



**СИСТЕМАТИЗИРАНЕ НА ПОДХОДИТЕ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА УМОРНАТА
ДЪЛГОТРАЙНОСТ НА МЕТАЛНИ КОНСТРУКЦИОННИ ЕЛЕМЕНТИ С ОТВОРИ
ЧАСТ II: МИКРО-ПОДХОД**

**SYSTEMATIZATION OF THE APPROACHES TO IMPROVE THE FATIGUE LIFE OF
METAL STRUCTURAL COMPONENTS WITH HOLES
PART II: MICRO-APPROACH**

Галя Дунчева*

Технически университет -Габрово

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

Abstract

In this part of the study the idea for processing through plastic deformation in order to modify the microstructure is grounded as one of the basic approaches to increase the fatigue life of the metal structural components. Up-to-date techniques, the effect of which is expressed in grains refining, have been analyzed. A primary attention is dedicated to the Friction Stir Processing (FSP) technique and the phenomena "sticking friction" which is relevant to this technique. It was concluded that FSP technique has a greatest potential in treatment of holes in order to improve the fatigue life of the metal structural components.

Keywords: fatigue life; severe plastic deformation; surface modification; friction stir processing

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че материали, които имат един и същи химичен състав, показват определено вариране на механичните им характеристики. Основните причини за това са различията в металургичен аспект – микроструктура, дефекти и др. В този аспект, представената в първата част на изследването идея за апроксимация на „идеалния“ материал с модифициран реален такъв може да се развие по посока на желана модификация на микроструктурата. Особено перспективно в този аспект е обработването на металите посредством пластично деформиране, и по-конкретно т.н. "severe plastic deformation" (много голяма пластична деформация) (Azushima et al., 2008).

Тази част от изследването има за цел да се обоснове теоретично подхода за повишаване на уморната дълготрайност на метални конструкционни елементи, чийто физически носител е модифицирането на микроструктурата. За очертаване на възможностите за приложение върху отвори, е направен анализ на съвременните техники, насочени към модифициране на микроструктурата.

2. СЪЩНОСТ НА МИКРО-ПОДХОД

Основна цел на този подход е да се променят физико-механичните характеристики на основния материал и/или на повърхностните слоеве. Физическият механизъм за постигане на тази промяна се състои в модифициране на микроструктурата на материала в посока

постигане на фина издробенна микроструктура. Количественият критерий за това са размерите на зърната след модифицирането - под $20 \div 50 \mu m$.

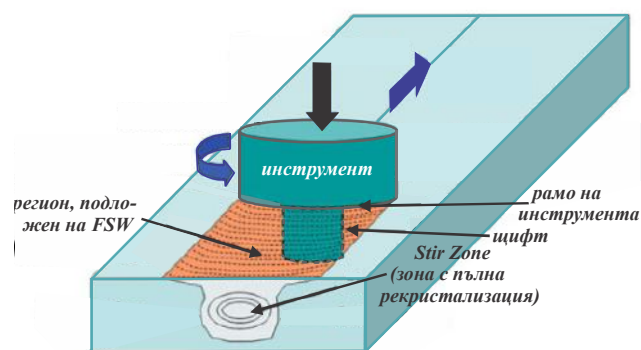
В инженерната практика изборът на материал за конкретно приложение се основава върху два основни фактора – гарантирани механични характеристики и гарантиран химичен състав. Този подход изключва отчитане на влиянието на микроструктурата върху поведението на конкретния материал в един от най-важните етапи в процеса на проектиране. Определящата роля на микро-дефектите в структурата на реалните материали на мезо- и микро-ниво за якостния ресурс на конструкционните елементи е подчертана за първи път през 20^{-те} години на XX век от *A. Griffith* в статията му „Явлението разрушаване и деформиране на твърдото тяло“ (Георгиев, 2005). Тезата на *A. Griffith* е, че ресурсът при експлоатация на твърдите тела би се увеличил десетки пъти, ако материалът, от който са изградени, не съдържа микро-дефекти, т.е. има „идеална“ микроструктура. Значителен брой повреди се дължат именно на такива нежелани дефекти в структурата, а подходът за по-строг контрол в това отношение рефлектира в значително оскъпяване на материала. Поради това една от съвременните тенденции за повишаване на механичните характеристики на реалните конструкционни материали се развива върху идеята за модифициране на микроструктурата им. Тази модификация по същество е значима трансформация, изразяваща се в издробеняване на зърната, редуциране на порите в материала и хомогенизиране на структурата.

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

В основата на микро-подхода е наличието на много голяма пластична деформация, задължителен компонент за формирането на която са тангенциални напрежения със значителна интензивност вследствие сили на триене между инструмента и метала. Този феномен е известен като "Severe Plastic Deformation" (SPD) (много голяма пластична деформация) (Azushima et al., 2008). На основа на SPD са разработени методите *Equal channel angular extrusion* (равноканално ъглово екструдирание) (Segal et al., 1981; Segal, 2002; Valiev et al., 2000; Valiev et al., 2006; Valiev and Langdon, 2006) и *High-pressure torsion* (усукване под високо налягане) (Valiev et al., 1991). В резултат от посочените методи се „формоват“ компоненти тип диск, такива с L, U или S-образни конфигурации. Следствие провокираните много големи тангенциални напрежения се получава изцяло модифицирана микроструктура, осигуряваща повишаване на механичните характеристики и уморната дълготрайност. Основен недостатък на посочените техники е, че се реализират при големи стойности на отношението необходима енергия/габаритни размери на съответните компоненти.

Съвременна концепция, базирана върху "severe plastic deformation" е концепцията Friction Stir Processing (FSP). FSP има обща физична основа с т.н. Friction Stir Welding (FSW) - прогресивна техника за заваряване, създадена през 1991 г. и патентована във Великобритания и САЩ [Thomas et al., 1991; Thomas et al., 1994] конкретно за приложение върху алуминиеви сплави, намиращи широко приложение в самолетостроенето. Базовата идея на FSW е да се разработи качествено нов подход за заваряване, като алтернатива на многобройните нитови съединения. Необходимата за тази цел топлина се генерира по две направления:

- Следствие силите на триене, възникващи между инструмента и обработвания метал. За целта се прилага притискаща сила към въртящ се инструмент, който едновременно с това се движи транслационно по направление на заваръчния шев (фиг. 1):



Фиг. 1. Принципна схема на процеса FSW

- Следствие провокираната голяма обемна пластична деформация.

Отделената локализирана топлина в близост до инструмента води до „смякчаване“ на материала и съвместно с транслационно движещия се инструмент причинява изтичане на метала и взаимно проникване, формирайки заваръчно съединение. Отличителна особеност на FSW е, че процесът се реализира „в твърдо състояние“, т.е. без разтопяване на метала (R. Mishra et

al., 2014). От друга страна, се консумира относително по-малко енергия, не се изисква консумация на газ или флюс, респ. не се отделят вредни емисии. На тази основа FSW се разглежда като прогресивна „зелена“ технология.

Потоъкът на материала при FSW и FSP се характеризира с комплексен градиент по отношение на пластична деформация, температура и скорост на деформацията. В зависимост от съотношението между пластичната деформация и температурата се различават следните региони (Mishra et al., 2014):

- Регион, подложен на топлинно въздействие, но без пластична деформация (*Heat Affected Zone*). Възможно е да се получи изменение на микроструктурата и/или механични свойства;

- Регион, в който материалът едновременно е подложен на въздействието на генерираната топлина и е претърпял значителна пластична деформация, но без рекристализация (*Thermo-mechanically Affected Zone*);

- Регион с интензивна пластична деформация при повишена температура (*Stir Zone*). Резултатът е пълната рекристализация на материала, а позитивният ефект от това е получаването на фина издробенена микроструктура. Тази издробенена структура довежда до отлични механични свойства, повишена якост на умора (Sharma et al., 2004; Kapoor et al., 2004, Kapoor et al., 2011; Kapoor et al., 2013), изключителна пластичност (суперпластичност) и по-добро формообразуване (Mishra and Mahoney 2004).

3. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ПРОЦЕСА FSP

Процесите FSW и FSP са разработени за приложение преди всичко върху алуминиеви компоненти от листов материал. Отчитайки общия им генезис, разликата между тях се свежда преди всичко до рационален подбор на технологичните параметри: честота на въртене и подавателна скорост на инструмента. Процесът FSP се развива като „инструмент“ с широко приложение, насочен към модифициране на микроструктурата. Като цяло, адаптирането на FSP към различни технологични варианти изисква значителен ресурс от време и средства. Независимо, че разработването им е по-скоро в начална фаза, потенциалът им е много голям.

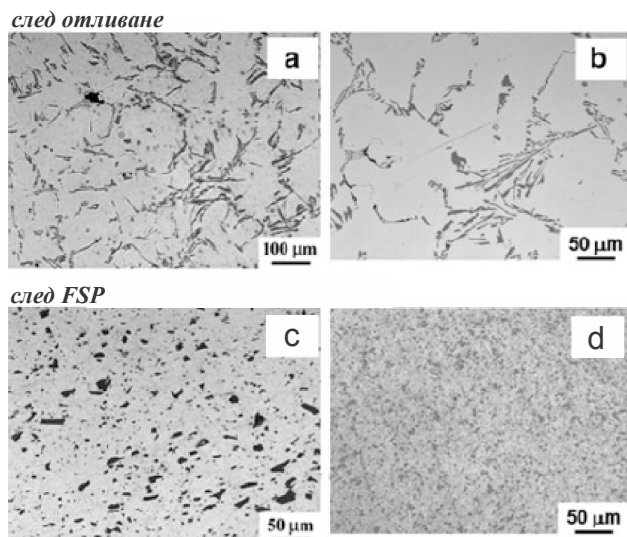
Аналогично на процеса FSW, същността на процеса FSP се базира върху два основни компонента: пластичния поток на напреженията и модифицирането на микроструктурата.

Освен голямата пластична деформация, основни характеристики на FSP са високата скорост на деформацията и повишената температура – по-ниска от тази на топене, но над температурата на рекристализация. Поради това моделът на деформация и за процеса FSP съответства на „деформация в твърдо състояние“. Приема се, че преходът към висока скорост на деформацията се осигурява, ако за скоростта на деформацията е изпълнено:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} \geq 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

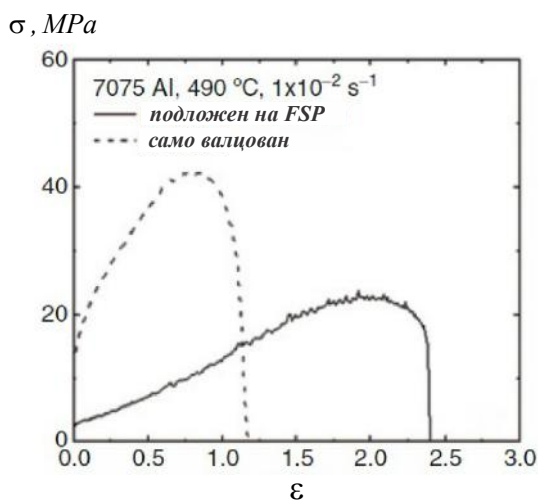
Следователно, процесът FSP има термо-механична природа, а фокусът е поставен върху пълната рекристализация на материала, респ. върху получаването на фина микроструктура. На фиг. 2 е показано сравнение между микроструктурата за различни компоненти от

A356 комерсиална алуминиева сплав след отливане и след FSP (Mishra et al., 2014).



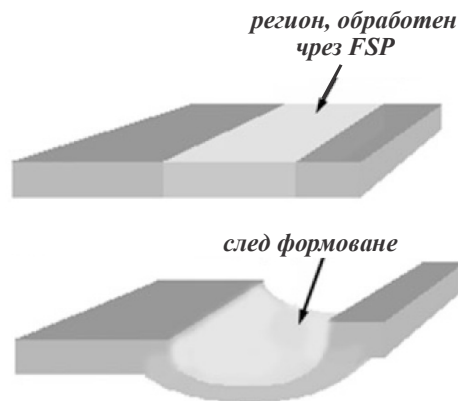
Фиг. 2. Сравнение на микроструктурата след отливане и след FSP

При много голяма деформация и скорост на същата в съчетание с висока температура процесът FSP се реализира в условия на т.н. суперпластичност (Mishra et al., 1999; Mishra and Mahoney, 2001; Mishra and Mahoney, 2004; Mishra et al., 2014). Счита се, че суперпластичността е атрибут на материала, за който се получава удължение при опън, по-голямо от 200%. Ключовият фактор, осигуряващ "суперпластичен" поток на напреженията, е малкият размер на зърната (фиг. 3) (Mishra and Mahoney, 2007). Необходима е фина микроструктура - размер на зърната <math>< 15 \mu\text{m}</math> и наличието на много фини частици от втора фаза, задържащи растежа на зърната. Предимство на ултрафината структура например за алуминиеви сплави Al_3Sc и Al_3Zr е обстоятелството, че при висока скорост на деформацията, суперпластичност се постига при относително най-ниска температура - $\approx 200^\circ\text{C}$ (Charit and Mishra, 2005; Ma et al., 2010).

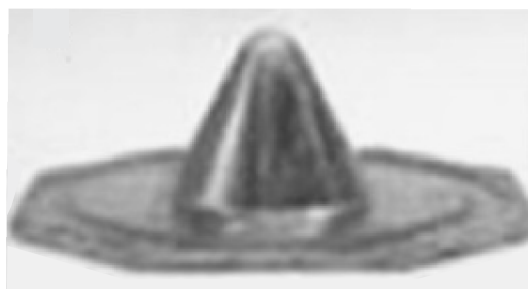


Фиг. 3. Сравнение между $\sigma - \varepsilon$ криви на 7075 Al от валцован листов материал и такъв, подложен на FSP

В условията на суперпластичност са разработени различни техники за формоване на компоненти със сложна конфигурация от листов материал (Wang and Mishra, 2007; Mishra and Mahoney 2004; Mishra and Mahoney 2007; Horita et al, 2000). Възможността за селективно третиране чрез FSP на отделни региони от съответния компонент позволява след конвенционални методи за формоване да се получи желаната конфигурация (фиг. 4).



а.



б.

Фиг. 4. Суперпластично формоване на компоненти от листов материал след FSP

От друга страна, възможностите на посочените техники да се изработват конструкционни елементи с относително големи размери са силно ограничени. Обобщавайки, процесът FSP сам по себе си е „металургина“ техника, осигуряваща комплексен градиент по отношение на пластична деформация, скорост на деформацията и температура, а ефектът е локализирана модификация на микроструктурата. В този аспект FSP намира приложения в следните две направления:

► **Постигане на градиент от свойства в монолитна структура, която има един и същи химичен състав**
Чрез прилагането на процеса FSP в този случай се осигуряват два полезни ефекта:

- Дирижиране на механичните свойства в различни региони на компоненти от тънък листов материал;
- Постигане на модифицирана микроструктура на повърхността, която изпълнява функцията на покритие, но без прекъсване на функцията на свойствата.

► **Синтез на композитни материали или покрития**
Това направление се развива на база на техниките:

- Създаване на металокерамични композитни материали и покрития с повишени якост, модул на еластичност, износоустойчивост и якост на умора посредством добавяне на усилващи керамични частици, фибри и др. (*Metal Matrix Composites*). Намира широко

приложение в аероиндустрията и автомобилната индустрия за синтез на нови структури материали (Mishra et al., 2003), които като цяло се характеризират с ортотропно поведение (Wolcken et al., 2009). В същността си тази техника е проявление на т.н. *синергичен дизайн*, тъй като целта е да се синтезира нов материал, чиито механични свойства са по-високи, отколкото сумата от механичните свойства на съставните фази. FSP има потенциал за развитието на такъв дизайн на база на съчетаване между двете характеристики на този дизайн – обема на усилващата фракция и нейното целенасочено локализиране;

- Модифициране на повърхностния слой посредством FSP и добавяне на различни прахове върху алуминиеви сплави – например *SiC* (Ma and Mishra, 2003), *NiTi* (Dixit et al., 2007; Mishra and Mahoney, 2007).

4. СЪЩНОСТ НА ЯВЛЕНИЕТО “STICKING FRICTION”

Ефектът на издрембяване на зърната е в пряка корелация с интензивността на тангенциалните напрежения като компоненти на еквивалентното напрежение. В механичен аспект постигането на този ефект е свързано с т.н. “sticking friction” – триене, при което е изпълнено условието:

$$\tau \geq \tau_B, \quad (1)$$

където τ е тангенциално напрежение при чисто плъзгане, τ_B е гранично напрежение при чисто плъзгане за съответния материал.

За дефиниране на тангенциалния контакт може да се използват следните модели:

- Модел на Coulomb:

$$\tau = \mu p, \quad (2)$$

където μ коефициент на триене, p е контактното налягане;

- Модел с постоянно тангенциално напрежение (Dieter, 1986):

$$\tau = m \tau_B, \quad (3)$$

където $m \in (0 \div 1)$ е коефициент, приемащ стойност 0 при чисто плъзгане и стойност 1 за условията на sticking friction. В този модел за повърхнината от заготовката, която се намира в контакт с инструмента, се приема поведение на материал с постоянно тангенциално напрежение.

За максимално възможното тангенциално напрежение за конкретен материал е в сила (1) и физически е еквивалентно на отделянето на метални частици от заготовката вследствие големи тангенциални деформации под повърхностния слой, подложен на FSP. Следователно, явлението “sticking friction” физически е еквивалентно на триене при плъзгане, причиняващо разрушаване на целостта на повърхностния слой. Отделените метални частици се ускоряват и полепват по инструмента, променяйки условията на тангенциалния контакт. Поради това, в действителност самият контакт се променя по време на процеса и обуславя наличието и на двата вида триене - плъзгане и sticking friction.

В действителност, поради сложната термо-механична природа на процеса FSP, коефициентът на триене μ е динамично променлива величина по отношение на отделни зони от обработената повърхнина. Ефектът от отделената локализирана топлина вследствие триенето се изразява в смекчаване на материала, т. е. до намаляване на технологичното съпротивление. В резултат намалява контактното налягане p , а оттам и тангенциалното напрежение. Отчитайки термо-механичната същност на процеса FSP и значителната динамика в тангенциалния контакт между инструмент и заготовка, за придобиване на достоверна информация експерименталният подход е без алтернатива.

5. ПРИЛОЖЕНИЕ НА FSP ЗА МОДИФИЦИРАНЕ НА СТРУКТУРАТА ОКОЛО СКРЕПИТЕЛНИ ОТВОРИ

На база на проучване на научните изследвания, осветени на микро-подхода, може да се заключи, че същият намира ограничено приложение по отношение на конструкционни елементи с отвори. Причина за това е невъзможността за адаптиране на процесите, реализиращи концепцията SPD към геометрията на отворите, т.е. наличието на вътрешна цилиндрична повърхнина.

Идеята за провокиране на голяма пластична деформация, включваща тангенциални напрежения със значителна интензивност по отношение на скрепителните отвори, за първи път е използвана от Shamdani and Khoddam, 2012. Авторите модифицират известните методи за студена пластична деформация посредством преминаващ през отвора дорн, като включват и локално усукване на точките от повърхнината на отвора. Независимо, че се акцентира върху полезния микро-ефект вследствие големите тангенциални напрежения, основната цел в изследването е да се оцени влиянието на локалното усукване върху полето на остатъчните макро-напрежения. Използван е опростен 3D крайно-елементен подход – взаимодействието между заготовката и инструмента е заменено със зададени кинематични въздействия. За целта студено разширение и локалното усукване са симулирани в последователни стъпки чрез едни и същи за точките от повърхнината на отвора съответно радиални и ъглови премествания. Авторите отчитат определящата роля на тангенциалните напрежения в деформационния процес, като изграждат конститутивния модел на материала на база на тест на усукване в условията на стайна температура. Този подход обаче не дава възможност в числените симулации да се отчете влиянието на локалния температурен ефект върху поведението на материала. За оценка на макро-ефекта е направен сравнителен анализ на полето на радиалните и окръжни остатъчни напрежения в стомана *Ti – IF* за три различни интервенции върху отвора: студено разширение, локално усукване и последователна във времето комбинация от тях. Установено е, че прилагането на локално усукване след студено разширение води до редуция на генерираните полезни остатъчни напрежения. Не е представена информация относно практическата ефективност вследствие от включването на локалното усукване за модифициране на микроструктурата около отвора.

Полезният ефект от посочената по-горе техника е изследвана експериментално върху образци от комерсиална алуминиева сплав 1200 с ниски механични характеристики ($\sigma_s = 25 \text{ MPa}$) (Panaskar and Sharma, 2014). Процесът FSP е изследван от гледна точка на влияние на технологичните параметри и геометрията на инструмента в условията на сухо триене и при добавяне на алуминиев прах Al_2O_3 . Във втория случай предвид размерите на праховите частици ($< 50 \text{ nm}$), авторите използват термина „*nano-assisted FSP*” (нано-подпомогнат FSP). Акцентира се върху определящото значение на комбинацията между скоростта на въртене и подавателната скорост от гледна точка на ефекта на смекчаване на материала вследствие генерираната локална топлина около повърхнината на отвора. Ефектът от прилагане на FSP в двата му варианта е оценен на база на сравнение на качеството на обработените отвори с други техники на обработване: само чрез пробиване и след пробиване, FSP и повърхностно пластично деформиране (burnishing). Установено е, че довършващото обработване посредством повърхностно пластично деформиране след FSP в условията на сухо триене почти не променя получената грапавост и твърдост за разлика от случая след FSP с добавяне на алуминиев прах. Очаквано, се наблюдава корелация между полезните остатъчни макро-напрежения на натиск и броя цикли до разрушение от умора – същите са най-големи за случая след „*nano-assisted FSP*” и последващ „burnishing”. Авторите отдават този резултат на ефекта на уякчаване в материала вследствие изменение в плътността на дислокациите. Основните фактори, от които зависи този позитивен ефект са генерираната температура и получената обемна фракция наночастици.

Експериментално и крайно-елементно изследване на описаната по-горе техника, наречена „Rotating Tool Cold Expansion”, е проведено от Kumar et al., 2014. Обект на изследване е същата комерсиална алуминиева сплав, както в (Panaskar and Sharma, 2014). Отчитайки температурния ефект от триенето, авторите провеждат свързан термо-механичен анализ, но заменят реалното взаимодействие между заготовката и инструмента, като некоректно дирижират граничните условия както в анализа на топлопренасяне, така и в нелинейния анализ. В първия анализ се изчислява плътността на топлинния поток, приложен към повърхнината на отвора, варирайки с коефициента на триене μ и параметър δ , отчитащ разпределението между двата вида триене - при плъзгане и sticking. За симулиране на студено разширение се задава контактното налягане, изчислено на база на експериментално измерени сили, действащи перпендикулярно на оста на отвора и контактната площ за последователни времеви интервали и приетата стойност на μ . Критерий за избор на двойката числа μ и δ (в случая и приет критерий за адекватност на модела) е сравнението между остатъчните напрежения, получени от числените симулации и тези, измерени експериментално. Независимо, че е използван температурно-зависим конститутивен модел на материала, в крайно-елементния подход е приета опростената постановка, че коефициентът на триене е температурно-независима величина. Експерименталната част

е насочена към измерване на остатъчните напрежения по челните повърхнини и металографски анализ на обработените повърхнини. Изследвани са три варианта на взаимодействие между инструмент и заготовка – сухо триене, мазане с течна смазка и при добавяне на алуминиев прах. Експерименталните резултати потвърждават значението на вида на контакта както за остатъчните напрежения, така и за топографията на повърхнината на обработените отвори.

На база на представената информация може да се заключи, че като цяло процесът FSP е много слабо изследван по отношение на отворите, а проведените изследвания се ограничават до комерсиални алуминиеви сплави. Последните нямат практическо приложение в сектори като самолетостроене, автомобилостроене и корабостроене, в които проблемът за повишаване на уморната дълготрайност и сигурността при експлоатация е от първостепенно значение. В този аспект интерес представлява проблема за изследване на ефективността на микро-подхода върху високояки алуминиеви сплави от типа на, 2024 T3, 2324 T39, 7075-T6, D16T, D16AT и др.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретично е обоснован подходът за обработване чрез пластично деформиране, позитивният ефект от който е получаването на издробенена микроструктура на материала. За постигане на този ефект, процесът на пластично деформиране трябва да се реализира в условията на много голяма еквивалентна пластична деформация, висока скорост на деформацията и повишена локална температура – по-ниска от тази на топене, но по-висока от температурата на рекристализация на материала. Тъй като модифицирането на микроструктурата на металите физически се проявява на микро- и мезо-ниво, този подход за повишаване на уморната дълготрайност е наречен от автора микро-подход.

На база на проведеното проучване на съвременните техники, базирани върху микро-подхода, може да се заключи, че ефектът от използването му е най-голям върху алуминиеви сплави. В частност, по отношение на отворите, изследванията, посветени на микро-подхода са в начален етап и се ограничават до комерсиални алуминиеви сплави. От гледна точка на практическо приложение върху високояки алуминиеви сплави, особено перспективна е техниката FSP.

ЛИТЕРАТУРА

- A. Azushima, R.Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida, Severe plastic deformation (SPD) processes for metal. CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008) 716-735.
- A.H.Shamdani, S. Knoddam. A comparative numerical study of combined cold expansion and local torsion on fastener holes, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1-11, Brackwell Publishing Ltd., 2012, doi: 10.1111/j.1460-2695.2012.01677.x.
- 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.
- G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3rd edn. (McGraw-Hill Co., Boston, MA, 1986).

- I. Charit, R.S. Mishra, Low temperature superplasticity in a friction-stir-processed ultrafine grained Al-Zn-Mg-Sc alloy. *Acta Mater.* 53 (15), 4211–4223 (2005).
- M. Dixit, J.W. Newkirk, R.S. Mishra, Properties of friction stir-processed Al 1100-NiTi composite. *Scr. Mater.* 56, 541–544 (2007).
- Nitin J. Panaskar, A. Sharma, 2014, Surface Modification and Nanocomposite Layering of Fastener-Hole through Friction-Stir Processing. *Materials and Manufacturing Processes*, 29: 726-732, (2014), Taylor & Francis Group, LLC, ISSN: 1014-6914 print/1532-2475 online, DOI: 10.1080/10426914.2014.892619.
- R. Kapoor, K. Kandasamy, R.S. Mishra, J.A. Baumann, G. Grant, Effect of friction stir processing on the tensile and fatigue behavior of a cast A206 alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 561, 159–166 (2013).
- R. Kapoor, V.S.H. Rao, R.S. Mishra, J.A. Baumann, G. Grant, Probabilistic fatigue life prediction model for alloys with defects: applied to A206. *Acta Mater.* 59(9), 3447–3462 (2011).
- R. S. Mishra, N. Kumar, P.S. De. *Friction Stir Welding and Processing*, Springer International Publishing Switzerland (2014), ISBN 978-3-319-07043-8 (eBook).
- R.S. Mishra, M.W. Mahoney, Friction Stir Processing, in *Friction Stir Welding and Processing*, ed. by R.S. Mishra, M.W. Mahoney (ASM International, Materials Park, 2007), pp. 309–350. ISBN-13: 978-0-87170-840-3.
- R.S. Mishra, M.W. Mahoney, in *Friction Stir Processing: A New Grain Refinement Technique To Achieve High Strain Rate Superplasticity in Commercial Alloys*. Superplasticity in Advanced Materials, ICSAM-2000 Materials Science Forum, 357–3 (2001), p. 507.
- R.S. Mishra, M.W. Mahoney, S.X. McFadden, N.A. Mara, A.K. Mukherjee, High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 al alloy. *Scr. Mater.* 42, 163 (1999).
- R.S. Mishra, Z.Y. Ma, I. Charit, Friction Stir Processing: a novel technique for fabrication of surface composite. *Material Science & Engineering A* 341 (2003) 307-310.
- S.R. Mishra, M.W. Mahoney. Metal superplasticity enhancement and forming process. U.S. Patent (6,712,916) Mar 30, 2004.
- S.R. Sharma, R.S. Mishra, Fatigue crack growth behavior of friction stir processed aluminum alloy. *Scr. Mater.* 59 (2008), 395–398 (2008).
- S.R. Sharma, Z.Y. Ma, R.S. Mishra, Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy. *Scr. Mater.* 51(3), 237–241 (2004).
- Segal VM, Severe Plastic Deformation Simple Shear Versus Pure Shear, *Materials Science and Engineering A*, (2002) 338(1-2): 331-344.
- Valiev RZ, Estrin Y, Horita Z, Langdon TG, Zehrbauer MJ, Zhu YT Producing Bulk Ultrafine-grained Materials by Severe Plastic Deformation, *JOM* (2006) 58(4): 33-39.
- Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Prog. Mater. Sci.*, (2000), 45, 103-189.
- Valiev RZ, Krasilnikov NA, Tsenev NK. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure. *Mater. Sci. Eng.* (1991) A137, 35-40.
- Valiev RZ, Langdon TG. Principles of Equal-channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement. *Progress in Materials Science* (2006) 51(7): 881-981.
- Wolcken Piet, Eggert D. Reese, Timothy G.B. Jones. Expansion Tool for Cold Expansion of Holes, Patent Appl. Publ. № US 2009/0113979 A1, May 7, 2009.
- Z.Y. Ma, F.C. Liu, R.S. Mishra, Superplastic deformation mechanism of an ultrafine-grained aluminum alloy produced by friction stir processing. *Acta Mater.* 58(14), 4693–4704 (2010).
- Z.Y. Ma, R.S. Mishra, Friction stir surface composite fabrication. *Surface engineering: in materials science II*, TMS, Warrendale, PA, (2003), p. 243.
- Георгиев М., Пукнагиноустойчивост на металите при статично натоварване, С., БУЛВЕСТ 2000, 2005.