в изчислителния алгоритъм и подходящи съобщения след некоректно въведени геометрични параметри (с червен цвят). В табл. 12 са визуализирани 7-те базови модела на детайли с отвори и съответстващите им формули за изчисляване на

параметрите \overline{h} и C_r .

Стъпка 3: Изчисляване на геометричните параметри: относителна височина на отвора \overline{h} и параметъра C_r и въвеждане от потребителя на допусковото поле (горно и долно гранично отклонение) за финалния диаметър на обработваните отвори;

След визуализиране на изчислените стойности на посочените геометрични параметри потребителят въвежда допусковото поле на диаметъра на обработваните отвори.

Последователно въведената информация в описаните стъпки позволява да стартира и финализира изчислителната процедура.

В резултат от финализиране на цялата изчислителната процедура на екрана се визуализира следната изходна информация: Граничните размери и съответните допускови полета както на предварително обработените отвори, така и на отворите след финализиране на процеса СД;

За прегледност се предвижда схематично изобразяване на допуските на отвора преди и след обработката, както и граничните стойности на стегнатостта (фиг. 13).

Изчислението се извършва за съответен допуск на предварително обработеният отвор и оптималната стойност на стегнатостта за съответния вид материал, определена във вида $i_{opt}=i_{opt}(d)$. Отчитайки спецификата на изследвания процес (отнася се до довършващо обработване), е прието, че допускът на предварително обработеният отвор трябва да съответства на *IT8*. Изчислените гранични диаметри на предварително обработените отвори дават възможност на технолозите да разработят технологичния процес за предварителна обработка.

| | Базови модели детайли и геометрични параметри Таблица 12 | | | | |
|--------|--|--|--|--|--|
| № дет. | Конфигурация и геометрични параметри | Изчислителни зависимости | | | |
| 1 | | 1.1. Изчисляват се: | | | |
| 2 | H H d b b h a b b h a b b h a b b h a b b h a b b h a b b h a b b b h a b b b b | 2.1.Изчисляват се разликите: $\Delta I = a - 0.5d$; $\Delta 2 = a1 - 0.5d$ $\Delta 3 = b - 0.5d$; $\Delta 4 = b1 - 0.5d$; 2.2. Избира се най-малкото число от горните, за което се приема Δmin ; 2.3. Изчисляват се: $\overline{h} = h/d$; $C_r = (d + 2\Delta_{min})/d$ | | | |
| 3 | H H h a b | 3.1.Изчисляват се разликите: $\Delta l = a - 0,5d$; $\Delta 2 = al - 0,5d$; $\Delta 3 = b - 0,5d$; 3.2. Избира се най-малкото число от горните, за което се приема Δmin ; 3.3. Изчисляват се: $\overline{h} = h/d$; $C_r = (d + 2\Delta_{min})/d$ | | | |
| 4 | a R H | 4.1.Изчисляват се разликите: $\Delta I = a - 0,5d$; $\Delta 2 = R - 0,5d$; 4.2. Избира се най-малкото число от горните, за което се приема Δmin ; 4.3. Изчисляват се: $\overline{h} = h/d$; $C_r = (d + 2\Delta min)/d$ | | | |
| 5 | H H t t t t t t t t t t t t t t t t t t | 5.1.Изчисляват се разликите: $\Delta I = a - 0.5d$; $\Delta 2 = a1 - 0.5d$; $\Delta 3 = b - 0.5d$; $\Delta 4 = t - d$; $\Delta 5 = t1 - d$ 5.2. Избира се най-малкото число от горните, за което се приема Δmin ; 5.3. Изчисляват се: $\overline{h} = h/d$; $C_r = (d + 2\Delta_{min})/d$ | | | |



a) след въвеждане на граничните отклонения и преди стартиране на изчислителната процедура

б) след финализиране на изчислителната процедура

Фиг. 13. Схема, визуализираща корелацията между допусковите полета на отвора преди и след СД

• Диаметърът на работната част на деформиращата сфера D,mm;

На база на въведените материал, номинален диаметър и гранични отклонения на окончателно обработения отвор, както и съответстващия му допуск по *IT8* последователно се изчисляват: средния диаметър на окончателно обработения отвор d_{av} , оптималната стегнатост за съответния материал i_{opt} , средната стойност на предварителния диаметър на отвора $d_{o,av}$, средната стойност на остатъчните диаметрални премествания след СД Δd_{av} след заместване в съответния регресионен модел и диаметъра на работната част на деформиращия елемент:

$$d_{av} = \frac{d_{max} + d_{min}}{2},\tag{10}$$

$$d_{o,av} = d_{av} - \Delta d_{av} \,, \tag{11}$$

$$D = d_{o,av} + i_{opt} , \qquad (12)$$

За граничните стойности на минималния и максимален диаметър на предварително обработения отвор и граничните стойности на стегнатоста следва:

$$d_{o,min} = d_{o,av} - IT8/2 , \qquad (13)$$

$$d_{o,max} = d_{o,av} + IT8/2 \tag{14}$$

След привеждане в кодиран вид на i_{min} и i_{max} и заместване в регресионния модел за остатъчните диаметрални премествания Δd се изчисляват граничните стойности на остатъчните диаметрални премествания Δd_{min} и Δd_{max} и съответстващите им изчислени стойности на диаметъра на получения след СД отвор, които трябва да бъдат в интервала (d_{min} , d_{max}):

$$d_{cal,l} = d_{o,max} + \Delta d_{min},\tag{15}$$

$$d_{cal,2} = d_{o,min} + \Delta d_{max}.$$
(16)

Ако изчислените гранични стойности на получения след СД отвор излизат извън интервала (d_{min} , d_{max}), алгоритъмът предвижда корекция (изместване) на допуска на предварително обработения отвор.

• Предсказаната стойност на отклонението от идеална цилиндричност, визуализирано върху подходяща схема (виж фиг. 176 и фиг. 206);

• Параметрите на полето на остатъчните напрежения, определени на база на резултатите от компютърните симулации (планиран числен експеримент), изведени за средното сечение на обработения отвор;

• Необходимата за реализиране на процеса СД максимална осова сила $P_{max}N$; Големината й се изчислява въз основа на проведен планиран числен експеримент и посредством регресионни модели на максималната осова сила за по-широк диапазон на вариране на геометричните параметри: максимален диаметър на заготовките в диапазона 15-135 mm и височина- 5-15 mm.

Изчислената големина на P_{max} се конкретизира върху графика, визуализираща установения характер на изменение на осовата сила на база на проведените натурни експерименти и КЕ симулации (виж фиг. 17в и фиг. 20в).

• Предсказаната стойност по критерий Ra, µт на получената грапавост след прилагане на новата уякчаваща технология; Посочва се диапазона наполучената грапавост в зависимост от материала, установена експериментално за начална грапавост на повърхнината на отворите в диапазона Ra= 2,5÷5µm;

• Оптималните технологични параметри на процеса (режима на работа): n_e , min⁻¹ и f, mm/rev; Същите се конкретизират в зависимост от обработвания материал на база на проведената оптимизация, описана в [8].

• Визуализация на необходимия инструмент с конкретен диаметър на работната част на деформиращата сфера.

6. ПРИМЕРИ, ДЕМОСТРИРАЩИ ВЪЗМОЖНО-СТИТЕ НА СПЕЦИАЛИЗИРАНИЯ ТЕХНОЛОГИ-ЧЕН СОФТУЕР (ЕЛЕКТРОНЕН СПРАВОЧНИК)

Стартира се бутон "Електронен справочник" в долната дясна част от екранния прозорец (фиг. 14).



Фиг. 14. Начален екран за стартиране на Елекронния справочник

Възможностите на Електронния справочник са демонстрирани чрез следните примери:



Фиг. 15. Избор на материал

Стъпка 2: Избор на детайл и въвеждане на необходимите геометрични параметри (фиг. 16):



Фиг. 16. Избор на детайл и задаване на неговите геометрични параметри

Стъпка 3: Изчисляване на геометричните параметри и въвеждане от потребителя на допусковото поле (горно и долно гранично отклонение) за финалния диаметър на обработваните отвори (фиг. 17 а, б, в, г):



а) изчисляване на диаметъра и допуска на предварително обработения отвор



б) изчисляване на отклонението от идеална цилиндричност



в) изчисляване на параметрите на полето на остатъчните напрежения



г) изчисляване на максималната осова сила , предсказана грапавост, подавателна скорост и диамтър на деформирация елемент

Фиг. 17. Резултати от изчислителната процедура на пример 1

<u>Пример 2:</u> Стъпка 1: Избира се материал стомана 37Cr4 (фиг. 18):



Фиг. 18. Избор на материал

Стъпка 2: Избор на детайл и въвеждане на необходимите геометрични параметри (фиг. 19).



Фиг. 19. Избор на детайл и задаване на неговите геометрични параметри

Стыка 3: Изчисляване на геометричните параметри и въвеждане от потребителя на допусковото поле (горно и долно гранично отклонение) за финалния диаметър на обработваните отвори (фиг. 20 а, б, в, г)



a) изчисляване на диаметъра и допуска на предварително обработения отвор





в) изчисляване на параметрите на полето на остатъчните напрежения



43



г) изчисляване на максималната осова сила , предсказана грапавост, подавателна скорост и диамтър на деформиращия елемент

Фиг. 20. Резултати от изчислителната процедура на пример 2

ЛИТЕРАТУРА

- Одинцов Л.Г., 1987. Упрочнение и отделка детайлей поверхностным деформированием. Справочник- М.: Машиностроение.
- [2] Сучков А. Г., и др., 1984. Довършващо обработване чрез повърхностно пластично деформиране. С., Техника.
- [3] Каталог на Ecoroll_catalog_en_web.pdf.
- [4] El- Abden S. Z., M. Abdel- Rahman, F. A. Mohamed., 2002. Finishing of non- ferrous internal surfaces using ballizing

technique. Journal of materials processing technology, 124, 5-10.

- [5] Gopalakrishna H. D., Murthu H. N., Krishna M., Vinod M. S., Suresh A. V., 2010. Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al2024 T3 alloy– An experimental study. Engineering Failure Analysis, 17, 361-368.
- [6] Атанасова М., Синтез и анализ на методи за довършващо обработване на отвори чрез ППД въз основа на диференциално-морфологичния метод. 2013. "Известия" на ТУ-Габрово, 46,3-9.
- [7] Вучков И. Н., И. И. Вучков.2009. Програмен продукт QStatLab Professional, версия 5.4. Ръководство за потребителя. София.
- [8] Дунчева Г., М. Атанасова, Ан. Анчев, Ив. Амуджев. Определяне на оптималните стойности на технологичните параметри и стегнатостта на процеса "Сферично дорноване" при обработване на отвори от месинг CuZn20Al2. 2015. Национална конференция по машиностроене и машинознание, 8-9 септември, Варна.
- [9] Maximov J.T., Duncheva G.V., 2008. A new 3D finite element model of the spherical Mandrelling process. Finite Elements in Analysis and Design, 44(6-7), 372-382.
- [10] Атанасова М. Г., Анчев А. П., Амуджев И. М., Дунчева Г. В., Моделиране на осовата сила при пластично деформиране на отвори с деформираща сфера. "Машиностроене и машинознание", година X, книга 1, 2015, 20-23.