



Получена: 23.01.2020 г.

Приета: 11.02.2020 г.

РАЗРУШЕНИЕ ОТ ИЗСКУБВАНЕ НА СЪЕДИНЕНИЯ МЕЖДУ СТУДЕНОФОРМУВАНА ГРЕДА И ОГРАЖДАЩА ЛАМАРИНА, ПОДЛОЖЕНИ НА СМУЧЕНЕ ОТ ВЯТЪР – АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Ч. Пенелов¹

Ключови думи: натоварване от вятър, студеноформувана греда, изкубване

РЕЗИЮМЕ

В инженерната практика не са редки случаите, при които при ветрово въздействие се наблюдава разрушение от изкубване на съединенията с винтове, свързващи ограждащата ламарина към стоманените греди. През 2012 г. в САЩ бяха представени резултатите от мащабна експериментална програма, изследваща общата устойчивост на студеноформувани греди с отворен профил, подложени на смучене от вятър, при наличие на профилирана ламарина, свързана към опънатите им пояси.

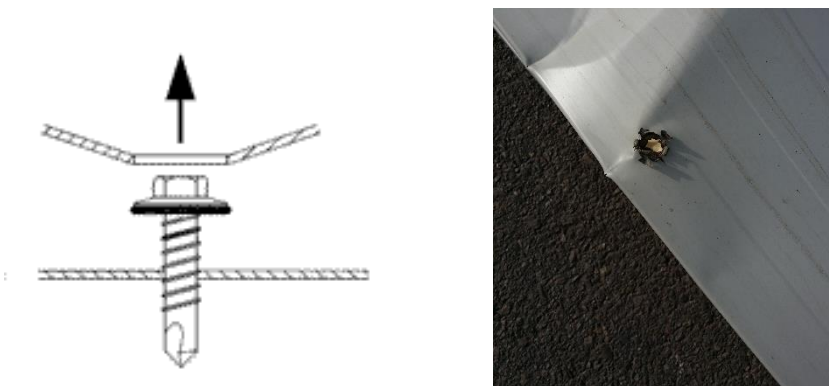
Тук се анализират два от експерименталните образци с греди от С-профил, при които разрушението настъпва чрез изкубване на ламарината през главата на винта. Тези разрушения не се предсказват от действащите в САЩ норми AISI-S100, които не дават методика за определяне на опънните усилия във винтовете при смучене от вятър, отчитаща лостовия ефект в съединението, причинен от усукването на гредата. В настоящата статия е установено, че наблюдаваната форма на разрушение на съединенията е предсказуема, в случай че за определянето на опънните усилия във винтовете се използва методиката на EN 1993-1-3:2006. За наблюдаваните разрушения допринася и липсата на подложни шайби под главите на винтовете.

¹ Чавдар Пенелов, гл. ас. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: penelov_fce@uacg.bg

1. Въведение

В нашата и световната практика не са редки случаите, при които при ветрово въздействие се наблюдава разрушение от изкубване (фиг. 1) на съединенията с винтове, свързващи ограждащата или покривна ламарина (или сандвич-панелите) към стоманените греди (стенни водачи или покривни столици). Причините за подобни разрушения най-често са следните [3]:

- При проектирането не е отделено достатъчно внимание на тези съединения, като се спазени единствено минималните изисквания, дадени в продуктовите каталози на ламарината (или сандвич-панелите).
- При изпълнението на съединенията не са поставени подложни шайби (или подложни профили) под главите на винтовете.



Фиг. 1. Изкубване на ламарина [9] и на стенен сандвич – панел [3] през главата на винта

В работата на Gao [8] (2012 г., САЩ) са представени резултатите от мащабна експериментална програма, изследваща общата устойчивост на студеноформувани греди с отворен профил, подложени на смучене от вятър, при наличие на профилирана ламарина, свързана към опънатите им пояси. Тук се анализират два от експерименталните образци с греди от С-профил, при които разрушението настъпва чрез изкубване на ламарината през главата на винта (*pull-over failure* или *pull-through failure*). Gao окачествява тези разрушения като непредвидими от гледна точка на американските норми AISI S100 [2], които не дават методика за определяне на опънните усилия във винтовете с отчитане на лостовия ефект за съединението „гредо-ламарина”. За съжаление, в [8] не са подробно анализирани причините, довели до тази нежелана форма на разрушение, лимитираща носещата способност на гредата при смучене от вятър.

В настоящата работа е направен опит да се „възстанови” по аналитичен път напрегнатото състояние на винтовете на съединенията „гредо-ламарина” на изследваните образци от [8], като е показано, че наблюдаваната форма на разрушение на съединенията е напълно предсказуема, в случай че за определянето на усилията във винтовете се ползва методиката на EN 1993-1-3:2006 [7], т. 10.1.6. Анализират се подробно причините, довели до споменатите разрушения.

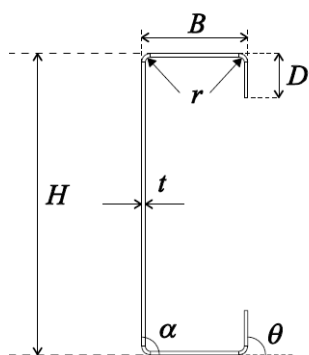
2. Кратко описание на анализираниите тук експериментални образци от [8]

Студеноформуваните греди са с напречно сечение от С-профил, имат статическа схема проста греда, а отворът им е 7468 mm. Статическият модел е реализиран чрез ставни опори в краищата на гредата – подвижна и неподвижна, така че да се елиминира възможността от възникване на осови сили в гредата при работата ѝ по деформирана схема. Гредите са изпитвани по двойки, като товарната ширина за всяка от гредите е 2070 mm. Също така, гредите са разположени приблизително в средите на товарните си ширини. Към долните пояси на гредите, чрез самопробивни самонарязващи винтове, е свързана профилирана ламарина. Ветровото въздействие е имитирано чрез вакуум, генериращ смучене по долната повърхност на ламарината, при което натиснати са горните (неукрепени директно от ламарината) пояси на гредите. При така дефинираната опитна постановка, собственото тегло на ламарината (около $0,042 \text{ kN/m}^2$) се суперпонира със смученето от вятър, като допринася (макар и слабо) за увеличаването на опънните усилия във винтовете.

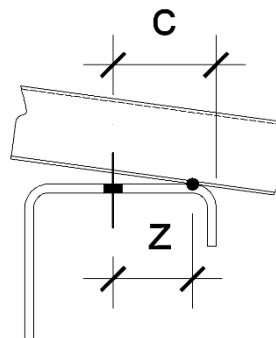
В табл. 1 са дадени размерите на напречните сечения на студеноформуваните греди (вж. и фиг. 2), както и експериментално определената граница на провлачане на материала им f_y . Ъгълът на огъване на вкоравителите на поясите е $\theta = 90^\circ$.

Таблица 1. Данни за разглежданите експериментално изследвани греди от [8]

Образец		B, mm	D, mm	H, mm	r, mm	t, mm	f_y , MPa
№	Означение						
#10	C200D-1	65,2	21,3	203	5,1	2,57	522
#11	C200D-2	65,8	21,3	203	5,8	2,57	519



а) означения на размерите на напречните сечения на гредите [8]

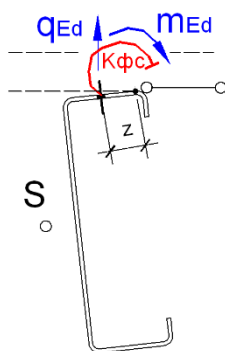


б) отстояние на винта „с“ [8] и прието рамо на вътрешните сили за съединението „z“

Фиг. 2. Геометрични размери на образците

При ветрово натоварване столиците от С-профил се усукват (фиг. 3). Усукващият момент се дължи основно на: 1) несъвпадението между приложната точка на ветровото натоварване q_{Ed} и центъра на срязване на профила S и 2) стремежа на натиснатия (неук-

репен директно от ламарината) пояс да загуби на обща устойчивост извън равнината на стеблото (фиг. 3). Изследваните тук греди са с напречни сечения от клас 4 съгласно EN 1993-1-1 [6], но за експериментално получения товар, съответстващ на разрушение на съединенията, теоретично не се очаква изключване на зони от натиснатите части на напречното сечение. Именно с тази компактност на напречните сечения (в комбинация с тънката ламарина) *Gao* [8] обяснява разрушенията на съединенията „гредата-ламарина“: напречното сечение на гредата се усуква без дисторсия и без местна загуба на устойчивост, създавайки силно изразен лостов ефект, при който се претоварва съединението към ламарината в резултат на генерирания в него огъващ момент m_{Ed} за единица дължина. Това описание на наблюдаваното явление в [8] обаче само по себе си не дава количествена оценка на риска от разрушение на съединението.



Фиг. 3. Усилия в съединението „гредата-ламарина“ за единица дължина от гредата, допринасящи за опъна във винтовете

3. Данни за профилираната ламарина и съединителните средства, използвани в експерименталните образци от [8]

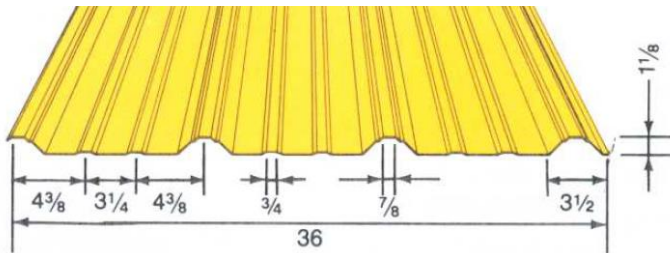
Ламарината Duga-Rib[®] [5], използвана в разглежданите тук експерименти от [8], се произвежда от американската фирма STAR[®], като е предназначена за стенни ограждения – вж. фиг. 4а. Произвежда се от стомана ASTM A792, защитена с алуминиево-цинково антикорозионно покритие, с минимална граница на провлачане 340 MPa (експериментално определената граница на провлачане в [8] е 380 MPa). Въпросната стомана се предлага с различни качества в зависимост от минималната якост на опън (410 или 450 MPa). За съжаление, в [8] липсват данни относно действителната якост на опън на използваната в експериментите ламарина. Номиналната дебелина на ламарината е 0,46 mm (в нея не е включена дебелината на антикорозионното покритие).

За свързването на ламарината към гредите са използвани #12 винтове с номинален диаметър 5,5 mm – вж. фиг. 4б. Номиналният диаметър d_w на интегралната шайба, монолитно свързана към главата на винта, е 10,5 mm [4], като не са предвидени допълнителни шайби (*sealing washers*) под главата на винта, което се допуска от фирмата STAR[®] [5].

Съгласно американските норми AISI S100 [2], такива допълнителни шайби (с диаметър поне 12,7 mm) са задължителни, когато укрепващата функция на профилираната ламарина при смучене от вятър се отчита съгласно опростената методика на [2]. В този смисъл, изследваните тук образци не отговарят на споменатото нормативно изискване на

американските норми. От друга страна, EN 1993-1-3 не предписва задължителен минимален диаметър на шайбата, но базираната на табл. 10.3 на [7] методика за определяне на ротационната коравина на съединението „гредата-ламарина“ при смучене от вятър е основана на диаметър на шайбата 16 mm.

Каталогът на ламарината [5] изисква винтовете да се разполагат през максимум 12 инча (305 mm) за междинните (по височина на стената) греди (стенни водачи), но същевременно изисква съгъстяването на винтовете на нивото на корниза (вж. фиг. 5) и при цокъла. В разглежданите тук експерименти [8] винтовете са разположени през 305 mm по дължината на гредата (което съгласно AISI S100 [2] е максимално допустимото разстояние между винтовете). В табл. 2 са дадени отстоянията на винтовете спрямо ръба на пояса на гредите – вж. фиг. 2б, както и ротационната коравина на съединенията „гредата-ламарина“ (вж. фиг. 3).

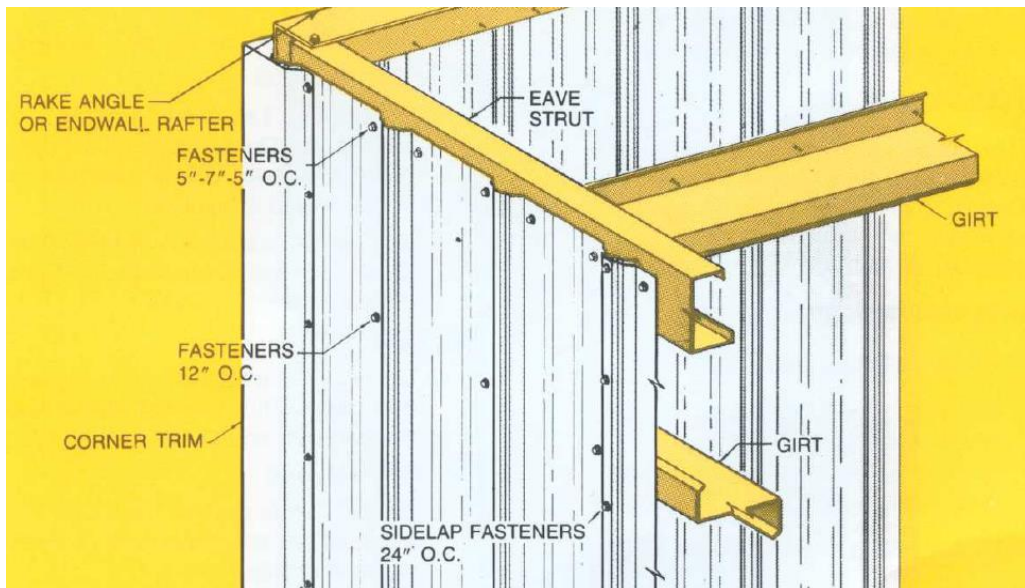


а) размери в инчове на напречното сечение на ламарина Dura-Rib [5]



б) винтове [4], използвани за свързването на ламарината към гредите

Фиг. 4. Ламарина и съединителни средства



Фиг. 5. Минимални изисквания към разстоянията между винтовете съгласно [5]

Таблица 2. Данни за изследваните съединения [8]

Образец		Отстояние на винта c (фиг. 2), mm	Ротационна коравина на съединението $k_{\text{фс}}$, Nmm/rad/mm
№	Означение		
#10	C200D-1	34	1300
#11	C200D-2	26	1000

4. Анализ на причините за разрушение от изкубване, документиран в [8]

В работата на *Gao* [8] не се коментира носещата способност на изкубване на съединенията „греда-ламарина”. От друга страна, в [8] са проведени отделни експерименти за определяне на ротационната коравина $k_{\text{фс}}$ (вж. табл. 2) и носимоспособността на споменатите съединения. Опитната постановка е сходна с дадената в EN 1993-1-3, A5, алтернатива 1, като при нея усукването на гредата причинява относително равномерно натоварване на винтовете по дължината ѝ. От зависимостите „момент-ротация” на съединението, дадени в [8], може да се съди за опънната сила във винт, съответстваща на изкубването. Проведените тук изчисления показват, че тя варира ориентировъчно (за различните комбинации от профил на гредата и отстояние на винта) в диапазона 2,0 – 2,5 kN/винт (или 6,6 – 8,2 kN/m), като този диапазон се вписва ориентировъчно в диапазона, дефиниран от определените съгласно [7] носещи способности на изкубване $q_{p,Rd}$ при статично натоварване, съответно със и без отчитане на коефициента на сигурност $\gamma_{M2} = 1,25$ (вж. и табл. 3).

Американските норми AISI S100 [2] не дават методика за определяне на опънните усилия във винтовете при смучене от вятър, отчитаща усукването на гредата и поредения от него огъващ момент в съединението (по тази причина стойностите на тези усилия не се коментират в работата на *Gao*). Такава приблизителна методика обаче е дадена в т. 10.1.6 на EN 1993-1-3:2006 [7], като е основана на модела, даден в [10], и коригирана в коригендумата към [7] от 2009 г. Най-общо, усилието във винта се определя по формулата (вж. и фиг. 3)

$$q_{Screw,Ed} = q_{Ed} + m_{Ed} / z, \quad (1)$$

където огъващият момент за съединението за единица дължина m_{Ed} се определя по една сравнително трудоемка методика [7, 1], отчитаща геометрията на гредата и ротационната коравина на съединението. Определените съгласно нея очаквани опънни сили във винтовете $q_{Screw,Ed,Test}$ (за единица дължина от гредата) са дадени в табл. 3. Прави впечатление, че поради лостовия ефект, причинен от усукването на гредата, те са над 4 пъти по-големи от експериментално получените в [8] линейно разпределени товари от смучене от вятър $q_{Test,Ed}$, определени с помощта на съответния граничен площен товар от вятър, умножен по приспадащата се товарна ширина на гредата. Носещите способности на изкубване $q_{p,Rd}$ (за единица дължина от гредата) съгласно EN1993-1-3 [7], дадени в табл. 3, са определени при предпоставката, че якостта на опън на ламарината е 450 МПа, като не е прилагана редуция на носещата способност при изкубване в зависимост от разположението на винта в улея. Дадени са стойностите на $q_{p,Rd}$ при коефициенти на сигурност съответно $\gamma_{M2} = 1,25$ и $\gamma_{M2} = 1,00$. В настоящата работа при определянето на $q_{Screw,Ed,Test}$ рамото на вътрешните сили z за съединението е консервативно прието съгласно фиг. 2 (т.е. с приспадане на външния радиус на закръгление на профила).

Таблица 3. Опънни усилия във винтовете и носимоспособности на изкубване

Образец [8]		$q_{Test,Ed}$ [8], kN/m	$q_{Screw,Ed,Test}$ [7], kN/m	$q_{p,Rd}$, kN/m съгласно EN 1993-1-3:2006 [7]	
№	Означение			Статичен товар	Вятър
#10	C200D-1	1,74	7,07	5,70 ($\gamma_{M2}=1,25$)	2,85 ($\gamma_{M2}=1,25$)
#11	C200D-2	1,51	7,30	7,13 ($\gamma_{M2}=1,00$)	3,57 ($\gamma_{M2}=1,00$)

От табл. 3 е видно, че теоретично определеният съгласно [7] линеен товар за винтовете $q_{Screw,Ed,Test}$, отговарящ на експериментално определения в [8] граничен товар върху гредата при изкубване $q_{Test,Ed}$, е много близък до носещата способност на изкубване $q_{p,Rd}$ съгласно [7], отнасяща се за статично натоварване. Това е така, защото в експериментите на Gao [8] натоварването от вятър е приложено еднократно, което не дава възможност да се проявят евентуални ефекти, дължащи се на умората на материала на ламарината. Очаквано, образецът с по-голямо отстояние s на винта (респ. по-голямо рамо на вътрешните сили за съединението) показва по-голям експериментален граничен товар от вятър. В [8] не са измервани усилията във винтовете. По тази причина не може да се твърди, че методиката на EN 1993-1-3 предсказва тези усилия абсолютно точно, но резултатите от табл. 3 ясно показват, че споменатата методика на [7] обяснява настъпилите разрушения на съединения.

Видът на напречното сечение, дебелината на ламарината Dura-Rib[®], както и разположението на винтовете спрямо стените на улея на ламарината, използвано в експериментите, не отговарят напълно на стандартните изисквания за валидност, дадени в EN 1993-1-3, поради което прилагането на методиката на [7] за определяне на ротационната коравина $C_{D,A}$ на съединението „греда-ламарина” е твърде дискуссионно за изследваните образци. Въпреки това е полезно да се направи една съпоставка между ротационната коравина $C_{D,A}$ съгласно EN 1993-1-3 и експериментално определените в [8] ротационни коравини $k_{\phi c}$ от табл. 2.

Съгласно [7] (вж. и примерите в [1])

$$C_{D,A} = 130p = 426 \text{ Nmm/rad/mm}, \quad (2)$$

където $p = 1000/305 = 3,28$ е броят на винтовете за линеен метър по дължина на гредата.

По принцип формула (2) важи за ламарини с номинална дебелина най-малко 0,66 mm, докато разглежданата тук ламарина е с дебелина 0,46 mm. Въпреки това, на база на експерименталните данни за $k_{\phi c}$ от табл. 2 може да се направи извод в качествен аспект, а именно, че методиката на EN 1993-1-3 е възможно да подценява значително наличната ротационна коравина на съединението „греда-ламарина”. По-високата ротационна коравина на ламарината увеличава частта от дестабилизиращия усукващ момент, която се поема като огъващ момент от съединението „греда-ламарина”. За разглежданите тук образци подценяването на ротационната коравина на съединението съгласно формула (2) би довело до подценяване на усилията във винтовете, определени по EN 1993-1-3, с около 10%.

5. Заключение

Направеният тук анализ показва, че разрушенията на експериментално изследваните съединения „греда-ламарина” са породени от:

1) липсата на реалистична оценка на очакваните опънни сили във винтовете, породени от усукването на гредата (американските норми AISI S100 [2] не дават методика за определянето им);

2) недостатъчна носимоспособност на изскубване на съединенията, за което основна роля има липсата на допълнителни шайби под главите на винтовете.

Проектирането на съединението „гредата-ламарина“ е важна част от мерките, осигуряващи общата устойчивост на гредата при смучене от вятър. При определянето на усилията във винтовете при смучене от вятър задължително трябва да се отчита усукването на стоманената греда (стенен водач или покривна столица), ако тя е с отворено напречно сечение. Усукването на гредата води до огъващ момент в съединението „гредата-ламарина“, който за изследваните образци допринася за опънни усилия във винтовете, над 4 пъти по-големи от получените на базата на опростеното изчисляване с „приспадащи се площи“, масово използвано в нашата практика, неотчитащо лостовия ефект. Влиянието на усукването върху лостовия ефект за съединението е възможно да се отчете с приблизителната методика, дадена в т. 10.1.6 на EN 1993-1-3:2006+AC:2009.

Същевременно аналитичната методика на EN 1993-1-3:2006, т. 10.1.5.2, е възможно да подценява значително (от порядъка на 2 – 3 пъти) действителната ротационна коравина на съединението „гредата-ламарина“. Това е в полза на сигурността при проверката на общата устойчивост на гредата, но по методиката на [7] води до известно подценяване на опънните сили във винтовете при смучене от вятър. Необходимо е винтовете на гредите с С-профил да се проектират на базата на приемането на реалистична горна граница на споменатата ротационна коравина, по възможност основана на съществуващи експериментални данни. Важно е при проектирането на съединението да се отчетат възможните вариации в неблагоприятна посока по отношение местоположението на винта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рангелов, Н.* Стоманени конструкции от тънкостенни студеноформувани елементи. КИИП София-град, 2015.

2. AISI S100-16. North American specification for the design of cold-formed steel structural members, 2016.

3. *Dakov, D., B. Belev, C. Penelov.* Deterioration of connections and failure of light-weight facade envelopes due to sequence of seismic and wind actions, 19th IABSE Congress, Stockholm, 2016.

4. Direct fastening technical guide, Hilti, Inc., 2015.

5. Dura-Rib[®] Wall System specification, Star Building Systems.

6. EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.

7. EN 1993-1-3: 2006 + AC:2009. Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting.

8. *Gao, T.* Direct strength method for the flexural design of through-fastened metal building roof and wall systems under wind uplift or suction, PhD Thesis, Blacksburg, VA, 2012.

9. <http://blog.tatasteelconstruction.com>, посетен на 22.01.2020 г.

10. *Peköz, T., Soroushian, P.* Behavior of C- and Z-purlins under wind uplift. Proc., 6th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Rolla, MO; 1982.

PULL-OVER FAILURE OF COLD FORMED CHANNEL BEAMS TO SHEETING CONNECTIONS SUBJECTED TO WIND SUCTION – ANALYSIS OF EXISTING EXPERIMENTAL RESULTS

Ch. Penelov¹

Keywords: wind action, cold formed beams, pull-over resistance

ABSTRACT

The pull-over failures of cold formed beams to sheeting connections are not uncommon in the engineering practice. In 2012 in the US, the results of a large-scale experimental program examining the overall stability of cold-formed beams with open cross-section subjected to wind suction in the presence of profiled sheeting connected to the beam flanges in tension were presented.

In this paper, two of the experimental specimens with lipped channel beams are commented, in which pull-over failures of the beam to sheeting connections are observed. These failures are not predicted by the current US AISI-S100 standard, which do not provide a methodology for determining the tensile forces in the screws due to wind suction.

Here, the tensile forces in the screws of the beam to sheeting connections of the test specimens are analytically determined using the methodology given in EN 1993-1-3 (Eurocode 3) which takes into account the prying action in the connection due to the beam torsion. This prying action results in a drastic increase of the tensile forces in the screws. Eurocode 3 has been found to predict very well the observed failure mode of the connections and the limit load on the cold formed beams. The lack of washers under the screw heads also contributes to the observed pull-over failures.

¹ Chavdar Penelov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: penelov_fce@uacg.bg