



СРАВНЕНИЕ НА ДВАТА ВИДА КРИВИ НА ИЗМЯТАНЕ ЗА СТОМАНЕНИ ЕЛЕМЕНТИ С ПОСТОЯННО НАПРЕЧНО СЕЧЕНИЕ, ПОДЛОЖЕНИ НА ОГЪВАНЕ

Тодор Георгиев

georgiev.todor.d@gmail.com

*Висше строително училище „Любен Каравелов”
София 1373, ул. „Суходолска” № 175
БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: измятане, криви, сравнение,

Резюме: В доклада е направено сравнение между двата вида криви на измятане, които са разрешени от Еврокод 3 – общ случай и „алтернативен” случай.

Най-напред са построени техните графики, тъй като те не са дадени в ЕС3.

Сравнението е направено според типа на напречното сечение, а не според наименованието на кривите. Това е необходимо, защото в общия случай кривите са 4, а в „алтернативния” те са 3 броя. Построени са и графиките на разликите в проценти между стойностите на коефициентите на измятане.

Установено е, че за най-често срещаните типове напречни сечения, ползването на кривите по „алтернативния” случай е по-икономично и достатъчно сигурно.

Накрая авторът е направил разсъждения относно това, кой от двата вида криви е основен. Приведени са доказателства от самия ЕС3, че именно „алтернативния” случай е основен.

1. Въведение

Новост в Еврокод 3 е възможността една проверка да се извършва по няколко начина. Проверката за носимоспособност на устойчивост (измятане) на огънати елементи с постоянно напречно сечение се извършва по формулата [1]:

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

където : M_{Ed} е изчислителната стойност на огъващия момент; $M_{b,Rd}$ е изчислителната носимоспособност при измятане и се определя по три начина, един от които е :

$$(2) \quad M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

където : χ_{LT} е коефициент на измятане; W_y е съпротивителен момент на сечението и в зависимост от класа му е: за сечения от клас 1 и 2 – пластичен, за клас 3 – еластичен и за клас 4 – изчислителен (ефективен).

За определянето на коефициента на измятане χ_{LT} могат да се ползват два вида криви: криви на измятане - **общ случай**, или криви на измятане **за валцувани сечения, или еквивалентни заварени сечения**.

Тъй като в практиката са се наложили термините „**общ случай**” за определяне на χ_{LT} и „**алтернативен случай**” [2] (случай за валцувани сечения, или еквивалентни заварени сечения), по нататък ще се ползват тези термини.

Трябва да се направи уточнението, че за „валцувани сечения, или еквивалентни заварени сечения” от табл. 6.5 на ЕС 3-1-1 се вижда, че става дума само за **I** – сечения. Тези сечения са най-често прилаганите в практиката сечения на греди.

И при двата случая, при определянето на коефициента на измятане χ_{LT} е необходимо предварително да се изчисли условната стройност на конструктивния елемент:

$$(3) \quad \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

където : M_{cr} е критичният момент при измятане в еластичен стадий .

Разликата между двата случая се състои в начина по който се изчислява коефициента на измятане. При **общия** случай той се изчислява по формулата:

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

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

Тук α_{LT} е коефициент за несъвършенства и може да се отчете се от таблица 6.3 на [1], дадена по-долу като табл.1.

Таблица 1
Препоръчителни стойности на коефициенти за несъвършенства за кривите на измятане

крива на изкълчване (измятане)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
коефициент за несъвършенство α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Трябва да се отбележи, че кривите на измятане при общия случай съвпадат с кривите на изкълчване, с тази разлика, че при изкълчването имаме условна стройност при изкълчване $\bar{\lambda}$, а при измятането - $\bar{\lambda}_{LT}$. Коефициентите за несъвършенство α и α_{LT} са еднакви, ако се отнасят за една и съща крива.

При **алтернативния** случай, коефициентът на измятане се изчислява по друга формула:

$$(5) \quad \chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta (\bar{\lambda}_{LT})^2}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}$$

където :

$$(6) \quad \Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta (\bar{\lambda}_{LT})^2 \right]$$

За България са приети следните стойности на двете величини : $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$ и $\beta = 0,75$.

При **алтернативния** случай не са дадени изрични указания за стойностите на коефициента за несъвършенство, както е при общия случай. Би трябвало да се приложи

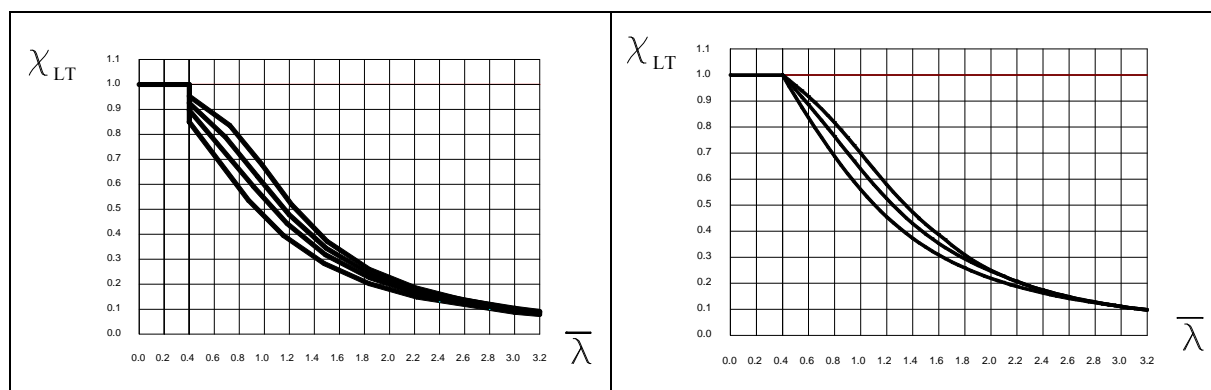
общия принцип, приет при относителните начални местни дъгови несъвършенства, съгл. 5.3.2 на ЕС 3-1-1, който е приет при изкълчването и при измятането – общ случай. Не са дадени изрични указания и за начина на изчисляване на относителната стройност $\bar{\lambda}_{LT}$, като по мнение на автора би трябвало да се приеме, че ще се ползват обясненията към форм. 6.56 на ЕС 3-1-1, която в настоящата статия е дадена като форм. (2).

Съществува и разлика при приемането на кривите на измятане по двата начина, която е илюстрирана в таблица 2. Тя обединява табл. 6.4 и 6.5 от [1].

Таблица 2 Препоръчителни криви на измятане

напречно сечение	ограничения	крива на измятане – общ случай	крива на измятане – валцувани, или еквивалентни сечения
валцувани I - сечения	$h/b \leq 2$	<i>a</i>	<i>b</i>
	$h/b > 2$	<i>b</i>	<i>c</i>
заварени I - сечения	$h/b \leq 2$	<i>c</i>	<i>c</i>
	$h/b > 2$	<i>d</i>	<i>d</i>
други видове напречни сечения	-	<i>d</i>	-

Както се вижда, при валцуваните I - сечения, кривите на измятане при алтернативния случай не съвпадат като наименования с тези при общия случай. При равни други условия те отиват с една крива надолу, т.е. крива *a* става крива *b*, а крива *b* става крива *c*. При заварените сечения, кривите при двата случая съвпадат. Така кривите на измятане при алтернативния случай са 3 (*b, c* и *d*), докато при общия те са 4 (*a, b, c* и *d*). На фиг.1 са дадени двата вида криви.



Фиг.1. Криви на измятане: в ляво - общ случай (отгоре-надолу: криви a,b,c и d); в дясно - „алтернативен случай“ : (отгоре-надолу: криви b, c и d)

Кривите на измятане при алтернативния случай имат една особеност - те се състоят от два участъка. Тъй като условието (5) изисква стойността на χ_{LT} да бъде едновременно

по-малка и от 1 и от $\frac{1}{(\lambda_{LT})^2}$ се получава следното : при малките условни стройности

кривите на измятане наподобяват кривите на изкълчване, а при по-големите условни стройности кривите представляват хиперболи. Преходът става както следва : при крива на измятане „b” – при условна стройност 1,12; при крива на измятане „c” - при условна стройност 1,18, а при крива на измятане „d” - при условна стройност 1,27. Кривите „b” и „c” се сливат при условни стройности над 2,1 вкл.. При условни стройности над 2,95

вкл., трите криви се сливат. При изчертаването на кривите за алтернативния случай авторът е ползвал и непубликуваните таблици, изготвени от инж. Димитър Драганов.

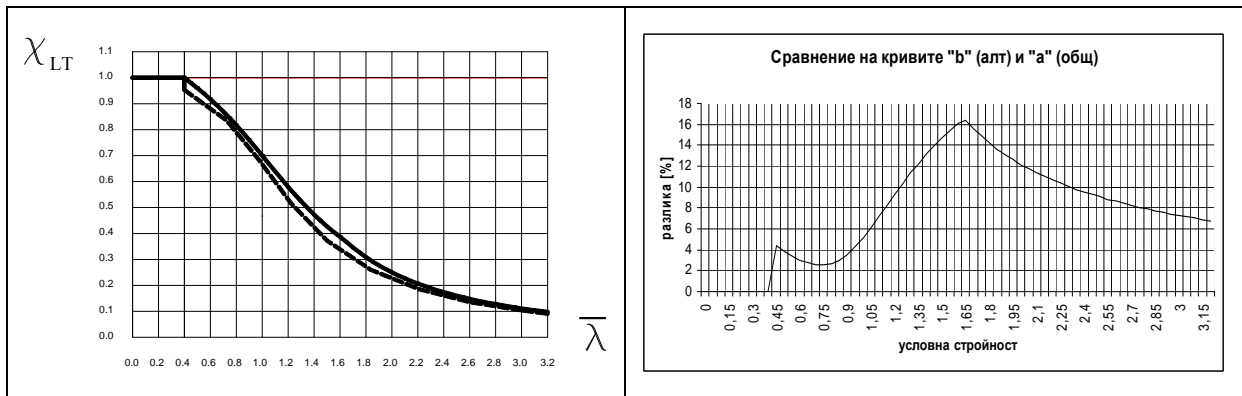
2. Графично сравнение според вида на напречното сечение

Най-удобно е да се направи графично сравнение на кривите на измятане за всеки вид сечения. Съгласно табл. 2 трябва да се направят 4 сравнения.

На фиг. 2 е направено сравнение на кривите „а” за „основния случай” и „b” за „алтернативния”. Те се отнасят за горещовалцовани I – профили при които $h/b \leq 2$, поради което за краткост по-нататък тези сечения ще бъдат наричани „ниски”, за разлика от тези с отношение $h/b > 2$, които ще бъдат наричани „високи”. Разликите в проценти са изчислявани по следния начин:

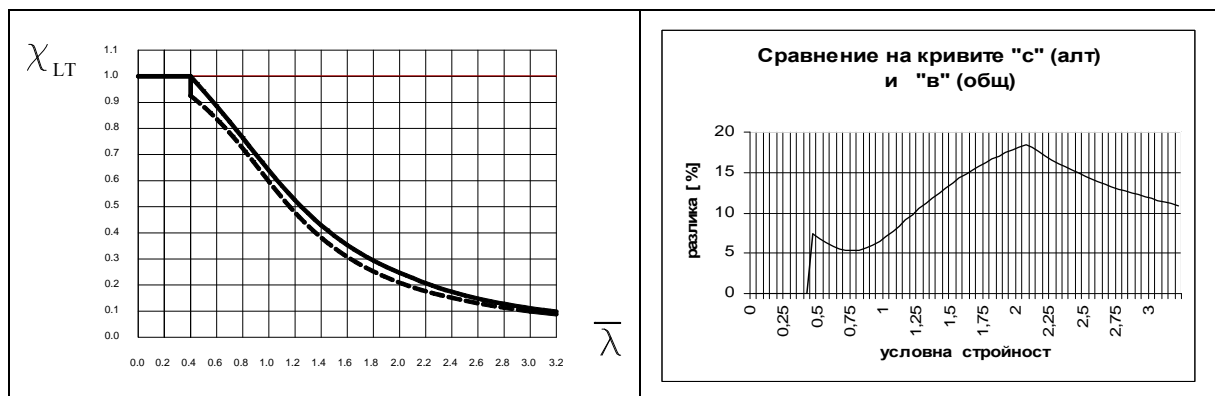
$$(7) \quad \Delta = \frac{\chi_{LT}^{alt} - \chi_{LT}^{общ}}{\chi_{LT}^{общ}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Прието е процентната разлика да се изчислява спрямо стойността на коефициента на измятане при общия случай. Ако базата за сравнение е стойността при алтернативния случай, процентната разлика ще се получи по-малка.



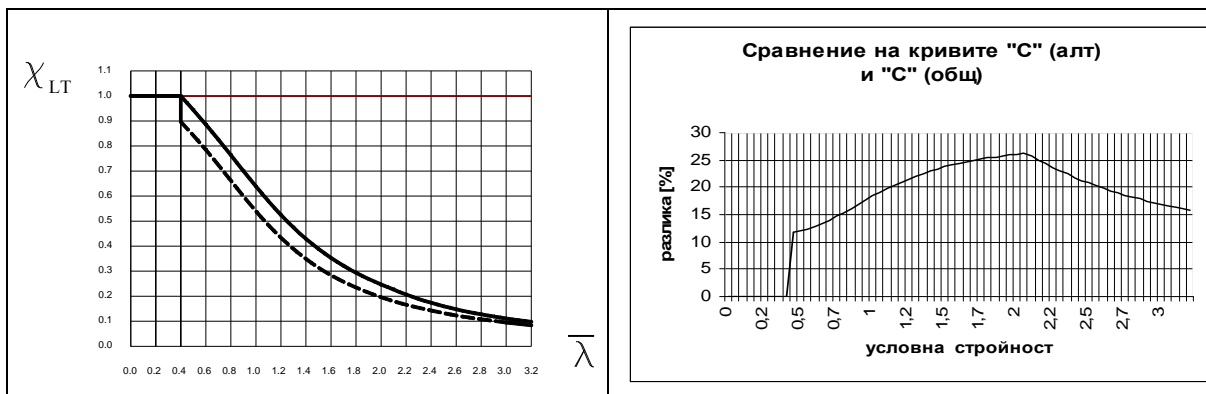
Фиг.2. Сравнение на кривите за „ниски” валцовани профили: в ляво – графично сравнение: с прекъснатата линия – общ случай, с непрекъснатата – алтернативен; в дясно – разлики в проценти.

На фиг. 3 е направено сравнение на кривите „b” за „основния случай” и „с” за „алтернативния”. Те се отнасят за „високи” горещовалцовани I – профили.



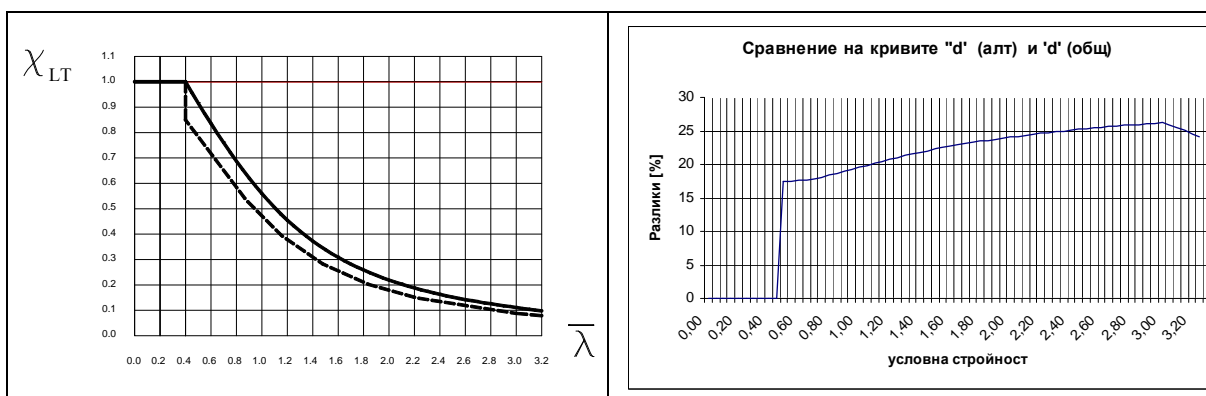
Фиг.3. Сравнение на кривите за „високи” валцовани профили: в ляво – графично сравнение: с прекъснатата линия – общ случай, с непрекъснатата – алтернативен; в дясно – разлики в проценти.

На фиг. 4 е направено сравнение на кривите „с” за „основния случай” и „с” за „алтернативния”. Те се отнасят за „ниски” заварени I – профили.



Фиг.4. Сравнение на кривите за „ниски“ заварени „I“- сечения: в ляво – графично сравнение: с прекъснатата линия – общ случай, с непрекъснатата – алтернативен; в дясно – разлики в проценти.

На фиг. 5 е направено сравнение на кривите „d“ за „основния случай“ и „d“ за „алтернативния“. Те се отнасят за „високи“ заварени I – профили.



Фиг.5. Сравнение на кривите за „високи“ заварени „I“- сечения: в ляво – графично сравнение: с прекъснатата линия – общ случай, с непрекъснатата – алтернативен; в дясно – разлики в проценти.

Сравнението нагледно потвърждава изказаното в [2] и [3] мнение, че по принцип по алтернативния случай се получават по-големи стойности на коефициента на измятане. Това твърдение е вярно за всички видове I – сечения – и ниски и високи, независимо дали са валцувани, или заварени. Процентната разлика е най-малка (т.е. – резултатите са най-близки) при „ниските“ валцувани профили – от 2,5% до 16,5 %. При „високите“ валцувани профили тя се движи между 5,5% и 18%. При заварените „ниски“ греди разликата става доста по-голяма и е между 12% и 26%, а при „високите“ греди е от 17,5% до 26,5 %, като почти в целия диапазон на условните стройности е по-голяма от 20 %.

3. Заключение

Тъй като и двата вида криви са разрешени, би трябвало да се приеме, че съставителите на Еврокод 3 дават гаранция за сигурността им. Очевидно е, че алтернативния случай е по-икономичен и затова може да се каже, че би трябвало той да се предпочита от проектантите. Подобна препоръка е направена и в новата редакция на националното приложение на Германия.

В българското НП към ЕС 3-1-1 (БДС EN 1993-1-1:2005/NA:2011) има дадени условия, на които трябва да отговарят заварените сечения, за да може да се прилага алтернативния случай. В тях е включено и допълнителното условие, че той може да се прилага и при леко несиметрични сечения спрямо ос у-у.

По мнение на автора, параграфи (1) и (4) от 6.3.2.2 във връзка с 6.3.2.3 на БДС EN 1993-1-1 показват, че всъщност основен метод е именно алтернативния. Това е валидно, както за $\bar{\lambda}_{LT,0}$, така и за отношението на моментите.

Наличието на общ случай е доста сполучлив (особено за валцуваните сечения) опит да се ползват добре проверените чрез експерименти и теория, стойности на коефициента на изкълчване. Не е известно обаче, как е направена и проверена връзката между изкълчването и измятането. Функциите за редукиционния коефициент χ за центричен натиск са получени за равнина форма на изкълчване, а измятането на гредите става винаги по пространствена форма, защото е сбор от провисване по равнинна крива (при равномерно разпределен товар върху проста греда – крива от 4-та степен) и пространствена крива при стеснено усукване, какъвто е обичайния случай.

Ще припомним, че за изкълчването по пространствена форма, чрез критичните сили за усуквателна и за огъвно-усуквателна форма от теорията на Власов, на практика се прави привеждане на пространствената форма към равнинната форма на изкълчване и това става чрез специалните условни стройности.

От друга страна, за алтернативния случай не е ясно от къде и как са получени формулите за изчисляване на коефициента на измятане. Не е известно и как са проверени те. В литературата няма данни за провеждани мащабни експериментални програми. Има отделни числени експерименти, но те не могат да отчетат достатъчно точно всички начални несъвършенства, въпреки, че в ЕС 3 -1-1 има известни указания в това отношение. Не могат да се отчетат достатъчно точно и реалните опорни условия.

Накрая си позволяваме да информираме читателите, че отпадналото приложение F от предварителната редакция на ЕС3 има грешки в ущърб на сигурността и не бива да се използва при изчисляването на M_{cr} . За повече подробности може да се прочете в [4].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сборник от стандарти. Сборник 3 „Проектиране на сгради със стоманени конструкции”, БИС, С., 2010.
- [2] Драганов Н., Оразмеряване на елементите на стоманените конструкции съгласно Еврокод 3., С., Строителни конструкции, 2006.
- [3] Драганов Н., Оразмеряване на елементите на стоманените конструкции съгласно Еврокод 3., С. УАСГ, 2011.
- [4] Рангелов Н., Стоманени конструкции от тънкостенни студеноформувани елементи., С., КИИП – РК София – град.

COMPARISON BETWEEN TWO TYPES LATERAL TORSIONAL BUCKLING CURVES FOR UNIFORM STEEL MEMBERS IN BENDING

Todor Georgiev
georgiev.todor.d@gmail.com

VSU “Lyuben Karavelov”, Sofia
Sofia 1373, Suhodolska street 175 ,department “Construction structures”
BULGARIA

Key words: *beams, steel, bending, buckling, curves.*

Abstract: *In this paper, a comparison is made between the two types of lateral torsional buckling curves, which are permitted by EC3. They are called a “general” case and “lateral torsional buckling curves for rolled sections or equivalent welded sections”.*

At first are drawn the drawings of these two type curves, because they are not given in EC3.

The comparison is made according to the type of the cross-section, not according to the names of the curves. This is necessary, because in the “general” case the curves are 4, but in the other case they are only 3. The drawings of the differences in percentages between the two cases are also given.

It is determined, for the most used types of cross-sections, that using the second case is economic and safe enough.

Finally, the author has made some reasoning about which of the two types of curves is basic. Evidences from EC3 are shown, that the second case is the basic case.