



## Hybrid Non-equilibrium Composites Produced via Friction Stir Processing

Christo KONDOFF<sup>1</sup>, Marina MANILOVA<sup>1</sup>, Tatiana SIMEONOVA<sup>1,2</sup>, Rumen KRASTEV<sup>2</sup>,  
Plamen TASHEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of metal science, equipment and technology with hydroaerodynamics centre “Acad. A. Balevski”  
at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,  
e-mail: [hriko61@gmail.com](mailto:hriko61@gmail.com), [mamanil@abv.bg](mailto:mamanil@abv.bg), [tsimeonova@imbm.bas.bg](mailto:tsimeonova@imbm.bas.bg), [ptashev@ims.bas.bg](mailto:ptashev@ims.bas.bg),

<sup>2</sup> Institute of mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
e-mail: [krastev.sc@gmail.com](mailto:krastev.sc@gmail.com)

### Abstract

Friction stir processing (FSP) is increasingly used to improve the surface properties of ductile metals and alloys. It is possible to add reinforcing particles in the FSP zone to obtain hybrid non-equilibrium composites with desired properties. In the present work, hybrid non-equilibrium composites of aluminium alloy A 6061 with added reinforcing particles of Zn or Ti obtained by FSP are presented. Processing is carried out with a 4X5MFS steel tool with a special geometry, which performs rotary and progressive movement. The study was carried out under fixed parameters of the processing mode. Results were obtained on the influence of the concentration of reinforcing particles on the hardness and mechanical characteristics of the hybrid non-equilibrium composites.

**Keywords:** Friction stir processing (FSP), hybrid non-equilibrium composites, Zn, Ti reinforcing particles, aluminium alloy.

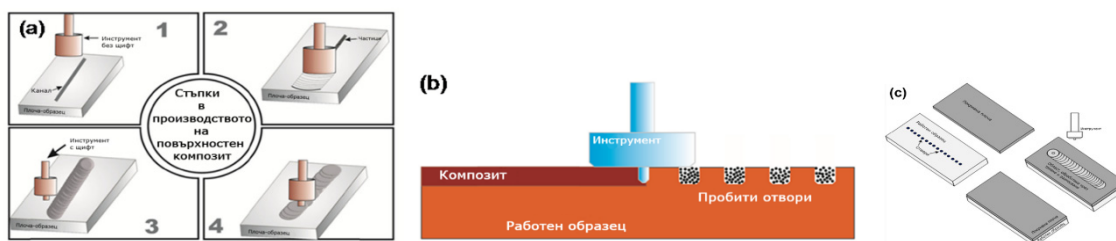
## Хибридни неравновесни композити получени чрез обработка с триене и размесване

Христо КОНДОВ, Марина МАНИЛОВА, Татяна СИМЕОНОВА, Румен КРЪСТЕВ,  
Пламен ТАШЕВ

### Увод

Обработката с триене и размесване (ОТР) дава възможност да се въздейства върху пластични сплави в отделни специфично натоварени зони с цел да се постигнат необходимите качества на материала или изделието в частност. Чрез ОТР на алуминиева сплав А 6061 Т6 и повърхностно добавяне на  $Al_2O_3$  са получени повърхностни композити с различна концентрация на уякчаващите частици и вариране параметрите на режима на получаване [1]. Установено е наличието на по-дребнозърнеста структура и повишена твърдост в зоната на размесване. Най-добри резултати по отношение на твърдостта 132 HV и бездефектна структура са получени при използването на инструмент за обработка с коничен щифт резбови канали и вдлъбнато рамо при скорост на въртене 1120 rpm, скорост на обработка 16 mm/min и концентрация 2 vol%. Влиянието на уякчаващи частици от SiC и  $Al_2O_3$  на А 6061 Т6 върху износването и якостните свойства е установено за хибриден композит получен чрез ОТР [2]. Повърхностни композити могат да бъдат получени чрез ОТР по различни начини. Един от тези начини е чрез нанасяне на слой от суспензия от керамични частици в летлива среда и последваща обработка [3]. Понастоящем керамичните частици се въвеждат чрез машинно обработен канал в плоча-образец [4]. Основните подходи при производството на повърхностни композити чрез

ОТР са представени схематично на Фиг. 1 (a, b, c). Различните стъпки на метода с използване на канал са обяснени на Фиг. 1a.



**Фиг. 1. Общоприети методи за въвеждане на уякчаващи частици при производството на повърхностни композити: (a) чрез канал; (b) чрез отвори; (c) чрез покривна плоча [5].**

Инструмент с кухня изпълнена с уякчаващи частици, които се подават в процеса на обработка е в основата на друга технология за получаване на композити [6]

## Методика на експеримента

В експеримента са използвани уякчаващи частици от Zn, който е с по-ниска температура на топене от Al сплав и Ti частици с по-висока температура на топене. Извършено е проследяване на взаимодействието и се прави сравнение на въздействието им върху свойствата на получените хибридни неравновесни композити (ХНК). Избрано е да се варира концентрацията на добавения прах, при постоянни параметри на режима и да се следи промяната на твърдостта и якостта.

За създаване на ХНК се използва планка с дебелина 12mm от сплав А 6061 Т651. Като добавъчен материал се въвежда Zn или Ti на прах като уякчаващи частици в гореспоменатата сплав.

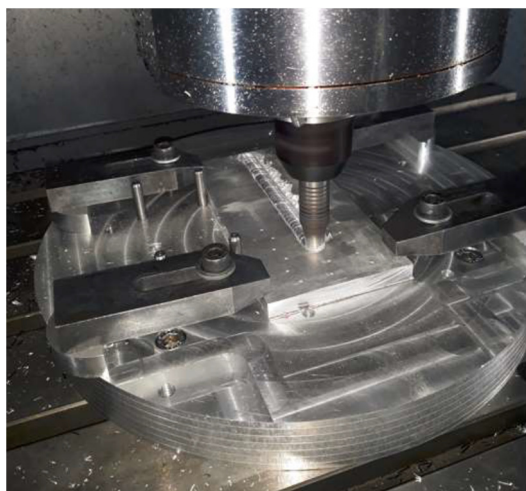
За да се осъществи точно дозиране на въвеждания титанов или цинков прах за получаване на композитен слой посредством ОТР се използва тегловен метод. В подготвен за целта образец (Фиг. 2) от алуминиева сплав с размери 6x12x100mm са пробити 10 отвора със свредло  $\varnothing 2\text{mm}$  на дълбочина 2mm.



**Фиг. 2. Образец**

Извършени са измервания на теглото на количеството Zn и Ti прах, което се вмества в 10-те отвора при пресоване с една и съща сила 5kg със специално изработен за целта инструмент. Планките за обработка са пробити със същото свредло (с което са пробити отворите в детайла от Фиг.2) без междинно заточване при използване на обработващ център HURKO с висока точност. Извършено е претегляне на образца първоначално и след запълването на всички отвори с цинков прах. Използвана е аналитична везна “Sartorius” с клас на точност M1 и разделителна способност  $d=0,00001$ .

Определено е средното тегло на Ti прах, което се помества в един отвор от 10 измервания и средното тегло на Zn прах, което се помества в един отвор от 10 измервания. Концентрация от 2, 4 и 6 тегловни процента е постигната след изчисляване на теглото на метала в размесената зона и разстоянието между запълнените с прах отвори – Фиг. 3.



Фиг. 3. Получаване на ХНК

Изработени са планки, които са обработени съгласно Таблица 1 и изрязани на рутер с охлаждане серия образци за измерване на твърдост и изпитване на опън.

Таблица 1: Идентификация на образците

Означение на образеца	Уякчаващ прах	Концентрация, wt %	Скорост на обработка, mm/min	Скорост на въртене, rpm
1	Ti	2%	60 (0)	900 (0)
2	Ti	4%	60 (0)	900 (0)
3	Ti	6%	60 (0)	900 (0)
7	Zn	2%	60 (0)	900 (0)
8	Zn	4%	60 (0)	900 (0)
9	Zn	6%	60 (0)	900 (0)

## Измерване на микротвърдост

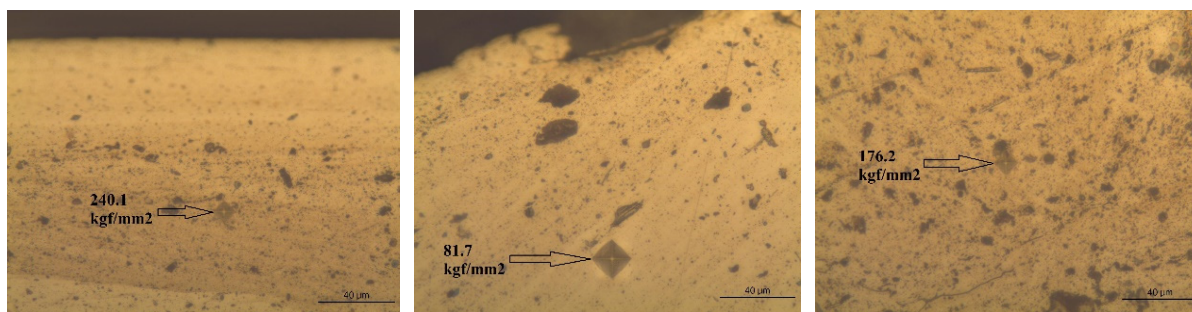
За измерване на микротвърдост са дадени 7 бр. образци с номера 1, 2, 3, 7, 8 и 9, в зоната на обработка на които се формира ХНК (Таблица 1). Образците са подготвени, като са опаковани в акрилна смола, шлайфани са на шкурки до №1200 и механично полирани с диамантена паста. Проявени са с разтвор на Keller.

Микротвърдостта е измерена с микротвърдомер MicroDuromat (Reichert-Jung) при зададено натоварване 20 gf, време за достигане на натоварването 10s и време на задържане под товар 10s. За всеки образец в зоната на обработка са направени 9 измервания (в двата края на зоната и по средата ѝ) – 1 под повърхността на образеца, 2 – в средната част на зоната и 3 – в „долната“ част (най-близо до сърцевината на образеца). Резултатите от измерването на микротвърдост за всички образци са дадени в таблица 2. Средната стойност на микротвърдостта на основния метал е 73 kgf/mm<sup>2</sup>.

Таблица 2. Резултати от измерването на микротвърдост

Номер на образец	Местоположение	1	2	3	Средно
1	Под повърхността	62,1	68,5	65,2	65,27
	По средата	53,7	57,4	53,6	54,9
	В основата	56,5	56,9	58,7	57,37
2	Под повърхността	64	72,7	73,6	69,9
	По средата	53,3	58,1	62,4	57,9
	В основата	61,1	59,4	68,4	63,0
3	Под повърхността	89,6	240,1	81,7	137,1
	По средата	103,5	176,2	82,5	120,7
	В основата	62,3	72,4	73,9	69,5
7	Под повърхността	49,9	68	78,6	65,5
	По средата	59,6	65,6	70,7	65,3
	В основата	57,7	62,6	67,9	62,7
8	Под повърхността	80,1	120,1	97,7	99,3
	По средата	127	121	121,1	123,0
	В основата	108,7	85,9	96	96,9
9	Под повърхността	92,2	139,3	106,4	112,6
	По средата	112	109,7	67,4	96,4
	В основата	65,7	82,9	74,8	74,5

На Фиг. 3 са показани 3 от отпечатъците при измерване на микротвърдост на образец 3.



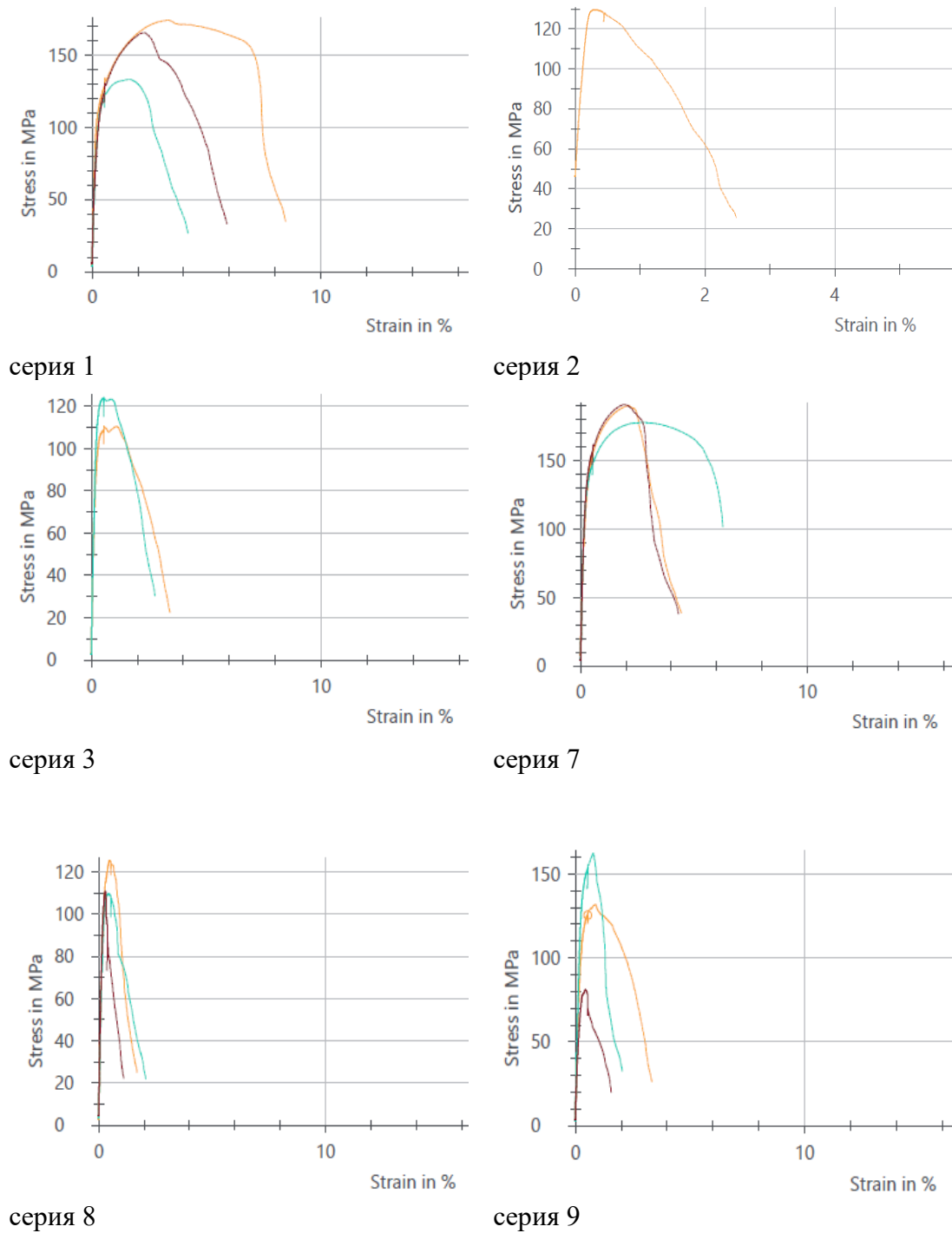
Фиг. 3. Отпечатъци от измерване на микротвърдост

## Механични изпитвания

Образците от ХНК, предназначени за изпитване на опън, са подготвени съгласно стандарт ASTM E8, с номера – серии 1, 2, 3, 7, 8, 9 по три образца от всеки вид, с изкл. на № 3 – два броя и № 2 – един брой.

За изпитването е използвана серво-хидравлична машина Zwick-Roell HA-250 съоръжена силомерна клетка до 250kN и с хидравлични захвати за изпитване до 100kN. Деформацията е измерена с екстензометър Sandner EXA 25-2.5o с 25mm базова дължина. Измерванията са проведени с изключително висока прецизност, благодарение на най-съвременния хардуер и софтуер на апаратурата и система за регистрация на данните.

Определянето на якостта на опън за всяка серия са по стандарт ISO 6892 – част 1 и са показани на фиг. 4.

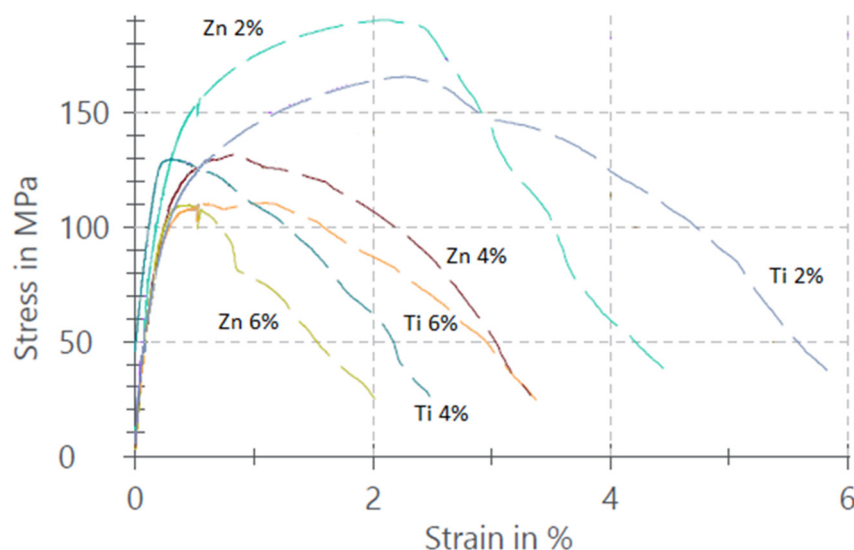


Фиг. 4. Определянето на якостта на опън

Числовите стойности на механичните характеристики са представени в Таблица 3.

Таблица 3. Числовите стойности на механичните характеристики

Означение на образца от ХНК	Образец №	E GPa	Rp0.2 MPa	Rp0.5 MPa	ReH MPa	Rm MPa
1.1	18	65,6	120	135	-	174
1.2	19	67,9	112	125	-	133
1.3	20	69,7	110	132	-	166
2.4	21	56,5	-	124	129	128
3.1	1	59,4	106	109	-	111
3.2	2	64,3	121	123	-	124
7.1	3	67,2	144	165	-	190
7.2	4	72,4	139	155	-	178
7.3	5	73,1	148	167	-	191
8.1	6	60,8	119	129	-	132
8.2	7	67,3	147	161	-	163
8.3	8	55,9	79	66	-	81
9.1	9	57,0	122	119	-	125
9.2	10	56,0	109	103	-	110
9.3	11	68,4	-	68	111	87



Фиг. 5. Осреднена якостна диаграма за съпоставка на образци от всички серии от ХНК с въведени Zn или Ti уякчаващи частици

## Изводи

Най-високи стойности на микротвърдостта в зоната на обработване в сравнение с микротвърдостта на основния метал са измерени при образци от ХНК с номера: 3 (6%Ti), 8 (4%Zn), и 9 (6%Zn).

Най-добри якостни показатели показват образци серия 7 със средна якост  $R_m = 186,3$  MPa и серия 1 със средна якост  $R_m = 157,6$  MPa. От гледна точка на влиянието на въведените уякчаващи частици върху механичните характеристики на изпитаните

образци се наблюдава намаляване на якостта на опън и на пластичността на изпитваните материали с нарастване на количеството на уякчаващата фаза, като най-добри резултати са получени при добавяне на 2%Zn (серия 7) и 2%Ti (серия 1).

Понижени резултати показват серии 3, 8 и 9.

В ломовете на изпитаните серии има видими дефекти, които са причина за получените графики и понижени якостни показатели.

## Благодарности

Настоящата работа е реализирана с подкрепата на Българския фонд за научни изследвания по договор за сътрудничество с Индия КР-06-India-10/02.09.2019 и на Европейския фонд за регионално развитие оперативна програма „Наука и образование за интелигентен растеж 2014-2020“, проект „Национален център по мехатроника и чисти технологии“ BG 05M2OP001-1.001-0008.

## Литература

1. Naresh P., A. Kumar “Effect of Nano Reinforcement On Fabrication Of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Surface Composite By Friction Stir Processing”, Materials Science forum, Vols. 830-831, pp 467-471
2. Devaraju A., A. Kumar at all Influence of reinforcements (SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and rotational speed on wear and mechanical properties of aluminum alloy 6061-T6 based surface hybrid composites produced via friction stir processing, Materials and Design 51 (2013) 331–341
3. Mishra, R.S., Ma, Z.Y., Charit, I., 2003. Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite. Mater. Sci. Eng. A 341, 307–310
4. Arora, H.S., Singh, H., Dhindaw, B.K., 2011. Composite fabrication using friction stir processing-A review. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 61, 1043–1055, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3758-8>
5. Sharma V., U. Prakash, B.V. Manoj Kumar., Surface composites by friction stir processing: A review. Journal of Materials Processing Technology, 2015, [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00199-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00199-5).
6. Miranda, R.M., Santos, T.G., Gandra, J., Lopes, N., Silva, R.J.C., 2013. Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stir processing in aluminium alloys. J. Mater. Process. Tech. 213, 1609–1615, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.022>