

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАМКОВИ ВЪЗЛИ ОТ СТОМАНЕНИ ТЪНКСТЕННИ СТУДЕНОФОРМУВАНИ ПРОФИЛИ

Р. Младенова<sup>1</sup>, Н. Рангелов<sup>2</sup>, О. Ганчев<sup>3</sup>

*Ключови думи:* тънкостенни студеноформувани профили, възли

*Научна област:* строителни стоманени конструкции

### РЕЗЮМЕ

В статията се представя експериментално изследване на две конфигурации възли с възлови плочи, предназначени за рамки с тънкостенни елементи от сдвоени студеноформувани С-профили. Елементите от възела се свързват чрез болтове само по стебло с цел улеснено производство и монтаж.

Направено е сравнение за поведението и формата на разрушение на двата вида конфигурации, което е показателно за необходимостта от изготвяне на препоръки за проектиране на подобен тип възли.

### 1. Въведение

Студеноформуваните профили са широко разпространени за столици, водачи, второстепенни греди, изграждане на стенни панели – решетъчни и от профилирана ламарина, стелажи за съхранение в складове, съединения на подови конструкции при средни отвори, осигурителни помощни конструкции при изграждането на обекти, покривни и подови конструкции (комбинирани плочи и оставащ кофраж) и др. Предпочитани са заради относително ниското си тегло. Дебелината за студеноформувани профили варира от 0,5 mm до 6 mm. Най-използваните студеноогънати сечения са С- и

<sup>1</sup> Радостина Младенова, инж. докторант, кат. „Масивни, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: radost.mladenova@gmail.com

<sup>2</sup> Николай Рангелов, доц. д-р инж., кат. „Масивни, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: nick.rangelov@gmail.com

<sup>3</sup> Огнян Ганчев, гл. ас. инж., кат. „Масивни, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: ganchev\_fce@uacg.bg

Z-профили с крайни вкоравители, при номинална дебелина на изходната ламарина от 1 mm до 3,5 mm.

Поради малката дебелина са възможни разнообразни и по-сложни форми на основните сечения. Използването на вкоравители – междинни и/или крайни допринася за по-високата носимоспособност на напречните сечения. Надеждната антикорозионна защита на тези тънкостенни елементи се постига най-често чрез горещо поцинковане на изходния материал, което е едно допълнително предимство.

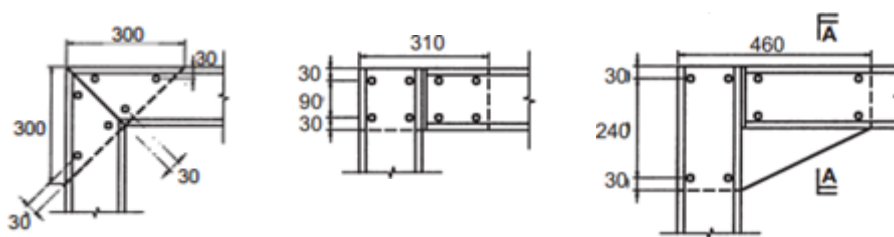
Тенденцията е нарастване на използването на тънкостенни стоманени профили като главни конструктивни елементи при сгради с ниска до средна етажност, както и портални рамки с отвори до 12 – 15 m. Това води до прилагане на нов тип възли, различни от прилаганите конвенционални решения, които да могат да поемат момент в равнината на рамката.

Липсата на конкретна информация за конструиране и оразмеряване на подобен тип възли в нормативните документи [1, 3, 4] и ръководствата за проектиране [6, 10, 12] изисква задължително проектиране с изпитване и/или изследвания с опростени или по-сложни числени модели.

## 2. Развитие на задачата

Обичайните конфигурации на възлите при рамкови конструкции с използване на заварени съединения, фланцеви плочи и т.н. по обясними причини се оказват неприложими при конструкции от тънкостенни студеноформувани профили. Най-масовата практика в този случай е възлите да се конструират с помощта на допълнителни части или само плочи, които тук ще наричаме „възлови плочи“. Проектирането на такива възли невинаги може да се извършва въз основа на обичайните предпоставки. По тази причина в литературата са публикувани голям брой експериментални изследвания, подкрепени от повече или по-малко опростени модели, разглеждащи различни конфигурации.

В [5] авторите разглеждат възможните форми на разрушаване на подобен тип възли при различни конфигурации на разположението на съединителните средства и различни решения на възловата плоча за едноетажни рамки (фиг. 1), докато в [11] са застъпени междинни и крайни възли на многоетажни рамки.



Фиг. 1. Рамкови възли на едноетажни сгради [5]

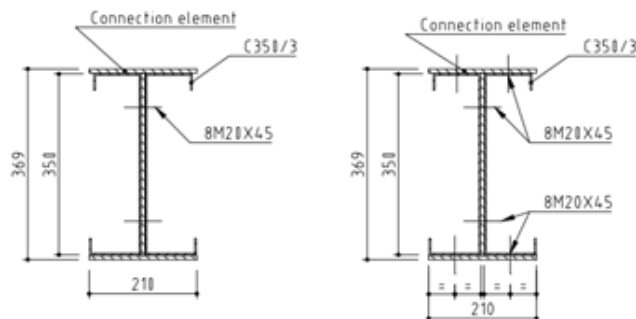
Представените в [5] и [11] изследвания са експериментални на база сдвоени С-сечения с крайни вкоравители. Основната задача е да се разработят различни конфигурации на възли с болтови съединения при достатъчно висока ефективност за поемане на огъващи моменти. Тази ефективност авторите дефинират чрез отношението  $\psi$  на носимоспособността на огъване на болтовото съединение (меродавно за носимоспо-

собността на възела) към носимоспособността на огъване на напречното сечение, в случая формирано от двойката С-профили. Поставената цел е да се постигне  $\psi \geq 75\%$ .

Авторите J.B.P. Lim и D.A. Nethercot представят възли с „вута“ както за билно присъединяване, така и за „ригел-колона“ [8, 9].

В [9] е установено влиянието на разстоянието между съединителните средства. При компактните съединения е силно изразено удължаване на отворите (смачкване) и намалена ротационна коравина на възела, докато при раздалечено положение на болтовете удължаването на отворите е незабележимо, дължащо се на реализираната по-малка сила в съединителните средства.

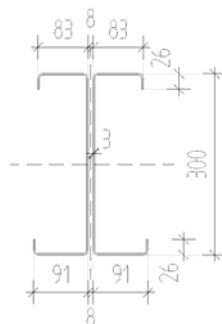
За да постигнат по-висока носимоспособност и ефективност на възела, Dubinã et al. [7] предлагат усложнени конфигурации на възли, при които възловата плоча е заменена с по-сложна възлова част, включваща и пояси, което позволява реализиране на болтово съединение и при поясите на профилите (фиг. 2).



Фиг. 2. Напречно сечение при възела и разположение на болтовете в [7]

### 3. Конструиране на възела

В практиката *студеноформуваниите профили* се използват основно за столици и водачи, което е довело до производство на профили с различни широчини на поясите с цел да се улесни значително монтажът чрез припокриване на двата профила в зоната на снаждане. За експерименталното изследване на възела е използвано сечение **C300×91×83×26×3** (фиг. 3). Поради липсата на предлагане на профили с височина по-голяма от 200 mm, С-профилите за експерименталната част бяха изработени от ламарина с дебелина 3 mm, огъната на абкант.



Фиг. 3. Напречно сечение за ригелите и колоните



#### 4. Експериментална програма

За експерименталното изследване бяха изготвени две серии от общо 8 образеца с действителни размери. Размерите на образците са съобразени с местата на анкериране към силовия стоманобетонен под в лабораторията на катедра МДПК.

За да се определят границата на провлачване, якостта на опън и относителното удължение при достигане на якостта на опън, бяха взети епруветки от С-профилите и възловите плочи и изпитани спрямо предписанията на [2]. Резултатите от изпитването на опън са представени в табл. 1 и табл. 2, съответно за С-профилите и за възловите плочи.

**Таблица 1. Резултати от изпитването на опън за С-профилите**

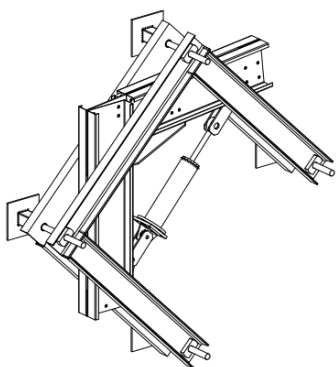
Образец	$t_{cp}$ , mm	$b_{cp}$ , mm	$A$ , cm <sup>2</sup>	$F_y$ , kN	$f_y$ , MPa	$F_u$ , kN	$f_u$ , MPa	$\epsilon_u$ , %
1-С	3.16	23.93	0.7562	30.2	399	37.6	497	-
2-С	3.2	23.92	0.7654	30.5	398	38.1	498	15.25
3-С	3.19	23.68	0.7554	30.69	406	38.75	513	19.05

**Таблица 2. Резултати от изпитването на опън за възловите плочи**

Образец	$t_{cp}$ , mm	$b_{cp}$ , mm	$A$ , cm <sup>2</sup>	$F_y$ , kN	$f_y$ , MPa	$F_u$ , kN	$f_u$ , MPa	$\epsilon_u$ , %
1-□	8.17	24.5	2.0017	42.4	212	66.1	330	-
2-□	8.16	25	2.0400	48.2	236	71.8	352	33.91
3-□	8.42	25.12	2.1151	42.6	201	68.4	323	35.16

За опитната постановка беше изготвен стенд (фиг. 6 и фиг. 7), разположен успоредно на силовия под. Натоварването се реализира с един хидравличен крик, разположен по направление на силата  $F$  (вж. фиг. 5). Изготвена беше програма за прилагане на статичното натоварване, която включва два етапа:

- предварителен – за проверка на правилното закрепване и действие на измерителните уреди и натоварващата система и за отчитане на неработната деформация (изчерпване на луфтовете);
- основен – натоварване до разрушаване на възела.



**Фиг. 6. Проектно положение на стенда**

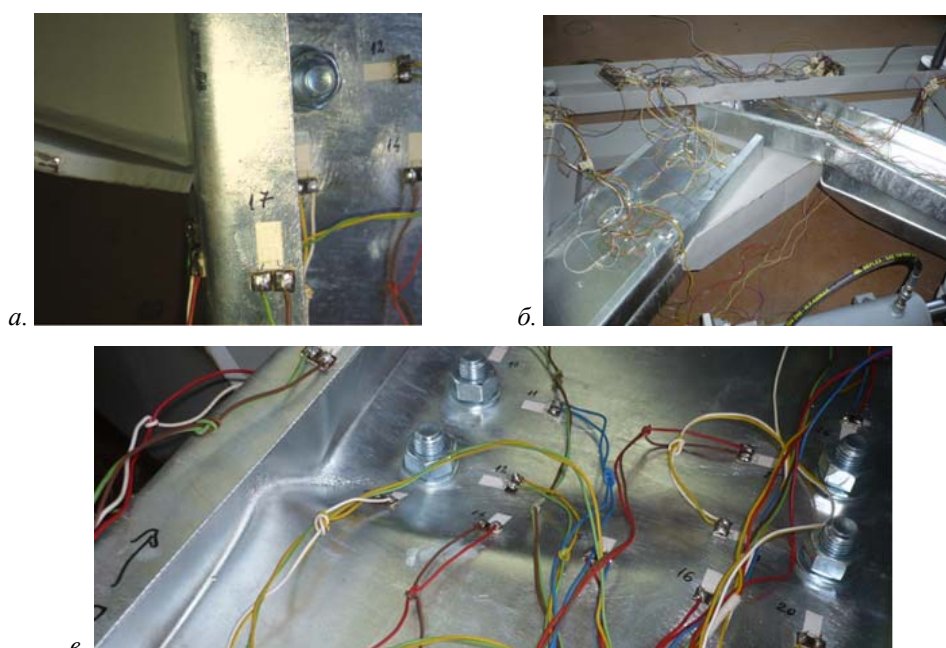


**Фиг. 7. Разположение на стенда в лабораторията**

#### 4.1. Несиметрична конфигурация – М1

За конфигурация М1 бяха подготвени 4 броя образци. Поради наличието на неточности в изработването и монтажа на елементите, бе предвидено отстраняването им за образци М1-2, М1-3 и М1-4.

Образец М1-1, показан на фиг. 8, бе изпитан, без да бъдат отстранени неточностите. След изчерпване на неработната деформация натиснатият пояс на възловата плоча се опря в поясите на С-профилите, съставляващи колоната, което предизвика предаване на силата като местен товар в зоната на опиране. Вижда се на фиг. 8б, че завъртането на възела се осъществява в зоната на контакта между пояса на възловата плоча и поясите на колоната, т.е. приетото от авторите завъртане спрямо центъра на завъртане на болтовата група е невалидно.



**Фиг. 8. Образец М1-1**

*а. Опиране на пояса на възловата плоча в поясите на колоната;  
б. и в. Разрушение на образца*

За образец М1-2 отстранихме част от натиснатия пояс на възловата плоча. На фиг. 9а е показана неукрепената част от възловата плоча, която е с дължина приблизително 50 mm, а на фиг. 9б се вижда разрушението на възела. Формата на разрушение, в случая загуба на обща устойчивост на възловата плоча в неукрепената зона, е показателна за необходимостта от изготвяне на конкретни препоръки за проектиране на този тип възли.

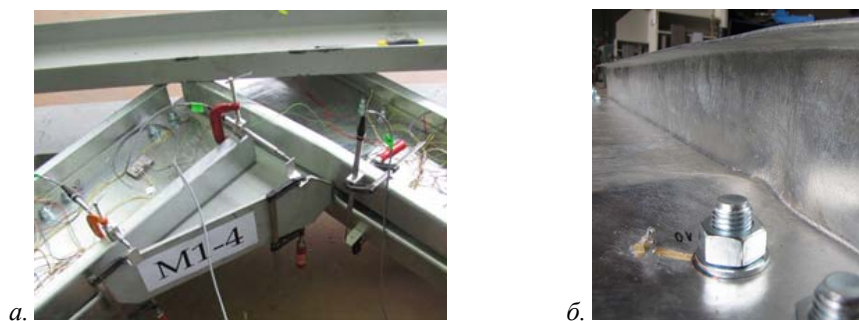
За останалите образци от конфигурация М1 отстраняването на неточностите се прецизира и дори след като се достигна разрушение на възела натиснатият пояс на възловата плоча не опря в поясите на С-профилите. На фиг. 10а и 10б е показан пластичният механизъм на разрушение. Взаимното преместване на двата С-профила в зоната на пластичния механизъм е значително по-малко, в сравнение с взаимното преместване на С-профилите от образец М1-1.



**Фиг. 9. Образец M1-2**

*а. Отстраняване на част от пояса на възловата плоча; б. Разрушение на образца*

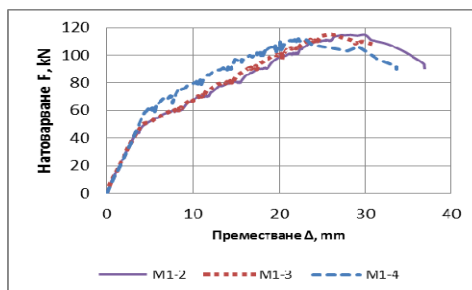
Пластичният механизъм се образува в близост до първа болтова редица, но в тази част, където сечението преминава от сдвоени С-профили с възлова плоча към само сдвоени С-профили. Първа болтова редица е най-натоварената болтова редица в целия възел. Това се дължи на несиметричната възлова плоча, както и на по-големия момент, който се поема от колоната. Фактът, че центърът на завъртане се измества към първа болтова редица, се видя в лабораторията при отстраняване на възловата плоча от С-профилите.



**Фиг. 10. Образец M1-3 и Образец M1-4**

*а. и б. Разрушение на образците*

Фиг. 11. илюстрира зависимостта „сила–преместване“ по направление на силата  $F$ , приложена в двата края на образца. Резултатите от образец M1-1 не са взети предвид. Установено е, че въпреки получените две форми на разрушение, образците достигат до крайно гранично състояние при приблизително еднакви стойности.

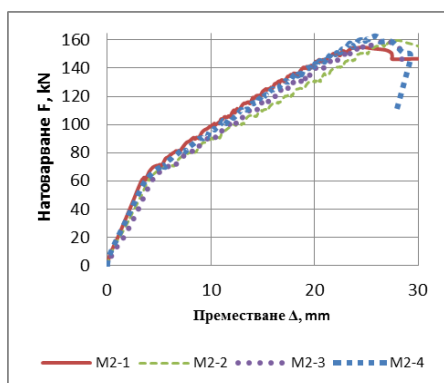


**Фиг. 11. Зависимост „сила–преместване“ по направление на силата  $F$**

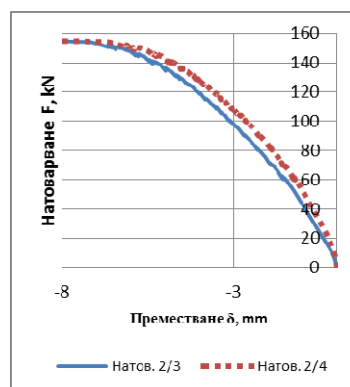
## 4.2. Симетрична конфигурация – М2

За конфигурация М2 също бяха подготвени 4 броя образци. Характерно за тези образци беше разрушението от местната загуба на устойчивост на стемлото, както при образци М1-3 и М1-4, но при 34% по-голяма приложена сила  $F$  (фиг. 12 и фиг. 15). Образец М2-3 е изключение от останалите образци от конфигурация М2, защото още при огъването на единия С-профил е било заложено несъвършенство, при което профилът е произведен с по-голяма височина, причина за опирането на пояса на възловата плоча в пояса на С-профила още преди да се изчерпа неработната деформация. Както се вижда от графиката на фиг. 12, образец М2-3 се разрушава при приблизително същата сила като останалите.

От фиг. 13 може да заключим, че взаимното преместване на С-профилите от колоната и ригела са приблизително еднакви, т.е. образува се пластичен механизъм и в двата елемента.



Фиг. 12. Зависимост „сила – преместване“ по направление на силата  $F$

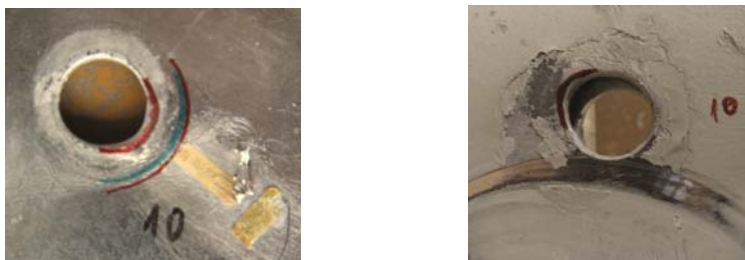


Фиг. 13. Зависимост „сила–взаимно преместване“ напречно на С-профилите в близост до възловата плоча

## 4.3. Обобщение

Разрушението при двете конфигурации е сходно, като първо се наблюдава смачкване на отворите (фиг. 14), последвано от образуване на пластичен механизъм в С-профилите в натисквата зона близо до натиснатия пояс на възловата плоча. При несиметричната конфигурация М1 пластичният механизъм е силно изразен в колоната, докато при симетричната М2 се образува и в двата елемента.

- Прави впечатление от образец М2-3, че при наличие на начални неточности при изготвяне и монтаж, в случая – опиране на пояса на възловата плоча в поясите на С-профилите, пластичният механизъм се локализира в зоната на опиране, но дори тогава образецът се разруши при същата стойност, както останалите от конфигурация М2.
- Подобно на образец М2-3 при два от образците на конфигурация М1 се наблюдаваха начални неточности, които не повлияха на стойността на силата за разрушение.
- Образец М1-2 се разруши от загуба на устойчивост на възловата плоча в зоната на премахнатия пояс при същата сила на разрушение, както при останалите образци от конфигурация М1.

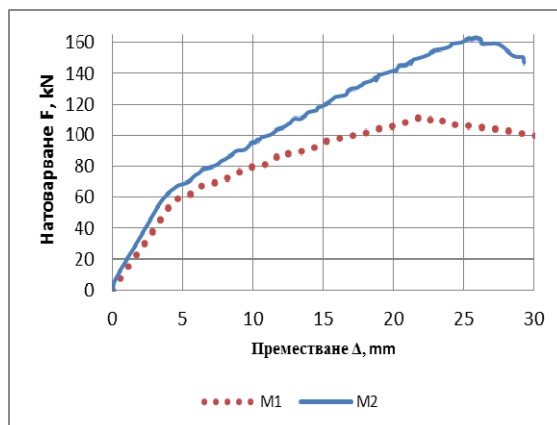


Фиг. 14. Смачкване на отворите в С-профила и във възловата плоча за всички образци

### 4.3. Заключение

Прилагането на тънкостенни студеноогънати профили е ефективно не само за столици и водачи, но и при леки рамкови конструкции. Основен проблем в такива случаи е рационалното конструиране и изчисляване на рамковите възли. Разгледани са две конфигурации на възли, при които свързването на ригела и колоната е с възлови плочи, окантени с натискови пояси, и болтови съединения само към стемлата на двойките С-профили, от които са съставени ригелите и колоните.

Установено е, че симетричната конфигурация М2 е с приблизително 36% по-голяма носимоспособност на възела от конфигурация М1 (фиг. 15), което може да се отдаде на отдалеченото разположение на центрoвете на болтовите групи от максималния теоретичен момент.



Фиг. 15. Зависимост „сила – преместване“ по направление на силата F за серия М1 и М2

### ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1993-1-3:2007. Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-3: Общи правила. Допълнителни правила за студеноформувани линейни и равнинни елементи. CEN, Oct. 2006.
2. БДС EN ISO 6892-1 – Метални материали. Изпитване на опън. Част 1: Метод за изпитване при стайна температура.
3. AISI S100-2007. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute (AISI), Washington, D.C., 2007.

4. BS 5950-5:1998 Structural use of steelwork in building – Part 5. Code of practice for design of cold formed thin gauge sections. British Standards Institution, 1998.
5. Chung K. F., Lau L. Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members. Engineering Structures 21: 898-911, 1999.
6. Dubinǎ D., V. Ungureanu, R. Landolfo. Design of Cold-Formed Steel Structures. ECCS, 2012.
7. Dubinǎ D., A. Stratan, A. Cuitina, L. Fulop. Strength, stiffness and ductility of cold-formed steel bolted connections. Connections in Steel Structures V, June 3-4, 2004.
8. Lim J. B. P., D. A. Nethercot. Ultimate strength design of bolted moment connections between cold-formed steel members. “Advances in Steel Structures”, Vol. 1, 2002.
9. Lim J. B. P., D. A. Nethercot. Ultimate strength design of bolted moment connections between cold-formed steel members. Thin-Walled Structures 41:1019-1039, 2003.
10. Rhodes J. Design of cold-formed steel members. Oxford: Elsevier, 1991.
11. Wong M. F., Chung K. F. Structural behavior of bolted moment connections in cold-formed steel beam-column sub-frames. Journal of Constructional Steel Research 58: 253-274, 2002.
12. Yu Wei-Wen. Cold-formed steel design, 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc, 2000.

Постъпила: април 2015 г.

## **EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FRAME KNEE JOINTS BETWEEN THIN-GAUGED COLD-FORMED MEMBERS**

**R. Mladenova<sup>1</sup>, N. Rangelov<sup>2</sup>, O. Ganchev<sup>3</sup>**

**Keywords:** *thin-gauged cold-formed steel sections, joints, bolted connections, experimental investigation*

**Research area:** *structural engineering, steel structures*

### **ABSTRACT**

This paper presents an experimental investigation of two different configurations of frame knee joints of frames with members composed of cold-formed back-to-back lipped channels. The joints are designed with connecting gusset plates and bolted moment connection only on webs.

The behavior and failure modes of joints have been observed in order to evaluate the structural efficiency of the studied configurations of frame knee joints.

---

<sup>1</sup> Radostina Mladenova, Eng. PhD student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: radost.mladenova@gmail.com

<sup>2</sup> Nikolaj Rangelov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: nick.rangelov@gmail.com

<sup>3</sup> Ognian Ganchev, Chief Assist. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ganchev\_fce@uacg.bg