



**СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА ПОДХОДИТЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА УМОРНАТА  
ДЪЛГОТРАЙНОСТ НА МЕТАЛНИ КОНСТРУКЦИОННИ ЕЛЕМЕНТИ С ОТВОРИ  
ЧАСТ III: КОМБИНИРАН ПОДХОД**

**SYSTEMATIZATION OF THE APPROACHES TO IMPROVE THE FATIGUE LIFE OF  
METAL STRUCTURAL COMPONENTS WITH HOLES  
PART III: COMBINED APPROACH**

Галя Дунчева \*

Технически университет -Габрово

Статията е постъпила на 16.07.2015 г.; приета за отпечатване на 17.09.2015 г.

**Abstract**

*In this article a method for processing of holes through plastic deformation is grounded. The method combines the beneficial effect from a generation of residual compressive stresses around the holes with the effect of microstructure modification. On this basis, the method is called Friction Stir Hole Expansion. In accordance with the thermo-mechanical nature of the process its taxonomy is established. The parameters of the process are defined and its thermal aspects are analyzed.*

**Keywords:** fatigue life; stir effect; surface modification; cold working; residual stresses; friction stir hole expansion

**1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Реализацията на процеса на пластично деформиране по отношение на цилиндрични отвори налага задължителна стегнатост, определена от разликата между диаметра на работната част на инструмента и диаметра на отвора. Стегнатостта определя дълбочината на пластично деформирания слой, но еквивалентната пластична деформация, скоростта на деформацията и температурното поле зависят и от вида на контакта „инструмент-отвор“. От големината на тези характеристики зависят позитивните ефекти на макро-подхода и микро-подхода – съответно интензивност и дълбочина на генерираната зона с полезни остатъчни окръжни нормални напрежения на натиск и модифициране на микроструктурата. При методите, реализиращи концепцията студено пластично деформиране, респ. Макро-подхода, независимо от дълбочината на пластично деформирания слой и наличието на тангенциален контакт по направление на оста на отвора, еквивалентната пластична деформация и скоростта на деформацията приемат относително ниски стойности ( $\varepsilon_{ekv}^{pl} < (4-5)\%$ ;  $\dot{\varepsilon} < 1 \times 10^{-2} s^{-1}$ ) (Дунчева, 2015). В съответствие със същността на микро-подхода, са необходими тангенциални напрежения със значителна интензивност следствие сили на триене между инструмента и метала (Дунчева, 2015a). Следователно, идеята за модифициране на съществуващи методи, реализиращи макро-подхода, посредством включване на допълнителен тангенциален контакт, по същество осигурява

възможност за комбиниране на посочените основни позитивни ефекти.

*Основна цел на тази част от изследването е да се обоснове и се дефинират параметрите на метод за обработване на отвори чрез пластично деформиране, който комбинира позитивните ефекти на макро-подхода и микро-подхода.*

**2. СЪЩНОСТ НА КОМБИНИРАНИЯ ПОДХОД**

Комбинираният подход за повишаване на уморната дълготрайност на конструктивни елементи със скрепителни отвори се базира върху съчетаването между определени характеристики на макро-подхода и микро-подхода (фиг. 1). В основата му е идеята за модифициране на метода *Mandrel Cold Working* чрез допълнително включване на въртеливо движение на инструмента (тип конусно-цилиндричен дорн) около оста на предварително пробития отвор. При описаната постановка действат следните основни фактори:

- Геометрично условие – въздейства се върху вътрешната цилиндричната повърхнина на отвора;
- Наличие на гарантирана стегнатост между диаметра на работната част на дорна и диаметра на предварително пробития отвор;
- Наличие на тангенциален контакт между инструмента и отвора както в осово, така и в окръжно направление.

Следствие от съвместното действие на посочените фактори се получават следните ефекти:

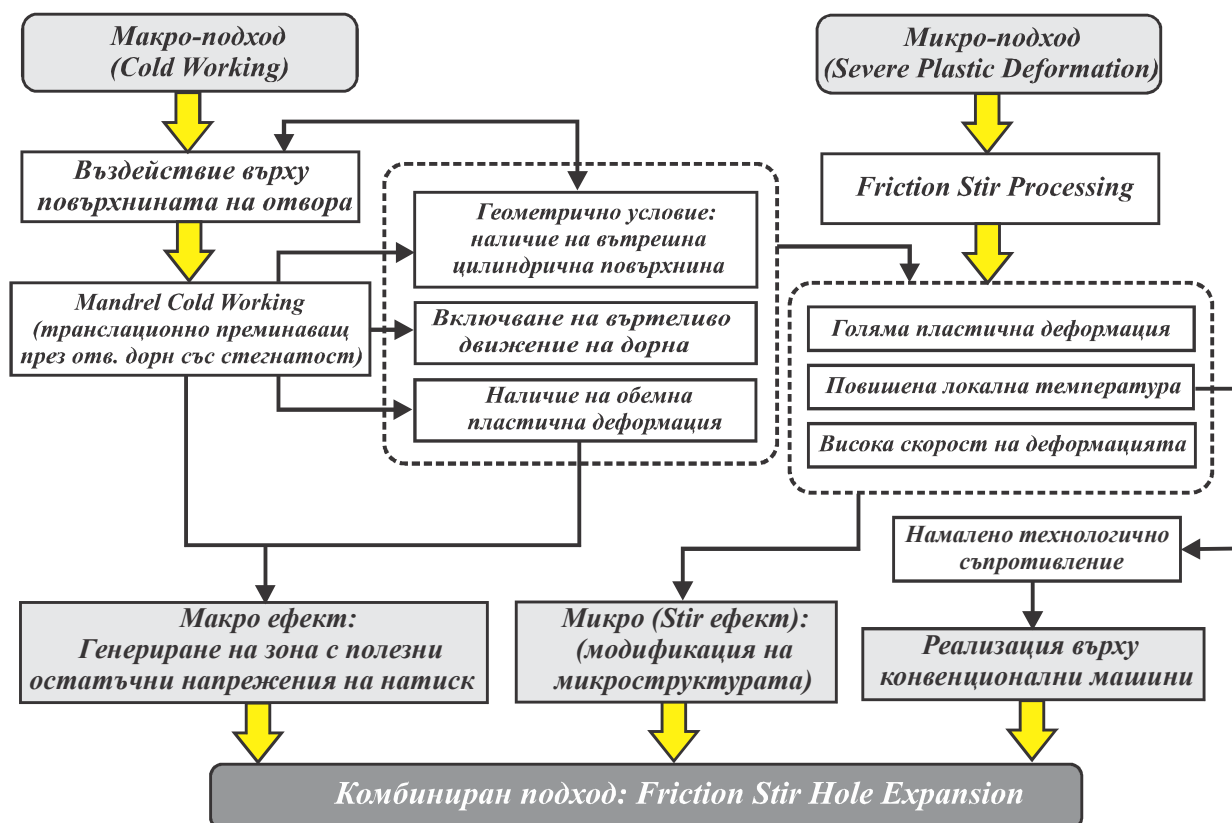
\* Тел.:066 827 312; e-mail: duncheva@tugab.bg

► **Макро-ефект (Cold Working):** Изразява се в генериране на зона с полезни остатъчни окръжни напрежения на натиск на относително голяма дълбочина (до няколко милиметра). Тази зона е резултат от обемната пластична деформация, ниската скорост на деформацията в осово направление и относително ниската температура в по-отдалечените слоеве около повърхнината на отвора (по-ниска от тази на рекристализация) (Дунчева, 2015);

► **Микро-ефект (Stir ефект):** Изразява се в модифициране на микроструктурата в близост до отвора в посока на издребняване на зърната, хомогенизиране и редуциране на порите в материала. Повишената локална температура в тази зона от своя страна води до „смекчаване“ на материала, което значително намалява технологичното съпротивление, вкл. по направле-

ние на оста на отвора (Дунчева, 2015a). Следователно, една от характеристиките на получения метод е възможността същия да се реализира върху конвенционални машини.

Прилагайки основната идея на описания комбиниран подход, Kumar et al. (2014) наричат получения резултат метод „Rotating Tool Cold Expansion“. Посоченото наименование обаче не е прецизно, тъй като радиалната експанзия се осъществява в условията на повишена локална температура. От друга страна, поради значителния градиент на характеристиките на Stir ефекта, не може да се постави рязка граница между зоните, в които се проявяват макро- и микро-ефекта. Поради посочените аргументи в настоящото изследване се предлага наименованието „Friction Stir Hole Expansion“ (FSHE) (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема, визуализираща комбинирания подход за повишаване на уморната дълготрайност на конструкционни елементи с отвори

### 3. МЕТОДЪТ FSHE

#### 3.1. Принципна схема

Съгласно принципната схема на метода FSHE, инструментът се задвижва от машинното вретено, извършвайки едновременно въртене около оста си с честота на въртене  $n_e$  и праволинейна транслация по направление на оста на предварително пробития отвор с подавателна скорост  $f$  (фиг. 2). Работният цикъл включва прав и обратен ход на инструмента, като правият ход завършва, когато общото за конусния и цилиндричен участъци сечение подмине с няколко милиметра изходната страна на отвора. Обратният ход се извършва със същата посока на въртене на инструмента. При реализация на метода върху обработващ център е възможно да се променят големините на  $n_e$  и  $f$  за правия и обратния ход.

Работната част на инструмента съдържа конусен и цилиндричен участъци с дължини съответно  $l_1$  и  $l_2$ . За гарантиране на цялостната обработка на повърхнината на отвора е необходимо да е изпълнено условието:

$$l_1 > h,$$

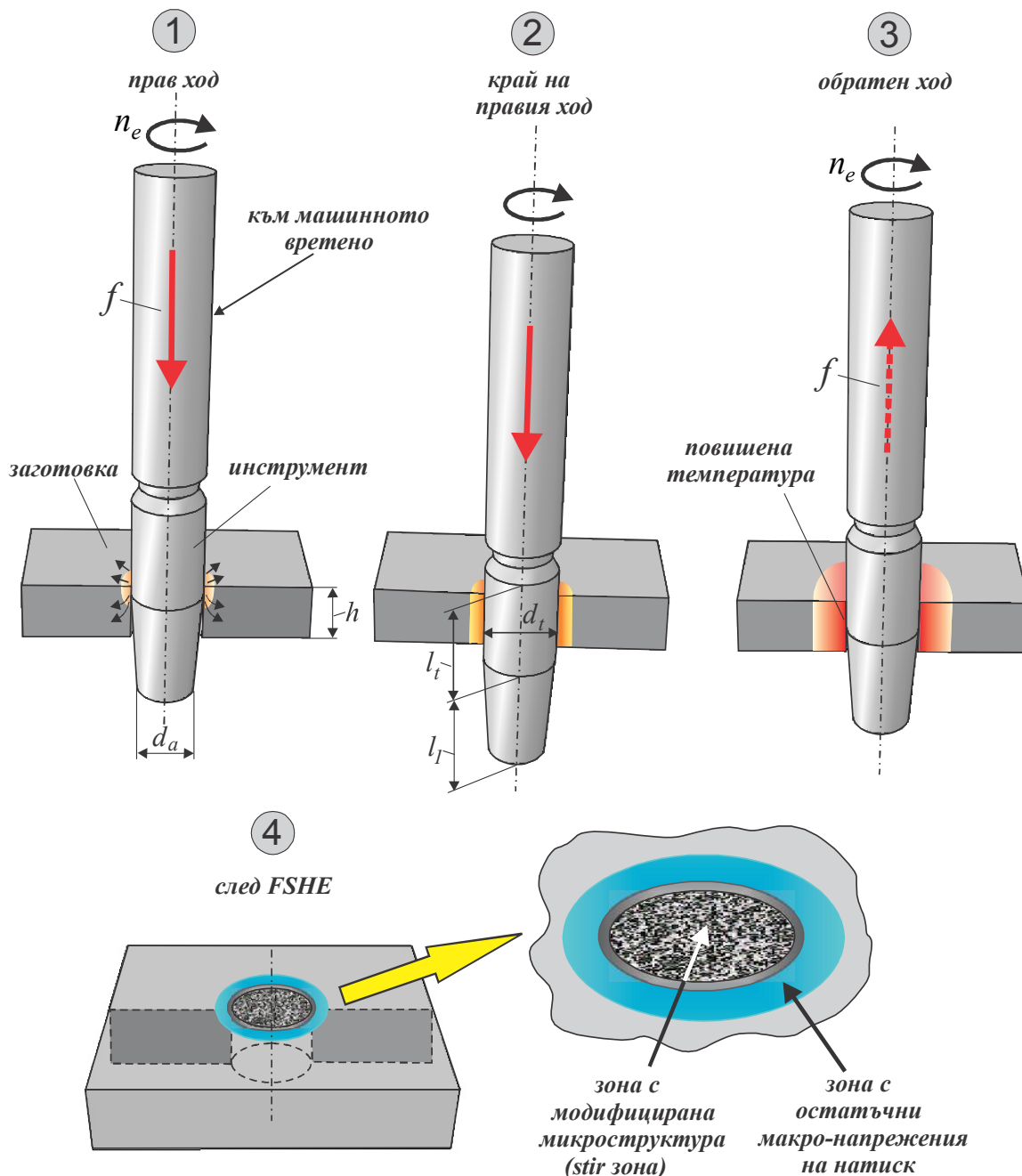
където  $h$  е височината на отвора, респ. дебелината на обработвания материал.

#### 3.2. Таксономия на метода FSHE

За изясняване на таксономията на метода FSHE е приложена схема, илюстрираща различните ефекти върху материала около отвора (фиг. 3). В зависимост от съотношението между температурния фактор, размера на пластичната деформация и скоростта на деформацията се различават следните зони:

• **I – stir зона** Това е зона с много малка дебелина, чиято микроструктура е модифицирана, т.е. проявен е микро-ефекта. Материалът в stir зоната е претърпял пълна рекристализация вследствие от повишената локална температура, голямата пластична деформация и високата скорост на деформацията в окръжно направление и следователно се намира непосредствено до повърхнината на отвора. По време на процеса FSHE точките от повърхнината на отвора се намират в три-

мерно напрегнато състояние, при което тангенциалните напрежения  $\tau_{tr}$  вследствие въртенето на дорна са с по-голяма интензивност в сравнение с тангенциалните напрежения  $\tau_{zr}$ , причинени от осовото преместване на същия (фиг. 10). За точките от и непосредствено под повърхнината на отвора може да се прояви ефекта от “sticking friction” (Дунчева, 2015a);



Фиг. 2. Принципно схемата на метода FSHE

• **II – преходна зона** В тази зона по естествен път се получава интерференция между микро- и макро-ефекта. Следователно, преходната зона е подложена на въздействието на генерираната топлина и обемна пластична деформация, но достигнатите стойности на тези величини са по-малки в сравнение с зона I, поради което не се достига до рекристализация. От друга страна, е възможно изменение на механичните свойства на

материала. Поради температурния фактор може да се предвиди по-слабо изразен макро-ефект и следователно, при равни други условия този ефект може да се управлява чрез изменение на честотата на въртене на инструмента;

• **III – Зона с проявен макро-ефект** В тази зона след финализиране на работния цикъл се генерират полезни остатъчни макро-напрежения на натиск. Зона

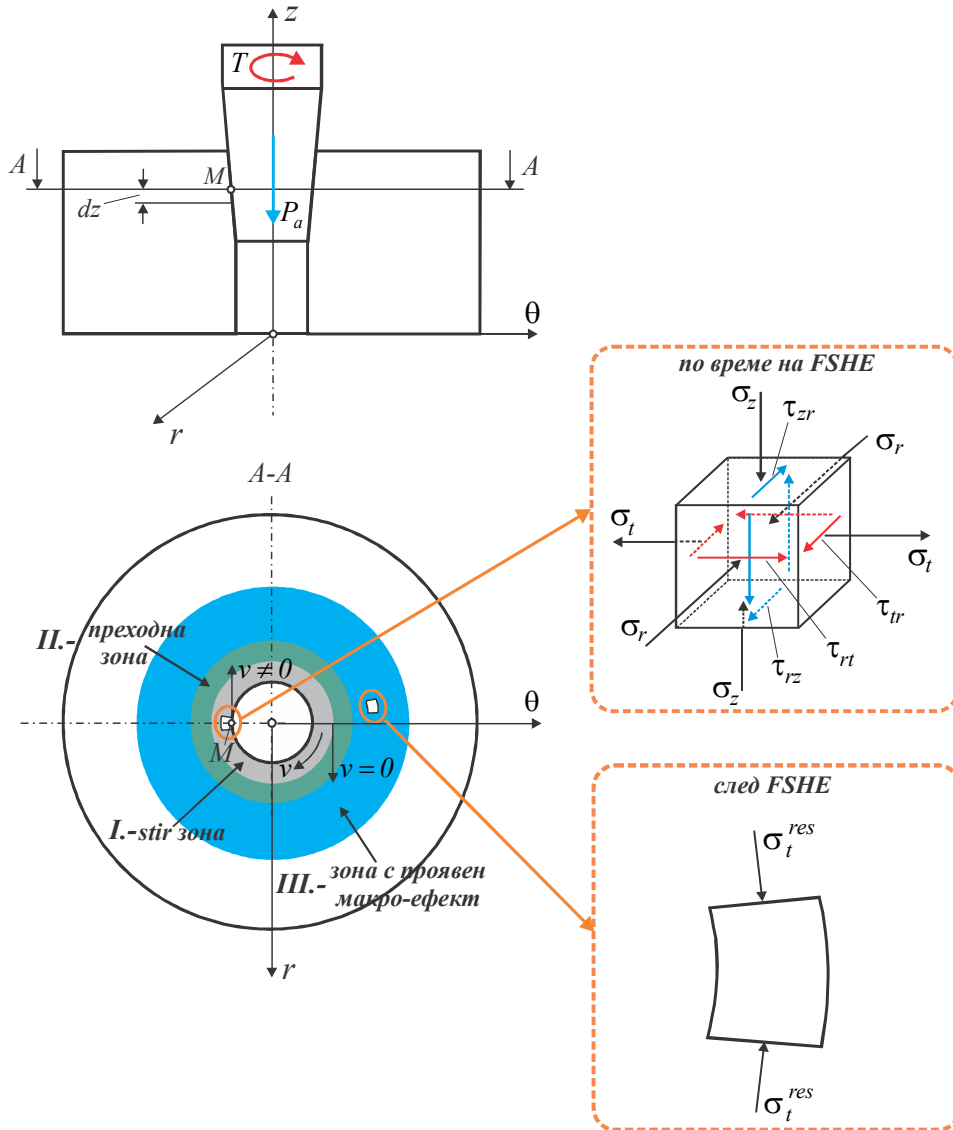
III се характеризира със слабо изразен температурен ефект и значително по-малка пластична деформация, тъй като няма физическа причина за тангенциалните напрежения  $\tau_{tr}$ , а тангенциалните напрежения  $\tau_{zr}$  са нищожни. За конкретен материал дълбочината и интензивността на тази зона ще зависи преди всичко от началната стегнатост, условията на триене и температурния ефект.

Параметрите на процеса FSHE са диференцирани в четири групи според табл. 1.

Параметри на процеса FSHE Таблица 1

Геометрични параметри	
Диаметър на предварително пробития отвор	$d_o, mm$
Диаметър на цилиндричната работна част на дорна	$d_t, mm$
Диаметър на конусния край на дорна	$d_a, mm$
Дължина на цилиндричната работна част на дорна	$l_t, mm$
Дължина на цилиндричната работна част на дорна	$l_a, mm$

Начална стегнатост	$i_{init} = d_t - d_o, mm$
<b>Технологични параметри</b>	
Честота на въртене на машинното вретено	$n_e = 30\omega_e / \pi$
Осово подаване	$f, mm / rev$
<b>Физични параметри</b>	
Температура на рекристализация на материала	$T_r, ^\circ C$
Граница на провлачване на материала	$\sigma_y, MPa$
Начална окръжна линейна деформация в точка от повърхнината на отвора	$\varepsilon_{t,0} = i_{init} / d_0$
<b>Енерго-силови параметри</b>	
Въртящ момент, приложен върху машинното вретено	$T, Nm$
Осова сила, приложена върху заготовката	$P_a, N$



Фиг. 3. Зони с различни ефекти на процеса FSHE

Необходимо е да се подчертае, че са въведени параметрите „начална стегнатост”  $i_{init}$  и „начална окръжна линейна деформация в точка от повърхнината на отвора”  $\epsilon_{i,0}^{init}$ . Съображенията за това са свързани с термо-механичната същност на метода FSHE и динамиката на тангенциалния контакт между инструмента и повърхнината на отвора. Отделената локализирана топлина рефлектира в по-малко технологично съпротивление както в окръжно направление, така и в по направление на оста на отвора. В резултат намалява контактното налягане, а оттам и триещия момент, действащ по контактната повърхност. От друга страна смекчаващият ефект води до многократно по-малка осова сила в сравнение с методите “mandrel cold working”. Отчитайки ефекта от локализирана топлина, може да се предвиди, че с нарастване на въртеливата скорост на инструмента, при равни други условия ще намалява големината на триещия момент, респ. ще е необходим по-малък въртящ момент, приложен към инструмента.

Същевременно, физическият механизъм на явление sticking friction рефлектира в отделяне на микро-частици от заготовката, част от които полепват по инструмента, а друга част се „вбиват” в третираната повърхност. Това от своя страна променя по време на работния цикъл както коефициента на триене, така и стегнатостта.

Моментната стойност на коефициента на триене се определя от:

$$\mu = \frac{F_f}{N} = \frac{d_o}{N} \frac{2T_f}{d_o}, \quad (4)$$

където:  $F_f$  и  $T_f$  са съответно сила на триене и триещия момент, действащи в контактната зона между инструмента и повърхнината на отвора;  $N$  е нормалната сила, за която:

$$N = \pi d_o a \sigma_r, \quad (5)$$

Където:  $a$  е ширината на контактната зона;  $\sigma_r$  е средно-интегралната стойност на радиалното напрежение по контактната зона.

За гарантиране на въртеливото движение на дорна по отношение на повърхнината на отвора, за целия работен цикъл е необходимо едновременно да са изпълнени условията:

$$T \geq T_f' \geq T_f, \quad (5)$$

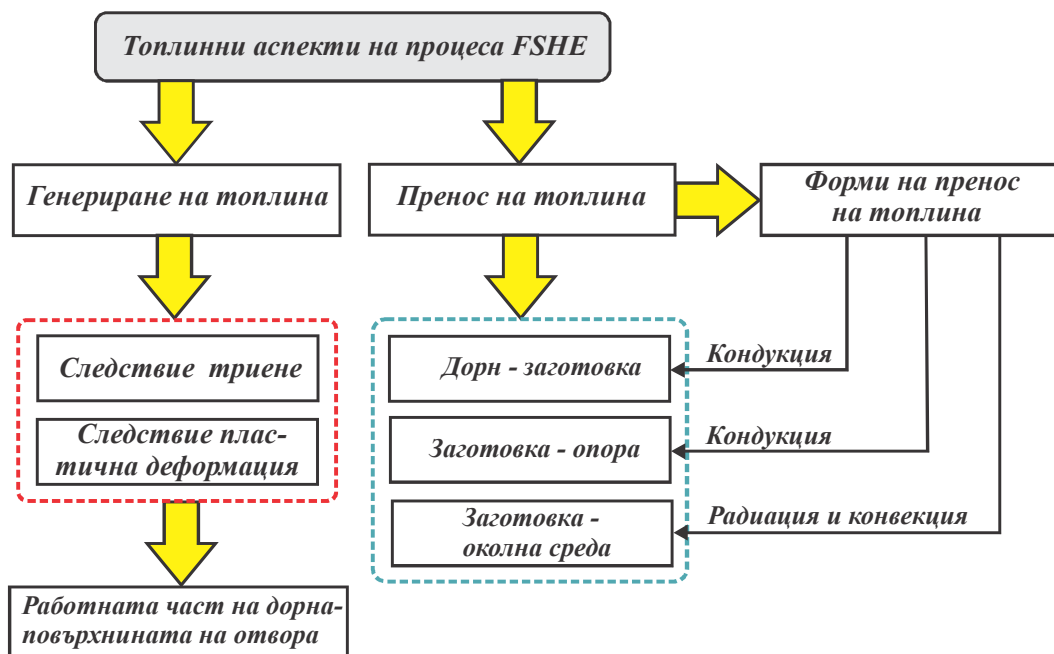
където  $T_f'$  е моментът на силите на триене, действащи между опашката на инструмента и патронника на машината.

Необходимата мощност  $P$  за реализиране на процеса FSHE се определя от:

$$P = T_f \omega_e \quad (6)$$

### 3.3. Топлинни аспекти на процеса FSHE

Температурният фактор има решаващо значение както за микро-ефекта, така и за макро-ефекта след прилагане на FSHE. Този фактор има два аспекта – генерирането на топлина и преноса на тази топлина (фиг. 4).



Фиг. 4. Схема на топлинните аспекти на процеса FSHE

Топлината се генерира практически през целия работен цикъл по контактната повърхност между дорна и инструмента следствие триенето и пластичната деформация. Основен принос за това имат триенето и пластичната деформация в окръжно направление. От тази гледна точка при равни други условия

влиянието на технологичните параметри на процеса е определящо. Чрез изменението им може да се управлява времетраенето на работния цикъл и в частност на отделните етапи, а оттам работата на силите на триене и количеството генерирана топлина. Това от своя страна чрез изменение на технологичното съпротивление

посредством контактното налягане влияе върху енерго-силовите параметри на процеса и полезните ефекти от обработката.

Процесът на топлопренасяне се осъществява по три направления – между дорна и заготовката, между заготовката и опората и от заготовката към околната среда. При постоянна температура на околната среда, този процес в най-голяма степен ще зависи от коефициентите на кондуктивна топлопроводност на съответните материали (фиг. 11).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретично е обоснован методът Friction Stir Hole Expansion, който позволява да се съчетаят позитивните ефекти от генериране на зона с полезни остатъчни окръжни напрежения на натиск около отворите и модифициране на микроструктурата в близост до повърхнината на самите отвори. Изяснена е термо-механичната същност на процеса, на база на което е създадена таксономията на процеса - класифицирани са зоните

около отвора според проявяването на макро- и микро-ефекта в тях. Дефинирани са геометричните, технологичните, физичните и енерго-силовите параметри на процеса и са анализирани топлинните аспекти на същия.

#### ЛИТЕРАТУРА

Дунчева Г.В. Систематизиране на подходите за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с отвори. Част I: Макро-подход. Известия на ТУ – Габрово 51 (2015) 11-31.

Дунчева Г.В. Систематизиране на подходите за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи с отвори. Част II: Микро-подход. Известия на ТУ – Габрово 51 (2015a) 32-37.

Bhoopati M. Kumar, Nitin J. Panaskar, Abhay Sharma, A fundamental investigation on rotating tool cold expansion. Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2014) 73: 1189-1200, DOI 10.1007/s00170-014-5888-2.