

Получена: 18.03.2017 г.

Приета: 29.11.2017 г.

ПРОВЕРКА НА ОБЩА УСТОЙЧИВОСТ НА СТОМАНЕНИ ГРЕДИ С U-ОБРАЗНО НАПРЕЧНО СЕЧЕНИЕ

Ст. Райков¹, Д. Динев²

Ключови думи: стоманени конструкции, обща устойчивост

РЕЗЮМЕ

Елементи с U-образно напречно сечение са широко използвани за греди с различно приложение в сгради със стоманена носеща конструкция. Обикновено гредите с U-образно напречно сечение са натоварени в равнината на стеблото, нецентрично спрямо центъра на огъване. БДС EN 1993-1-1 дава няколко оразмерителни процедури за проверка на обща устойчивост на греди, които не обхващат елементи, натоварени нецентрично. В настоящото изследване са разгледани четири различни варианта за оразмеряване на обща устойчивост на греди с U-образно напречно сечение. За оценка на различните методики е проведено параметрично изследване чрез числови модели. Получени са резултати за теоретичната гранична носимоспособност на примерни греди, които са сравнени с резултатите, получени от числови модели. Използван е нелинеен анализ с отчитане на геометричната нелинейност за елементи с начални несъвършенства (GNIA), определени съгласно изискванията на Еврокод. Направеното параметрично изследване включва промяна на отвора и натоварването на гредите. Въз основа на получените резултати е препоръчана методика за проверка на обща устойчивост на стоманени греди с U-образно напречно сечение.

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

² Добромир Динев, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg

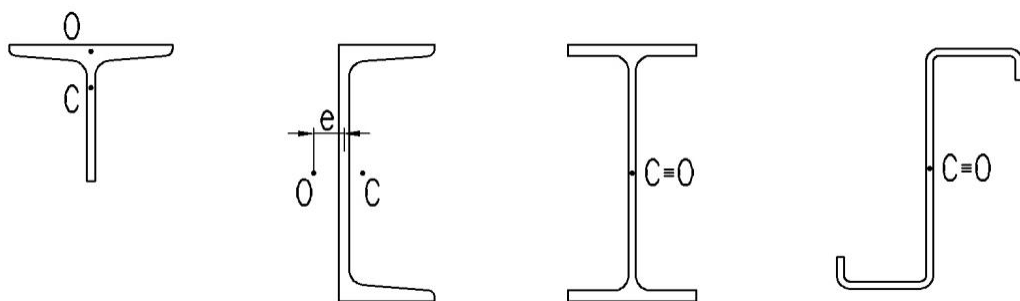
1. Въведение

Основната оразмерителна методика за определяне на носимоспособността на устойчивост (измятане) на стоманени греди, подложени на огъване, в настоящите норми за проектиране [1] изисква определянето на критичния момент в еластичен стадий при измятане, M_{cr} . При това, в [1] не е даден израз за определяне на критичния момент. Такъв израз, т.нар. „формула на трите коефициента“, е даден в едно от по-ранните издания на стандарта [2]:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right]. \quad (1)$$

От там, тя е пренесена в повечето литературни източници на български език, третиращи проблема – [3], [4], [5], [6], [7] и др. Произходът на формулата, както и насоки към допълнителна литература по проблема най-подробно са указани в [6]. Трябва да се обърне внимание, че коректните стойности на коефициентите C_1 , C_2 и C_3 от израз (1) са дадени в [6] и [7], докато в останалите източници са поместени стари данни, при които има известни неточности във вреда на сигурността.

Цитираният израз за определяне на критичния момент е в сила за двойносиметрични, както и за моносиметрични I-сечения, при спазването на определени ограничения. При оразмеряване на елементи с U-образни напречни сечения използването му без подходяща корекция на получените резултати не е коректно. Основна причина за това е фактът, че при използването на U-образни напречни сечения за гредови елементи, те най-често са натоварени в равнината на стеблото, нецентрично спрямо центъра на огъване на сечението (фиг. 1). При това възникват допълнителни усукващи моменти, които не са отчетени при определянето на M_{cr} съгласно (1).



Фиг. 1. Център на тежестта (С) и център на огъване (О) за някои видове напречни сечения

Във връзка с изложеното до тук е направен кратък обзор на някои изследвания по въпроса, предложени са възможни оразмерителни процедури за проверка на измятане на греди с U-образно напречно сечение и е направено параметрично изследване чрез МКЕ при отчитане на предвидените в [1] начални несъвършенства. Направен е сравнителен анализ на получените резултати за греда с постоянно напречно сечение при вариране на големината на отвора и вида и приложната точка на натоварването.

2. Кратък литературен обзор

2.1. БДС EN 1993-1-1 [1]

Носимоспособността на елементите, подложени на огъване, може да бъде намерена по няколко различни метода, дадени в [1]. Самите оразмерителни процедури не са подробно описани в настоящия текст с оглед на компактността на изложението, а и предвид факта, че пакетът Еврокодове е валидна нормативна база за проектирането на строителни конструкции в България вече над седем години и, понастоящем, е достатъчно добре познат на широката аудитория. Изброени са различните варианти за оразмеряване на гредови елементи на измятане и са направени коментари, свързани със спецификата на разглеждания тип напречни сечения.

Елементи с постоянно напречно сечение, подложени на огъване, могат да бъдат проверени:

- Чрез определяне на изчислителната носимоспособност при измятане $M_{b,Rd}$.
- За определяне на $M_{b,Rd}$ е необходимо да бъде определен коефициентът на измятане χ_{LT} , който е функция на условната стройност $\bar{\lambda}_{LT}$ и коефициентът на несъвършенства α_{LT} . В стандарта са дадени препоръчителни стойности за α_{LT} за различни видове напречни сечения. Основното затруднение при използването на тази процедура за елементи с U-образни напречни сечения е свързано с определянето на условната стройност $\bar{\lambda}_{LT}$, която зависи от критичния момент в еластичен стадий при измятане, M_{cr} , вж. §1.
- Чрез определяне на $M_{b,Rd}$ при използване на криви за измятане за валцувани и еквивалентни заварени сечения.
- За използването на този метод, съгл. [5], е необходимо напречното сечение на елемента да бъде симетрично спрямо стеблото, което го прави неприложим за U-образни напречни сечения.
- Чрез опростените методи за греди с укрепвания в сгради.
- Предложените два метода са приложими за всички видове напречни сечения, доколкото не са дадени ограничения в използването им. В същото време, те се отнасят само за елементи с дискретни странични укрепвания на натиснатия пояс в отделни точки, поради което не са универсално приложими.
- Чрез общия метод за изкълчване и измятане на конструктивни елементи.
- Съгласно [1], този метод може да се използва, когато не са подходящи изброените до тук. В същото време, съгласно [13], общият метод е относително нов и като такъв на този етап не е бил подложен на същото ниво и задълбоченост на проверка като останалите методи в стандарта. По тази причина в [13] се препоръчва да се прилага с предпазливост и, по възможност, при проверка чрез друг метод.

Описаните по-горе съображения са в основата на необходимостта от формулиране и утвърждаване на оразмерителна процедура, валидна за проверка на измятане на греди с U-образно напречно сечение.

2.2. Норми за проектиране на стоманени конструкции [12]

Българските норми за проектиране на стоманени конструкции [12] са все още валидни за проектирането на сгради и съоръжения при определени условия. Те са отлично познати поради факта, че са в сила вече над 30 години. По тази причина предложената в [12] оразмерителна процедура също няма да бъде подробно изложена. Трябва да се отбележи, че, за разлика от [1], в [12] са предвидени конкретни оразмерителни правила за греди с U-образно напречно сечение, които включват използването на корекционен коефициент (приет равен на 0,70) при определянето на коефициента ϕ_1 .

2.3. Изследвания на La Poutre и Snijder и колектив

От разгледаните литературни източници най-пълно и задълбочено изследване на въпроса е направено в няколко свързани една с друга публикации на La Poutre и Snijder и колектив – [8], [9], [10], които са систематизирани в предложението за оразмерителна процедура, публикувано в [11]. В рамките на поредицата разработки по темата са проведени както експериментални, така и числови параметрични изследвания на базата на калибрирани изчислителни модели. Предложени са шест метода за оразмеряване на греди с U-образно напречно сечение:

- Метод, основан на известната формула на Merchant-Rankine, с модификация, отчитаща нецентричното натоварване на гредата.
- Метод, основан на оразмерителната процедура в DIN 18800 [14], наречен „модифициран κ_M -метод“.
- Метод, подобен на κ_M -метода, но базиран на оразмерителната процедура в Еврокод 3 [1] – „модифициран χ_{LT} -метод“.
- Метод, използващ теория от втори ред, наречен „ α_v -метод“.
- Опростен метод, базиран на експериментални и числени изследвания, проведени в Германия [15].
- Общият метод за изкълчване и измятане на конструктивни елементи, даден в [1].

Подробно описание на направените изследвания може да се намери в [11]. Основните изводи са следните:

- Модифицираният Merchant-Rankine метод не винаги е на страната на сигурността.
- От предложените методи най-добри резултати дава κ_M -метода.
- Методът, използващ теория от втори ред и опростеният метод са консервативни и изискват итерационно решение.

- Общият метод от Еврокод 3 дава прекалено консервативни резултати.
- Предложеният „модифициран χ_{LT} -метод“ дава добри резултати и е в съответствие с [1].

Въз основа на тези изводи, в настоящото изследване е включен т.нар. „модифициран χ_{LT} -метод“. Той е описан в §3.

2.4. Публикации на български автори

Интересно изследване, направено в последните години, е представено в [16]. Получени са резултати за устойчивостта на едноотворни столици с горещовалцувани и студеноформувани U-образни напречни сечения. При това е приложена методиката, дадена в [17], за проверка на елементи от тънкостенни студеноформувани профили, при отчитане на дисторсионната загуба на устойчивост и укрепващата функция на покривното покритие. Получените резултати са сравнени с такива, получени съгласно общия метод за изкълчване и измятане на конструктивни елементи от [1], както и с параметрични изследвания чрез числови модели. Показано е, че методът, даден в [17], е успешно приложим и за елементи с горещовалцувани U-образни напречни сечения.

3. Оразмерителни процедури

В настоящия раздел са описани избраните оразмерителни методики, за които са решени примери и са получени резултати, които са сравнени с резултатите от числовите модели, описани в §4.

3.1. Модифициран χ_{LT} -метод

Методът е дефиниран в [11] и е пренесен тук без изменения. При него се определя изчислителната носимоспособност при измятане $M_{b,Rd}$ по добре познатата методика на [1], но условната стройност на елемента се определя при отчитане на влиянието на усукването на напречното сечение:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0, \quad (2)$$

където M_{Ed} е изчислителната стойност на момента;

$M_{b,Rd}$ – изчислителната носимоспособност на измятане.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (3)$$

където W_y е съответният съпротивителен момент;

χ_{LT} – е коефициентът на измятане.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0, \quad (4)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right], \quad (5)$$

където α_{LT} е коефициентът за несъвършенства.

$$\bar{\lambda}_{MT} = \bar{\lambda}_M + \bar{\lambda}_T, \quad (6)$$

където $\bar{\lambda}_{MT}$ е условната стройност при отчитане на влиянието на усукването на напречното сечение.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}, \quad (7)$$

където M_{cr} е критичният момент в еластичен стадий при измятане, определен без отчитане на наличието на усукване на сечението.

$$\bar{\lambda}_T = 1,11 - \bar{\lambda}_M \quad \text{при} \quad 0,5 \leq \bar{\lambda}_M \leq 0,75;$$

$$\bar{\lambda}_T = 0,69 - 0,44\bar{\lambda}_M \quad \text{при} \quad 0,75 \leq \bar{\lambda}_M \leq 1,14; \quad (8)$$

$$\bar{\lambda}_T = 0,19 \quad \text{при} \quad \bar{\lambda}_M \geq 1,14.$$

Както се вижда, единствената разлика спрямо методиката в [1] е завишаването на условната стройност.

3.2. Метод на редуционния коефициент k_T

При този метод е пренесен принципът, въведен в [12], за редуция на коефициента на измятане при проверка на греди с U-образно напречно сечение. Използва се изцяло методиката от [1], но изчислителната носимоспособност на измятане се намира съгласно израза:

$$M_{b,Rd} = k_T \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (9)$$

където k_T е редуционен коефициент, отчитащ усукването на напречното сечение.

Тази оразмерителна процедура позволява използването на добре познатата методика за определяне на $M_{b,Rd}$, без допълнително усложняване на изчисленията. Приета е стойност на коефициента $k_T = 0,80$, която е изяснена в §5.

3.3. Опростен метод за греди с укрепявания в сгради

Този метод е приет без изменения съгласно изискванията на [1]. Той може да се използва само за греди с междинно укрепяване на натиснатия пояс и в този смисъл не се явява универсален. Въпреки това е удобен за употреба и е често използван в практиката за бърза или предварителна оценка на устойчивостта на гредови елементи, подложени на огъване. Включен е в настоящото изследване основно с цел оценка на предвидения в него запас на сигурност. В §5 сравнението между резултатите е направено за получената изчислителна носимоспособност на елементите. За целта изразът от [1] е преобразуван във вида:

$$M_{b,Rd} = \frac{\bar{\lambda}_{c,0} M_{c,Rd} i_{f,z} \lambda_1}{k_c L_c}, \quad (10)$$

където $\bar{\lambda}_{c,0}$ е гранична стройност на еквивалентния натиснат пояс на сечението;

$M_{b,Rd}$ – изчислителната носимоспособност на напречното сечение на огъване;

$i_{f,z}$ – инерционният радиус спрямо по-слабата ос на еквивалентен натиснат пояс, съставен от натиснатия пояс и 1/3 от натиснатата част на стеблото;

k_c – корекционен коефициент за стройността, отчитащ разпределението на момента между укрепяванията;

L_c – дължината между укрепяванията;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}. \quad (11)$$

3.4. Метод от нормите за проектиране на стоманени конструкции

Методът е приет съгласно изискванията на [12] без изменения. С цел краткост на изложението той не е подробно описан, тъй като е отлично познат.

4. Числено параметрично изследване

Численото моделиране е направено чрез метода на крайните елементи. Използвана е програмната система с общо предназначение SAP2000 и възможностите, които тя предлага. За потвърждаване на получените резултати е използван идентичен модел в програмата Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

4.1. Материален модел

Според предпоставките на задачата е избран изотропен, хомогенен и еластичен материал, имащ физични характеристики, съответстващи на тези за конструктивна стомана клас S235 както следва:

- Граница на провлачване: $f_y = 235$ МПа.

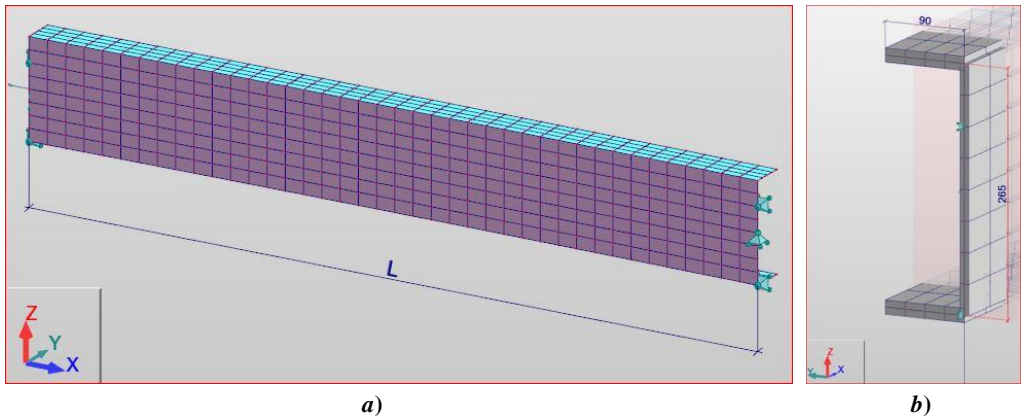
- Модул на еластичност: $E = 210\,000\text{ MPa}$.
- Коефициент на Poisson: $\nu = 0,3$.
- Модул на срязване: $G = 81\,000\text{ MPa}$.

4.2. Избор на крайни елементи

Поради това, че дебелините на поясите и стеблото на избрания профил са малки, в сравнение с другите два размера, е прието моделирането им да бъде извършено чрез конвенционалните черупкови крайни елементи, заложи в програмните системи. Дискретизацията на модела е както следва:

Стеблото е с усреднена дебелина 10 mm и е разделено на осем крайни елемента по височина. Поясите са с усреднена дебелина 15 mm и са разделени на четири крайни елемента по широчина.

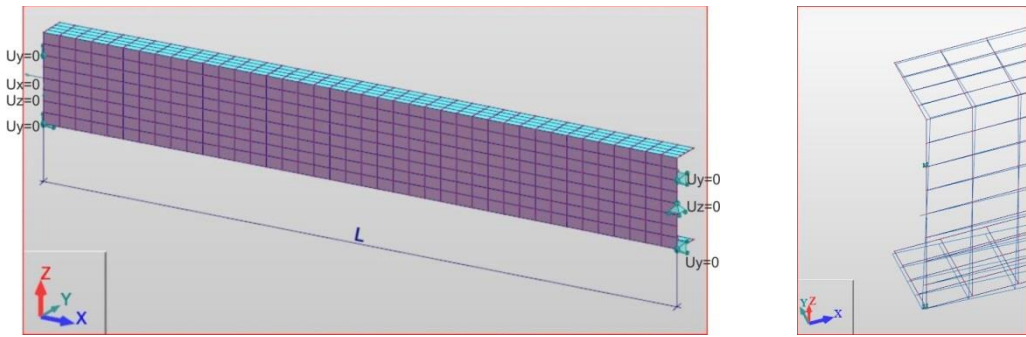
По дължина гредата е разделена на елементи с дължина 50 mm с цел запазване на добро съотношение между страните на крайните елементи (съответно 2/5 и 3/5).



Фиг. 2.
a) Общ изглед на изчислителния модел;
b) Размери и дискретизация на напречното сечение

4.3. Опорни условия

Опорните условия са съобразени с предпоставката, че се разглежда елемент със статическа схема „проста греда“. Приети са условия, които съответстват на едно от често използваните решения за конструктивно оформяне на съединението – болтове в стеблото на гредата. Заложени са опори в краищата на гредата, в надлъжната ос на стеблото. Поради това, че се разглежда задача с предварително зададени несъвършенства и пространствена работа на конструкцията, е заложено модифициране на трансляционните опорни условия в направление, напречно на натоварването и на оста на гредата (по ос Y). Прието е подпирането по ос Y, което се съпротивлява на усукването на сечението, да бъде в краищата на гредата – на нивото на долния ръб на профила и на мястото, където условно е приет горният ред болтове.

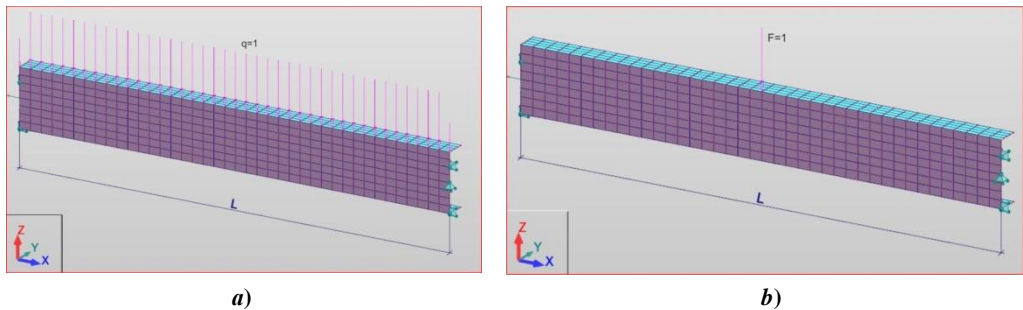


Фиг. 3. Опорни условия на изчислителния модел

Така избраните опорни условия позволяват известна свободна деформация на напречното сечение в местата на подпиране. Този начин на подпиране се доближава достатъчно добре реалните опорни условия при болтово съединение в стеблото на гредата.

4.4. Натоварване

Според методиката на изследването, натоварването е в два варианта - равномерно разпределен линеен товар по дължина на гредата и концентрирана сила в средата на отвората. Тези два типа натоварване са разглеждани в три варианта: по горен ръб, в средата и по долен ръб на стеблото. Интензивността на натоварването е приета да е равна на единица.

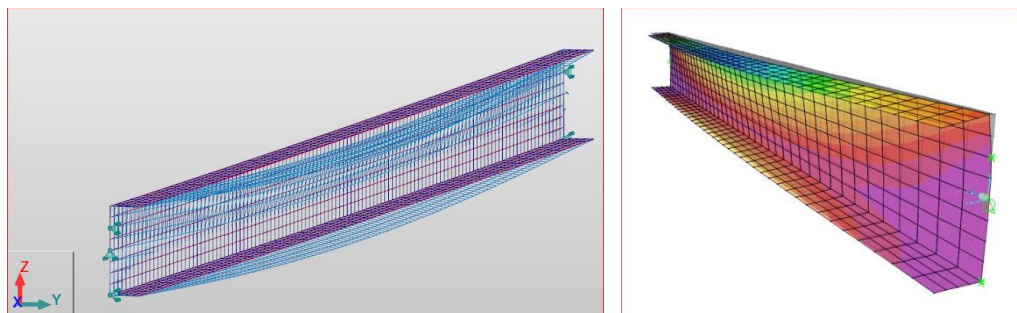


Фиг. 4.

- a) Равномерно разпределено натоварване по дължина на елемента;
 b) Концентрирано натоварване в средата на гредата

4.5. Анализ и решение

За разглежданата черупкова конструкция е извършен геометрически нелинеен анализ с начални несъвършенства. Големината на въведеното в модела местно дъгово несъвършенство е определена съгласно изискванията на [1] и е равна на $ke_{0,d}$, където $e_{0,d}$ е еквивалентното начално дъгово несъвършенство спрямо по-слабата ос на разглеждания профил, което за крива на изкълчване „d” и еластичен анализ е равно на $L/150$. Коефициентът k е със стойност 0,50, съгласно [18].



Фиг. 5. Деформирана схема от първа форма на загуба на устойчивост- варианти 1 и 2

Изследването е извършено в два варианта – линейна загуба на устойчивост и нелинейна загуба на устойчивост с отчитане на P-Delta ефект. Резултати от тези анализи са критичните стойности на натоварването и формата на загуба на устойчивост.

Носимоспособността на измятане на елемента от проведеното параметрично изследване е получена като функция на критичния товар, определен при еластична работа на материала при отчитане на началните несъвършенства. Като следствие на решението в еластична постановка резултатите за по-нестройните елементи са ограничени до носимоспособността на напречното сечение на гредата, т.е. при тях меродавна е проверката на якост.

5. Резултати и сравнителен анализ

За онагледяване на различните методики и сравнителен анализ на резултатите е получена номиналната носимоспособност на примерна стоманена греда. Избрани са следните параметри на решението:

- Статическа схема – проста греда.
- Напречно сечение на гредата – UPN280.
- Стомана клас S235.
- Натоварване:
 - Равномерно разпределено.
 - Концентрирано в средата на отвора.
- Приложна точка на натоварването в стеблото на гредата:
 - По горен пояс.
 - В средата на стеблото.
 - По долен пояс.
- Отвор на гредата – 2,00 m; 4,00 m; 6,00 m; 8,00 m; 10,00 m.

С оглед на избягване на влиянието на различните стойности на коефициентите на сигурност в [1] и [12], при решението е използвана номиналната стойност на границата на провлачване на стоманата. По същата причина не е отчетен и коефициентът за условия на работа от [12]. За вариантите, при които полученият резултат е по-висок от номиналната носимоспособност на сечението, е приета носимоспособност, равна на тази на сечението на якост.

Получените резултати за равномерно разпределено натоварване са представени в табл. 1, а тези за натоварване, концентрирано в средата на отвора – в табл. 2.

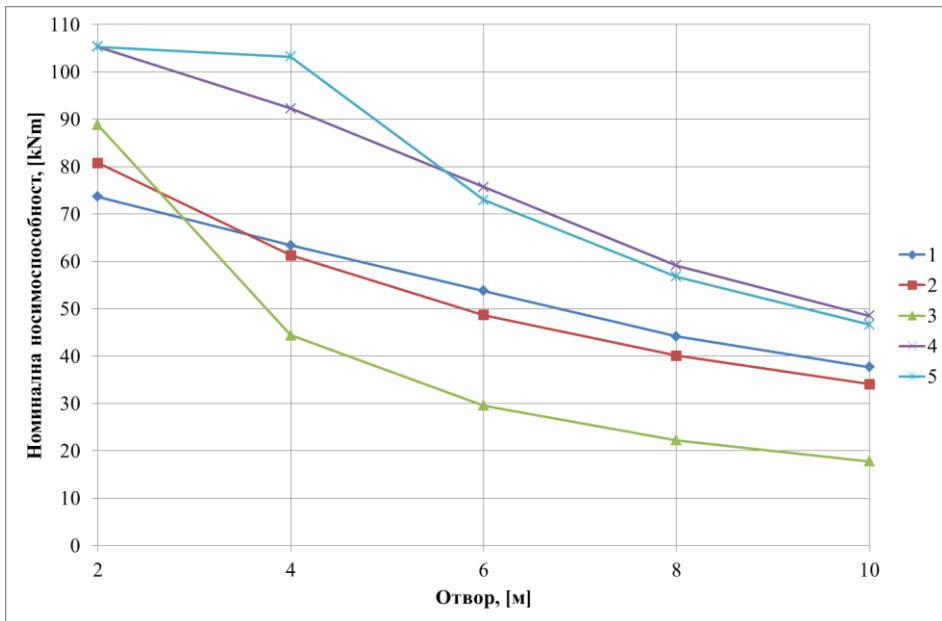
Таблица 1. Вариант равномерно разпределено натоварване

Напречно сечение	Приложна точка на натоварването	Отвор, [м]	Номинална носимоспособност на измятане в [kNm], за оразмерителен метод				
			1	2	3	4	5
			$\chi_{LT}(\bar{\sigma}_{MT})$	$k_T \chi_{LT}$	$\bar{\lambda}_T$	φ_b	MKE
UPN280	Горен пояс	2	73.6	80.8	88.8	105.3	105.3
		4	63.4	61.3	44.4	92.3	103.2
		6	53.8	48.6	29.6	75.7	72.9
		8	44.2	40.1	22.2	59.1	56.8
		10	37.6	34.1	17.8	48.5	46.6
	В средата	2	73.6	86.6	88.8	-	105.3
		4	68.5	68.8	44.4	-	105.3
		6	59.0	54.5	29.6	-	89.3
		8	48.9	44.4	22.2	-	66.2
		10	41.1	37.2	17.8	-	52.8
	Долен пояс	2	78.5	90.8	88.8	105.3	105.3
		4	73.3	75.1	44.4	105.3	105.3
		6	62.8	60.3	29.6	88.3	105.3
		8	54.0	48.8	22.2	70.9	77.1
		10	44.8	40.6	17.8	56.1	59.6

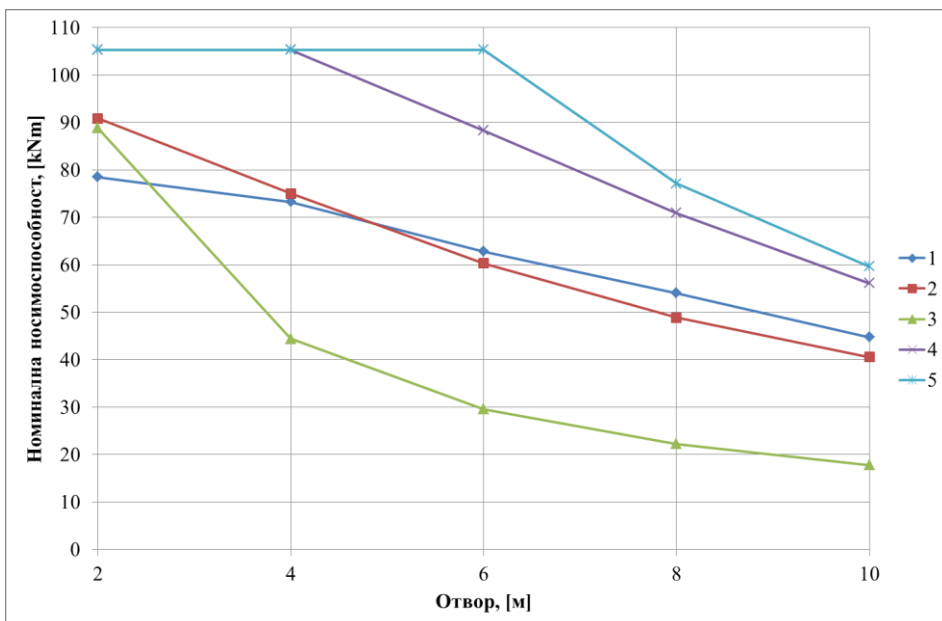
Таблица 2. Вариант концентрирано натоварване в средата на отвора

Напречно сечение	Приложна точка на натоварването	Отвор, [м]	Номинална носимоспособност на измятане в [kNm], за оразмерителен метод				
			1	2	3	4	5
			$\chi_{LT}(\bar{\sigma}_{MT})$	$k_T \chi_{LT}$	$\bar{\lambda}_T$	φ_b	MKE
UPN280	Горен пояс	2	73.6	82.0	88.8	105.3	105.3
		4	65.8	64.7	44.4	96.1	105.3
		6	58.0	52.9	29.6	87.0	84.2
		8	49.2	44.6	22.2	70.9	65.9
		10	42.4	38.4	17.8	57.1	54.3
	В средата	2	74.3	88.8	88.8	-	105.3
		4	72.1	73.5	44.4	-	105.3
		6	62.9	60.5	29.6	-	105.3
		8	55.9	50.4	22.2	-	79.5
		10	47.3	42.9	17.8	-	63.4
	Долен пояс	2	84.0	93.4	88.8	105.3	105.3
		4	73.6	80.4	44.4	105.3	105.3
		6	67.7	67.5	29.6	93.6	105.3
		8	60.2	56.3	22.2	86.6	96.1
		10	52.6	47.6	17.8	68.4	73.8

За по-добро онагледяване на основните резултати и сравнение на разглежданите методи на фиг. 6 – 9 са представени графики на зависимостта отвор-носимоспособност за най-характерните случаи – натоварване по горен и, съответно, долен пояс на гредата.

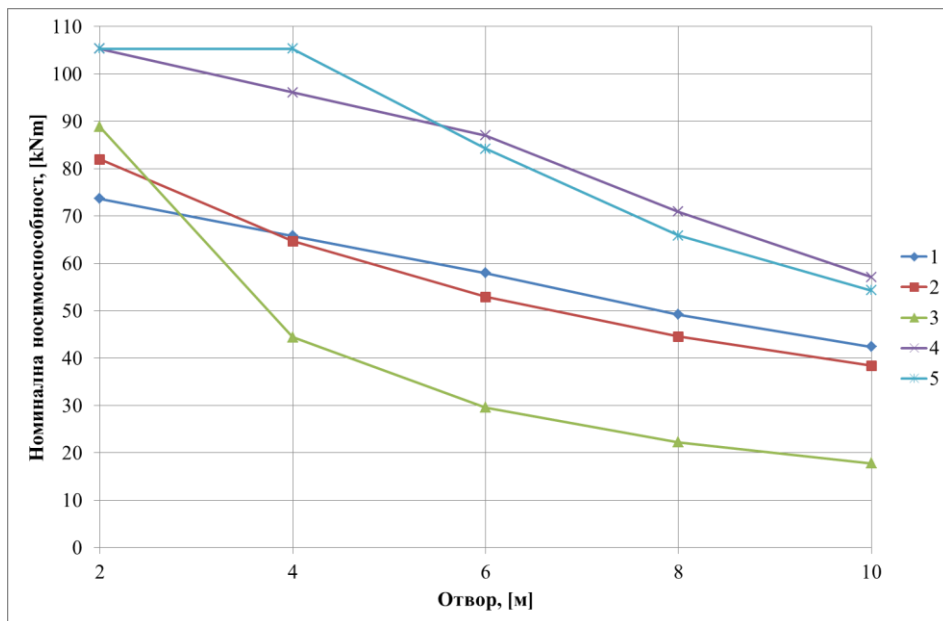


Фиг. 6. Резултати при равномерно разпределен товар по горен пояс на гредата

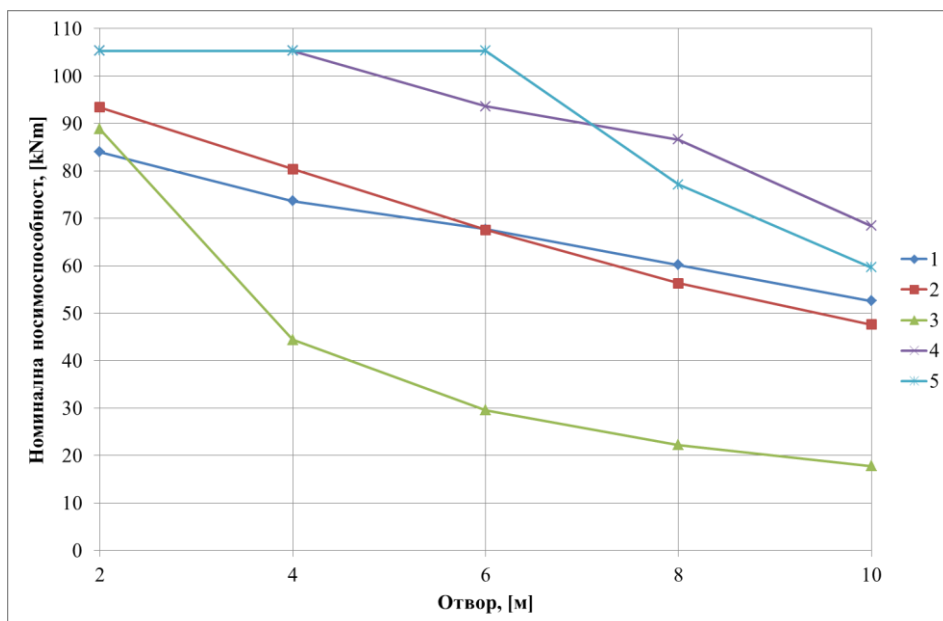


Фиг. 7. Резултати при равномерно разпределен товар по долен пояс на гредата

Номерацията на различните методи, дадена на фигурите, съвпада с тази в таблиците.



Фиг. 8. Резултати при концентрирано натоварване в средата на отвора, приложено по горен пояс на гредата



Фиг. 9. Резултати при концентрирано натоварване в средата на отвора, приложено по долен пояс на гредата

На базата на получените резултати могат да се направят следните изводи:

- Опростеният метод за греди с укрепвания в сгради дава резултати, които са винаги в полза на сигурността и може да се използва във всички случаи. В същото време, този метод е очевидно твърде консервативен – разликата с числовото решение е от порядъка на 60 – 70%, и използването му води до получаването на неикономични решения;
- Модифицираният χ_{LT} метод дава резултати, които са в полза на сигурността спрямо решението чрез МКЕ при отчитане на местното дъгово несъвършенство съгласно [1]. В същото време, разликата е в рамките на 20 – 30%. В този смисъл, методът е едновременно достатъчно консервативен и икономически целесъобразен;
- Методът на редукирания коефициент k_T може да бъде лесно калиброван чрез приемане на подходяща стойност на k_T . В случая е избрана стойност 0,80, при която се получават резултати за носимоспособността, близки до тези от модифицирания χ_{LT} метод, който е подложен на значително по-обширна проверка чрез числови и експериментални модели – [8], [9], [10], [11]. При тази стойност на коефициента съпадението между двата метода е много добро, като разликите са в рамките на 5 – 10%;
- Най-добро съпадение с резултатите от числовото изследване дава оразмерителната процедура от [12]. В същото време, при по-големите отвори и особено при натоварване по горния пояс на гредата (което е и по-често срещаното в практиката), резултатите са във вреда на сигурността.

6. Заключение

Разгледани са четири възможни оразмерителни процедури за проверка на обща устойчивост на греди с U-образно напречно сечение. Три от тях са съобразени с изискванията на Еврокод, а четвъртата се използва в България вече над 30 години. Направено е сравнение с резултатите, получени от числово параметрично изследване по МКЕ чрез нелинеен анализ с отчитане на геометричната нелинейност за елементи с начални несъвършенства (GNIA), при който местното дъгово несъвършенство на гредата е определено съгласно изискванията на [1]. От направения сравнителен анализ може да се заключи, че използването на предложения в [11] оразмерителен подход, при който се коригира условната стройност на елемента за отчитане на влиянието на усукването на напречното сечение, както и предложения в настоящата публикация метод на редукирания коефициент, дават добри резултати за носимоспособността на стоманени греди с U-образно напречно сечение, които са в полза на сигурността, без да бъдат твърде неикономични.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1993-1-1: 2005. Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. CEN, 2005.
2. ENV 1993-1-1: Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings, Annex F, CEN, 1992.
3. *Драганов, Н.* Оразмеряване на елементите на стоманените конструкции съгласно Еврокод 3. София, 2006.
4. *Венков, Л., Белев, Б. и Пенелов, Ч.* Ръководство за проектиране на стоманени конструкции на сгради по Еврокод 3. КИИП, София, 2009.
5. *Цачев, Ст.* Стоманени строителни конструкции с нормативната база на Еврокод 3. КИИП, София, 2013.
6. *Рангелов, Н.* Стоманени конструкции от тънкостенни студеноформувани елементи. КИИП, София, 2015.
7. *Драганов, Н.* Проектиране на стоманени конструкции на сгради – коментари, примери, препоръки. София, 2016.
8. *La Poutre, D.* Lateral torsional buckling of channel shaped sections. T9 report: Experimental research, Eindhoven, 1999.
9. *La Poutre, D.* Strength and stability of channel sections used as a beam. MSc thesis, Eindhoven University of Technology, 1999.
10. *Snijder, H. et al.* FEM simulations of lateral torsional buckling experiments on channel sections loaded in bending. Eurosteel, pp. 201-210, Coimbra 2002.
11. *Snijder et al.* Design rules for lateral torsional buckling of channel sections subject to web loading. Stahlbau 77, 2008.
12. *Норми за проектиране на стоманени конструкции.* БСА, 1987.
13. *Gardner, L. and Nethercot, D.* Designers' Guide to EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of Steel Structures. General Rules and Rules for Buildings. London, 2005.
14. DIN 18800-1 (2008). Steel Structures – Part 1: Design and construction. Deutsches Institut für Normung e. V.
15. *Lindner, J., Glitsch, T.* (2004). Vereinfachter Nachweis für I- und U-Träger beansprucht durch doppelte Biegung und Torsion. Stahlbau 73, pp. 704-715.
16. *Рангелов, Н. и Василев, М.* (2014). Устойчивост на столици при смучене от вятър. Годишник на УАСГ, Том XLVI (2014), Свитък XI, стр. 141-152. София, 2015.
17. БДС EN 1993-1-1: 2007. Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-3: Общи правила. Допълнителни правила за студеноформувани линейни и равнинни елементи. CEN, 2006.
18. БДС EN 1993-1-1/NA:2011. Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. Национално приложение (NA). БИС, 2011.

LATERAL TORSIONAL BUCKLING RESISTANCE OF STEEL BEAMS WITH CHANNEL SECTIONS

St. Raykov¹, D. Dinev²

Keywords: steel structures, lateral torsional buckling

ABSTRACT

Channel sections are widely used as beams for various purposes in steel building design. Such elements are commonly loaded in the plane of the web, eccentrically to the shear center of the section. The common design rules for lateral torsional buckling given in EN 1993-1-1 does not include elements subject to torsion due to eccentricity of the load.

This paper describes and discusses four different methods for LTB verification of beams with channel sections. Evaluation of their applicability is made through parametric numerical analysis. Results are obtained for the bending resistance of exemplary beams through second order analysis taking into account the initial bow imperfections (GNIA), as prescribed by the relevant parts of the Eurocode. The parametric study includes different spans and loading of the beams. Based on the results, a conclusion is made for the applicability of the proposed design methods.

¹ Stanislav Raykov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: raykov_fce@uacg.bg

² Dobromir Dinev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Structural Mechanics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg