

МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЪРДОСТ ОКОЛО ОТВОРИ В АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 2024-ТЗ, ПОДЛОЖЕНИ НА СТУДЕНО РАЗШИРЕНИЕ ЧРЕЗ МОДИФИЦИРАН SPLIT MANDREL МЕТОД

Петя Даскалова

Технически Университет Габрово, България Кореспондиращ автор: p.daskalova@tugab.bg

MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS AROUND HOLES IN ALUMINUM ALLOY 2024-T3 SUBJECTED TO COLD EXPANSION BY MODIFIED SPLIT MANDREL METHOD

Petya Daskalova

Technical University of Gabrovo, Bulgaria * Corresponding author: p.daskalova@tugab.bg

Abstract

The article presents an experimental study of the resulting microstructure and microhardness around coldexpanded holes in aluminum alloy 2024 - T3. The cold expansion of the holes is realized by a new modified Split Mandrel Cold Working (SMCW) method. A Zeiss Evo 10 scanning electron microscope was used to study the microstructure, where the secondary electrons emitted by the atoms excited by the electron beam are detected using a secondary electron detector. For the determination of the microhardness, in the zone affected by the cold expansion process, a semi-automatic microhardness meter Zwick/Indentec-ZHV μ -S was used. The microhardness measurement was carried out along three lines oriented radially of the hole for each side of the specimens, using a load of 10g. The microstructure near the holes was found to be finer and the measured microhardness was 25% higher compared to that of the baseline undeformed specimen. Based on the obtained results, the positive effect of the modified Split Mandrel Cold Working process in a zone with increased microhardness with a thickness of 5 mm has been proven.

Keywords: 2024 – T3 aluminum alloy; cold hole expansion; modified Split Mandrel Method; microstructure; microhardness

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Високояките алуминиевите сплави се използват широко в авиационната индустрия поради благоприятното отношение якост/тегло. Тази група материали са предпочитани в производството на самолетни обшивки, панели, рамки, греди и други важни структурни части в самолетостроенето. Сглобяването на тези части се извършва чрез скрепителни отвори. Типичен представител на тези материали е алуминиева сплав 2024-ТЗ. Скрепителните отвори са естествени концентратори на напрежения и деформации. Динамичните напрежения по време на експлоатация причиняват умора на материала, стартираща около повърхността на отворите. Показателен факт е, че относителният дял на уморните разрушения в самолетостроенето е 50-90 % от всички повреди на компонентите [1]. Ефективен метод за повишаване на уморната дълготрайност на алуминиеви компоненти с отвори е студеното разширение на отворите. Основната идея на тази концепция е въвеждането на полезни остатъчни окръжни напрежения на натиск около отворите. Концепцията студено разширение на скрепителни отвори е развита и патентована от компанията Boeing за приложение в аероиндустрията [2].

Методите за студено разширение посредством преминаващ по направление на оста на отвора деформиращ елемент със стегнатост са широко използвани в практиката. Най-широко приложение намира методът Split Sleeve Cold Expansion (SSCE) [2-6]. SSCE се реализира чрез конусно-цилиндричен дорн, около който се поставя надлъжно разрязана тънкостенна втулка-посредник с вътрешно мазане. Процесът на студено разширение протича, като дорнът се изтегля обратно през разрязаната втулка, в резултат на което материалът в близост до отвора пластифицира. След студеното разширение разрязаната втулка за еднократна употреба се изхвърля. С цел да се елиминира необходимостта от скъпо струващите втулки, Hogenhout изобретява метода Split Mandrel Cold Working (SMCW) [7]. При SMCW деформиращият инструмент е надлъжно разрязан на четири части кух дорн, който се въвежда в отвора, а в последствие се втвърдява чрез осово преместване на щифт, който се разполага в отвора на дорна. Процесът студено разширение се осъществява чрез изтегляне на втвърдения дорн през отвора. Значително предимство на двата метода SSCE и SMCW е възможността за реализиране на студено разширение при едностранен достъп, т.е. необходим е само един оператор. Това е особено важно в аероиндустрията, където конструкционните елементи са с големи габарити и скрепителни брой сълържат голям отвори. Недостатък и при двата метода SSCE и SMCW е необходимостта от много на брой контролни операции в съчетание с тесен допуск на размера на Необходим e геометричен отвора. контрол диаметъра както на на предварително пробития и райберован отвор, така и на диаметъра на работната дорна. Такъв контрол се част на извършва и на осовия отвор на дорна, в който се позиционира цилиндричния при шифт метола SMCW [8]. Зa елиминиране на тези недостатъци, Максимов и Дунчева изобретяват нов метод за студено разширение [9], който представлява модификация на метода SMCW. Модифицираният SMCW метод осигурява постоянна стегнатост при относително широк допуск на първоначалния диаметър на отвора. В резултат значително се опростява технологичния цикъл и оттам се редуцират разходите. Ефективността на модифицирания SM-СШ метод в условията на относително широк допуск на диаметъра на предварително обработените отвори алуминиева сплав 2024-ТЗ в аспект на остатъчни напрежения и уморно поведение е доказана чрез задълбочено експериментално изследване в [10]. Освен чрез преминаващ по направление на оста на отвора деформиращ инструмент, създаването на зона с полезни остатъчни окръжни напрежения на натиск около отворите се постига и чрез механично въздействие върху повърхнината на отвора в радиално направление. Такива са методът, използващ дорн с памет на формата [11] и методът Symmetric cold expansion [12-14].

Основните подходи за повишаване на уморната дълготрайност в метални конструкционни елементи с отвори са обосновани в [15]. Всички те имат обща физическа основа – mechanical cold working process, който се реализира при температура, по-ниска от температурата на рекристализация на съответния метал. Освен статичните и динамични методи за студено разширение, ефективни подходи за повишаване на уморната дълготрайност са статичните и динамични методи за повърхностно пластично деформиране на отвори [16-20], както и по-нови методи, които имат за цел едновременно въвеждане на остатъчни окръжни напрежения на натиск и подобряване на комплексното състояние на материала около отвора, известно като Surface Integrity (SI). Такива са методите за третиране на отвори в суперсплави посредством "hertz contact" [21, 22] и методите, при които въздействието върху повърхнината на отвора се реализира чрез деформиращи инструменти, извършващи ротация около оста на отвора и осово преместване по направление на оста му [23, 24].

Значителен брой научни публикации са насочени към изследване на алуминиеви сплави [25-31]. Напоследък се наблюдава тенденция за по-задълбочени изследвания на ефекта от различните методи върху SI, акцентирайки върху микротвърдостта [6, 21, 22] и микроструктурата [6, 22, 27, 32, 33]. Липсват експериментални изследвания за ефекта от модифицирания SMCW метод върху получената микротвърдост и микроструктура в околност на стресираните отвори. Целта на настоящото изследване е да се оцени влиянието на модифицирания SMCW метод върху получената микроструктура, както и да се направи съпоставка на микротвърдостта на материала в околността на отвора, в сравнение с тази на не деформирана високо-яка алуминиева сплав 2024 – Т3.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

2.1. Материал

Използваният материал е алуминиева сплав 2024-ТЗ, във вид на горещо валцувани пръти с диаметър Ø32, с химичен състав, показан в табл. 1.

Таблица 1. Химичен състав на алуминиева сплав 2024-ТЗ

Al	Si	Fe	Си	Mn	Mg	Zn	Ċr	Ni	Ti
94.03	0.75	0.49	1.64	0.76	1.67	0.02	0.04	0.02	0.03
			-						

2.2 Експериментални образци

За изследването са използвани пробни тела с формата на диск с диаметър Ø32 и дебелина 6



а.

mm с централни отвори с начални диаметри 8.14 *mm* и 8.30 *mm*, получени след райбероване (фиг. 1).



Фиг. 1 Експериментални образци

След райбероване, отворите в двата диска са подложени на студено разширение чрез

модифицирания SMCW метод.



Международна научна конференция "УНИТЕХ'24" – Габрово



Фиг. 2 Инструмент, реализиращ модифицирания процес на студено разширение а.) геометрия на инструмента; б.) общ вид на инструмента

Процесът на студеното разширение се реализира с постоянна стегнатост i = D - d = 0.3 mm, тъй като същата не зависи от диаметрите на разсейването на предварително обработените отвори, а само работната част от на деформиращия дорн (фиг. 2а). На фиг. 26 е показан инструмента, включващ конусно-цилинднадлъжно разрязан ричен дорн с централен отвор и осово разположен в отвора щифт с конусен край. Двата елемента контактуват по съответните вътрешна и външна конусни повърхнини, изпълнени с един и същи ъгъл. В съответствие с технологичния цикъл, реализиран чрез модифицирания SMCW, процесът на студено разширение се състои в изтегляне на дорна заедно с щифта след достигане на плътен контакт повърхнината между на отвора, цилиндричната установъчна повърхнина на дорна (фиг. 2а) и двете конусни повърхнини дорна щифта. на И

Достигането на плътен контакт ce постига чрез осово преместване на щифта, като по този начин се гарантира компенсиране на относително поголямото разсейване на диаметъра на отворите [10, 34, 35]. След студеното извършено разширение e финално райбероване с райбер с номинален диаметър 8.5 mm.

2.3. Измерване на микротвърдостта

За определянето на микротвърдостта, в зоната афектирана от процеса студено разширение, е използван полуавтоматичен микротвърдомер Zwick/ Indentec-ZHVµ-S. Измерването на микротвърдостта е проведено по три, радиално ориентирани направления от отвора за всяка челна страна на образците. Използваното натоварване е 10g, с цел да се измери микротвърдостта максимално близо до ръба на отвора. На фиг. 3 е показан използвания за измерването микротвърдомер.



Фиг. 3 Снимка на Микротвърдомер Zwick/Indentec-ZHVµ-S

2.4. Изследване на микроструктурата

За изследване на микроструктурата в близост до отвора на алуминиевата

сплав 2024-Т3, подложена на студено разширение е използван сканиращ електронен микроскоп Zeiss Evo 10, където вторичните електрони, излъчени

от атомите, са възбудени от електронния лъч и се откриват с помощта на



Фиг. 4 Снимка на Сканиращ електронен микроскоп Zeiss Evo 10

Използваните режими на сканиращия микроскоп са: големина на тока I=200 *рА* и напрежение $U=20 \ kV$, като режимът на работа е в среда на висок вакуум. На фиг. 4 е показана снимка на сканиращия електронен микроскоп.

3. Резултати и коментари

На фиг. 5, 6, 7 и 8 е показана микроструктурата на изследваната алуминиева сплав в близост до отворите, в напречно сечение на двата образеца в зона, афектирана от работната част на надлъжно разрязания дорн. Разгледани са следните две зони: зона, афектирана от ръба на сегмента на разрязания дорн (фиг. 5 и фиг. 6); зона, афектирана от средата на сегмента на дорна (фиг. 7 и фиг. 8).

В разглежданите сечения се наблюдава влакнеста структура, текстурирана по направление на деформация при изработване на проката. Представеният прокат е подложен на термична обработка Т3 (включва само закаляване, като се очаква във времето да протече изкуствено стареене). Вероятно времето на нагряване при закаляване е относително малко, поради което в разглежданото сечение се наблюдава силно изразена текстура.

В разглежданите структури се наблюдава влакнеста α-Al фаза (твърд разтвор на Al, Cu, Mg) и интерметално съединение Al₂Cu (θ фаза). Отделянията на θ фазата се наблюдават по границите на зърната. В зоната в близост до отвора се наблюдава издребняване на зърната (фиг. 5). На фигура 6 се наблюдава частично декориране, дължащо се на изкуственото стареене.

При пробите на образеца с начален отвор 8.30 mm се наблюдават фазите, аналогични на тези в образец с диаметър 8.14 mm. В този образец се наблюлава изтъняване на α -Al влакнестата фаза и частично изменение на ориентацията на зърната спрямо оста на отвора, дължащо се на пластичната деформация в съответствие С геометрията на инструмента (фиг. 8). В зоните, отдалечени от ръба на отвора, не се наблюдават фазови и структурни двата образеца изменения за И

детектор за вторични електрони.



Фиг. 5 SEM изображения на микроструктурата на алуминиева сплав 2024-Т3, след финално райбероване на образец с начален отвор 8.14 mm, в зона, деформирана от ръба на сегмента на инструмента



Фиг. 6 SEM изображения на микроструктурата на алуминиева сплав 2024-Т3, след финално райбероване на образец с начален отвор 8.14 mm, в зоната, деформирана от средата на сегмента



Фиг. 7 СЕМ изображения на микроструктурата на алуминиева сплав 2024-Т3, след финално райбероване на образец с начален отвор 8.30 mm, в зоната, деформирана от прореза на сегмента



Фиг. 8 СЕМ изображения на микроструктурата на алуминиева сплав 2024-Т3, след финално райбероване на образец с начален отвор 8.30 mm, в зоната, деформирана от средата на сегмента

На фиг. 9, 10 и 11 са показани измерените микротвърдости в радиално направление от ръба на отвора към цилиндричната повърхнина. Измерената микротвърдост на базовия образец е с 25 % по-ниска от средно-аритметичната микротвърдост в близост до отвора на двата образеца, подложени на студено разширение (фиг. 9). От графиката се вижда, че ефекта от процеса студено разширение е ясно изразен в зона с дебелина над 5 тт, както за входната повърхнина, така и за изходната повърхнина на образеца, след което микротвърдостите се изравняват на разстояние над 8 mm от ръба на отвора. Тенденцията на нарастване на микротвърдостта на базовия образец към външната цилиндрична повърхнина е следствие от уякчаване на външните слоеве по време на изработване на проката.

На фиг. 10 и 11 е направено сравнение на измерената микротвърдост в зона до ръба на сегмента и в зона в средата на сегмента за входната и изходната повърхнина за двата образеца с начален отвор (8.14 mm и 8.30 mm).

На разстояние от около 0.2 mm до ръба на отвора, микротвърдостта в зоната, афектирана от средата на сегмента, е поголяма от тази, измерена в зоната около ръба на сегмента.

За образеца с начален отвор 8.3 mm (фиг. 11) се забелязва, че разликата между микротвърдостта в зоната в средата на сегмента и зоната около ръба на сегмента, е най-голяма. Това вероятно се дължи на по-малкото количество премахнат материал при финалното райбероване, респ. ефекта от студеното разширение е по-силно изразен в зоната деформирана от средата на сегмента, отколкото в тази, в близост до ръба му.



Фиг. 9 Средноаритметична микротвърдост в радиално направление от ръба на отвора; а.) входна повърхнина; б.) изходна повърхнина



Фиг. 10 Микротвърдост в радиално направление от ръба на отвора, при начален диаметър $d_0=8.14$ mm; а.) входна повърхнина; б.) изходна повърхнина



Фиг. 11 Микротвърдост в радиално направление от ръба на отвора, при начален диаметър $d_0=8.30$ mm;

а.) входна повърхнина; б.) изходна повърхнина

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е експериментално изследване с цел да се определи влиянието на процеса студено разширение, реализиран посредством модифицирания SMCW метод, върху получената микроструктура и микротвърдост в близост до афектирания отвор. Експерименталните резултати могат да бъдат обобщени в няколко основи извода:

✓ Наблюдава се влакнеста микростуктура с α -*Al* фаза (твърд разтвор на *Al*, *Cu*, *Mg*) и интерметално съединение *Al*₂*Cu* (θ -фаза). Отделянията се наблюдават по границите на зърната; ✓ В зоната в близост на отвора се наблюдава издребняване на зърната следствие студената пластична деформация;

✓ Измерената микротвърдост на базовия образец е с 25 % по-ниска от тази на двата образеца подложени на студено разширение. Това доказва полезния ефект от уякчаване на материала при прилагане на модифицирания SMCW процес.

✓ Влиянието на процеса студено разширение е ясно изразено в зона с дебелина над 5 *mm*, както за входната повърхнина, така и за изходната повърхнина на изследваните образци;

✓ Наблюдава се зона с дебелина 0.2 *mm*, в която микротвърдостта в зоната, афектирана от средата на сегмента, е по-голяма от тази измерена около ръба на сегмента.

Благодарности: Това изследване e финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП "Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформаиия" 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abdelkrim Aid, Zahar Semari, Mohamed Benguediab, Finite Element Method Investigation of the Effect of Cold Expansion Process on Fatigue Crack Growth in 6082 Aluminum Alloy. Modeling and Numerical Simulation of Material Science (2014) 4 25-31.
- [2] Champoux L. A. Coldworking Method and Apparatus. USA Patent 3566662, Patented March 2, 1971.
- [3]. Dey MK, Kim D, Tan H (2022) Finite element parametric study of the split sleeve cold expansion on residual stresses and pulling force. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science; 236(5):2447-2461. doi:10.1177/09544062211025563.
- [4]. Faghih S, Shaha S.K, Behravesh S.B, Jahed H (2020) Split sleeve cold expansion of AZ31B sheet: Microstructure, texture and residual stress. Mater. Des. 186 108213.
- [5]. Faghih S, Behravesh SB, Shaha SK, Jahed H (2023) Effect of split sleeve cold expansion on fatigue and fracture of rolled AZ31B magnesium alloy. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 123 103715 https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103715
- [6] Su R., Li J., Liu W., Xu C., Gao L., Liang X., Wu D., Huang X., Dong H., Ma H.

Investigation on fatigue failure of splitsleeve cold expansion holes of 7075-T651 aluminum alloy. Materials Today Communications 35 (2023) 106290 doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106290.

- [7]. Hogenhout F (1986) Method and apparatus for hole coldworking. USA Patent 4583388, Patented April 22, 1986.
- [8]. Split Mandrel Puller Tooling Manual OM-SM-9302-3; West Coast Industries: Seatle, WA, USA. Available online: <u>https://coldwork.com/images/pdfs/</u> SM_Tooling.pdf (accessed on 29 February 2024)
- [9]. Maximov, J.T.; Duncheva, G.V. Device and Tool for Cold Expansion of Holes. International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT) WO 2014/012153 A1, 23 January 2014.
- [10]. Maximov J, Duncheva G, Anchev A, Dunchev V, Daskalova P (2024) Modified Split Mandrel Method and Equipment to Improve the Fatigue Performance of Structural Components with Fastener Holes. Metals 2024, 14, 303. https:// doi.org/10.3390/met14030303.
- [11]. Kennedy JR, Larson DJ, Method of cold working holes using a shape memory alloy tool. USA Patent 5265456, Patented Nov. 30, 1993.
- [12]. Maksimov YT, Duncheva GV, Device and tool for cold expansion of fastener holes. Patent No: US 8,915,114 B2, Dec., 23.2014.
- [13]. Maximov JT, Duncheva GV, Amudjev IM (2013) A novel method and tool which enhance the fatigue live of structural components with fastener holes. Engineering Failure Analysis 31 132-143.
- [14]. Maximov JT, Duncheva GV, Ganev N, Amudjev IM (2014) Modeling of Residual Stress Distribution around Fastener Holes in Thin Plates after Symmetric Cold Expansion. J Braz Soc Mech Sci Eng 36(2) 355-369.
- [15]. Duncheva G, Daskalova P, Methods for increasing the fatigue life of structural components with fastener holes –state of the art. Journal of the Technical University of Gabrovo 68 (2024) 21-36.
- [16] Tolga Bozdana A. (2005) On the mechanical surface enhancement techniques in aerospace industry – a review of

technology. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal 77/4 279–292 DOI 10.1108/00022660510606349.

- [17] Gu H, Jiao L, Yan P, Song Y, Guo Z, Qiu T, Wang X (2022) Hole surface texture reconstructed with laser shock peening and effect on fretting behavior. Wear 494-495 204242.
- [18] Achintha M, Nowell D, Fufari D, Sackett EE, Bache MR (2014) Fatigue behaviour of geometric features subjected to laser shock peening: Experiments and modelling International Journal of Fatigue 62 171–179.
- [19] Ivetic G, Meneghina I, Troiania E, Molinaria G, Ocanab J, Morales M, Porro J, Lanciotti A, Ristori V, Polese C, Plaisier J, Lausi A (2012) Fatigue in laser shock peened open-hole thin aluminium specimens. Materials Science and Engineering A 534 573–579.
- [20] Sikhamov R, Fomin F, Klusemann B, Kashaev N (2020) The Influence of Laser Shock Peening on Fatigue Properties of AA2024-T3 Alloy with a Fastener Hole. Metals, 10, 495 doi:10.3390/met10040495.
- [21] Cao X., Zhang P., Liu S., Lei XL., Wang RZ., Zhang XC., Tu ST. A novel hole coldexpansion method and its effect on surface integrity of nickel-based superalloy. Journal of Materials Science & Technology 59 (2020) 129–137 doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.022.
- [22] Yao SL., Lei XL., Wang RZ., He CY., Zhang XC., Tu ST. A novel cold expansion process for improving the surface integrity and fatigue life of small-deep holes in Inconel 718 superalloys. International Journal of Fatigue 154 (2022) 106544 doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106544
- [23]. Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Amudjev IM (2019) New method and tool for increasing fatigue life of a large number of small fastener holes in 2024-T3 Al-alloy. J Braz Soc Mech Sci Eng 41:203 DOI:10.1007/s40430-019-1709-8.
- [24]. Duncheva G.V., MaximovJ.T., Ganev N (2017) A new conception for enhancement of fatigue life of large number of fastener holes in aircraft structures. Fatigue Fract Eng Mater Struct 40(2) 176-189.

- [25] Lacarac V. D., Smith D. J., Pavier M. J. The effect of cold expansion on fatigue crack growth from open holes at room and high temperature. In-ternational Journal of Fatigue 23(0) (2001) 161-170.
- [26] Aid A, Semari Z, Benguediab M (2014)
 Finite Element Method Investigation of the Effect of Cold Expansion Process on Fatigue Crack Growth in 6082 Aluminum Alloy. Modeling and Numerical Simulation of Material Science 4 25-31 doi: 10.4236/mnsms.2014.41005.
- [27] Yan-li W., You-li Z., Shuai H., Han-xiao S., Yong Z. Investigation on fatigue performance of cold expansion holes of 6061-T6 aluminum alloy. International Journal of Fatigue 95 (2017) 216–228 dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.10.030.
- [28] Chakherlou T.N., Razavi M.J., Aghdam A.B., Abazadeh B. An experimental investigation of the bolt clamping force and friction effect on the fatigue behavior of aluminum alloy 2024-T3 double shear lap joint. Mater. Des. 32 (2011) 4641–4649.
- [29] Huang Y, Li H, Yang X, Guan Z, Li Z, Sunc Y (2017) Improving the fatigue life of 2297-T87 aluminum-lithium alloy lugs by cold expansion, interference fitting, and their combination. Journal of Materials Processing Tech. 249 (2017) 67–77.
- [30] Liu F., Su H, Xu J, Liang Y (2023) Fatigue performance on 7050 aluminum alloy by twice hole expansion strengthening of split mandrel. Int J Adv Manuf Technol 129, 2241–2256. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12416-8.
- [31] Li Q., Xue Q., Hu Q., Song T., Wang Y., Li S. Cold Expansion Strengthening of 7050 Aluminum Alloy Hole: Structure, Residual Stress, and Fatigue Life. International Journal of Aerospace Engineering (2022) 4057898

https://doi.org/10.1155/2022/4057898.

- [32] Shanmukha N., Krishna M. Microstructure analysis of cold worked holes. Materials Science Forum 539-543 (2007) 2222-2227 doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.539-543.2222.
- [33]. Wang C., Zou F., Zhou E., Fan Z., Ge, E. An Q., Ming W., Chena M. Effect of split sleeve cold expansion on microstructure and fatigue performance of 7075-T6 aluminum

alloy holes. International Journal of Fatigue 167 (2023) 107339 doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107339.

[34] Anchev AP., Dunchev V.P., Daskalova PH, Fatigue behavior experimental study of specimens with fastener holes in 2024-T3 aluminum alloy subjected to cold expansions via modified split mandrel method. International Scientific Conference, "Mechatronic, Eco – and energy saving systems and technology". Gabrovo. 2023 p.155-164 ISSN 2815-4924.

[35] Dunchev VP, Daskalova PH, Experimental study of residual stresses around fastener holes in 2024-T3 aluminum alloy via modified split mandrel method. International Scientific Conference, "Mechatronic, Eco and energy saving systems and te-chnology". Gabrovo. 2023 p.136-151 ISSN 2815-4.