



*Получена: 18.03.2018 г.*

*Приета: 15.10.2018 г.*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТОМАНЕНИ ШПИЛКИ, СЛЕПЕНИ С КОНСТРУКТИВНА ДЪРВЕСИНА, ПРИ КОМБИНИРАНО ДЕЙСТВИЕ НА ОСОВИ И НАПРЕЧНИ СИЛИ**

**М. Шопски<sup>1</sup>**

*Ключови думи: залепени в дървесината стоманени пръти, слепена дървесина, комбинирано въздействие*

### **РЕЗЮМЕ**

Проведени са серии от експериментални изпитвания на стоманени шпилки, залепени в дървесина, при едновременно действие на осова и напречна сила. Изследвана е носещата способност и деформативността на реализираното съединение. Резултатите са обработени и сравнени с предписаните от различни нормативни документи носимоспособности. Зависимостите са нанесени на диаграма на взаимодействието на опънните и напречните сили.

### **1. Въведение**

Познати и изследвани като съединителни средства в дървените конструкции от около 40 години, залепените в дървесината пръти бележат относителен възход в практическото си приложение през последните 20 – 25 години. Той се дължи главно на мащабната изследователска работа за изясняване на принципите на работа и якостните и деформативните им характеристики.

---

<sup>1</sup> Мартин Шопски, докторант, кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: martin.shopski@gmail.com

## 1.1. Поведение при осово натоварване

Работата на залепените в дървесината пръти при натоварване на чист опън/натиск е относително благоприятна, с добър „поток на силите“, висока носимоспособност и коравина. Като резултат от научния труд и множеството изследвания в световен мащаб би могло да се заключи, че този въпрос е относително добре изучен. Предлагани са различни формули, базирани на различни изчислителни теории (еластична, пластична, механика на разрушението и т.н.) или на регресионен анализ на резултати от експериментални програми. В настоящата разработка са използвани носимоспособностите, предписани от два документа.

### 1.1.1. DIN EN 1995-1-1/NA:2016 [1]

Действащото национално приложение на Германия предлага формула, позната от предшестващия *DIN1052:2004* [2] и базирана на традиционен якостен анализ. Като резултат се получават сравнително по-ниски стойности на носимоспособностите:

$$F_{ax,Rk} = \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k1,k} \cdot \quad (1)$$

### 1.1.2. prEN 1995-2:2003 [3]

Вследствие на мащабна изследователска работа по европейския проект GIROD в Приложение С на предварителната редакция на Еврокода за дървени мостове е предложена формула, базирана на т.нар. обобщена теория на Volkersen, включваща елементи от механиката на разрушението и класическата якостна теория на лепените съединения. Получените носимоспособности добре обобщават резултатите от проведените в рамките на въпросния проект значителен брой експерименти:

$$R_{ax,k} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_a \cdot f_{ax,k} \cdot \frac{\tanh \omega}{\omega} \cdot \quad (2)$$

## 1.2. Поведение при напречно натоварване

Почти всички литературни източници препоръчват носимоспособностите за залепени пръти под действието на напречни сили да се определят по теорията на *Johansen* [4] за носимоспособност на клечковидни съединителни средства. В светлината на *БДС EN1995-1-1* [5] това обхваща формулите в т. 8.2. За случая на пръти, залепени успоредно на дървесните влакна, в настоящия проект са направени следните корекции:

- Необходимо е отчитането на ексцентрицитета при предаването на напречната сила спрямо опорната плоскост на дървената греда (вж. сн. 2). За различните случаи на разрушение, познати от теорията на *Johansen* [4], са съставени уравненията на равновесие на системата и са изведени формули за съответните носимоспособности;
- Якостта на местно смачкване за пръти, залепени успоредно на влакната, се приема равна на 10% от якостта на местно смачкване напречно на влакната  $f_{h,k}$ . Тя се завишава допълнително с 25% (предписания на цитираните погоре нормативни документи);
- Приема се, че т.нар. „принос на нишката“ е 100% от частта по теорията на *Johansen* (по литературни данни);

- Изчисленията, свързани с разрушение от смачкване, се провеждат с еквивалентен диаметър  $d_h = 14 \text{ mm}$ , представляващ съвкупността от стоманения прът и коравото епоксидно лепило в отвора (цилиндрично тяло с  $d = 14 \text{ mm}$  смачква дървесината).

### 1.3. Взаимодействие на осово и напречно натоварване

Разработката по научната тема цели извеждане на експериментално потвърдена зависимост за взаимодействието на осова и напречна сила при работата на залепените в дървесина стоманени шпилки. Уравнение на границата на „безопасната“ област би имало вида:

$$\left(\frac{N_{Ek}}{N_{Rk}}\right)^\alpha + \left(\frac{V_{Ek}}{V_{Rk}}\right)^\beta = 1, \quad (3)$$

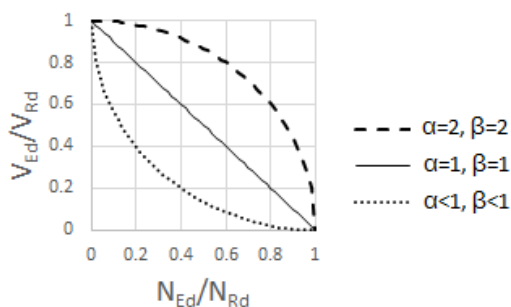
където  $N_{Ek}$  и  $V_{Ek}$  са осова и напречна сила в пръта (шпилката);

$N_{Rk}$  и  $V_{Rk}$  – носимоспособности за осова и напречна сила в пръта (шпилката);

$\alpha$  и  $\beta$  – степенни показатели – реални числа.

Обзорът на научните изследвания в световен мащаб по темата може да се обобщи така:

- в нормативните документи [1, 2, 3] и в разработка на учените *Jensen* и *Quenneville* [6] се приема за валидна квадратна функция на взаимодействие, т.е.  $\alpha = \beta = 2$ ;
- експерименталната програма, предприета от учените *Walker* и *Xiao* [7] води до резултати, които очертават крива на взаимодействие „под“ линейната функция, т.е. с по-малка „област на безопасност“,  $\alpha < 1$ ,  $\beta < 1$ ;
- част от нормативните документи не конкретизират какво е взаимодействието на осовите и напречните сили [8] или въобще не третират залепените в дървесина пръти [5, 9].



Фиг. 1. Примерни криви на взаимодействие / интеракционни криви

Изследванията по темата са относително малко, има някои противоречия и вероятно тези неясноти в известен смисъл възпрепятстват въвеждането на залепените в дървесина пръти в много нормативни документи, с което се ограничава и приложението на тези съединителни средства в практиката.

## 2. Експерименти

Принципна схема на опитната постановка и датчиците са представени на фиг. 2 и сн. 1. По-подробна информация е дадена в [10].

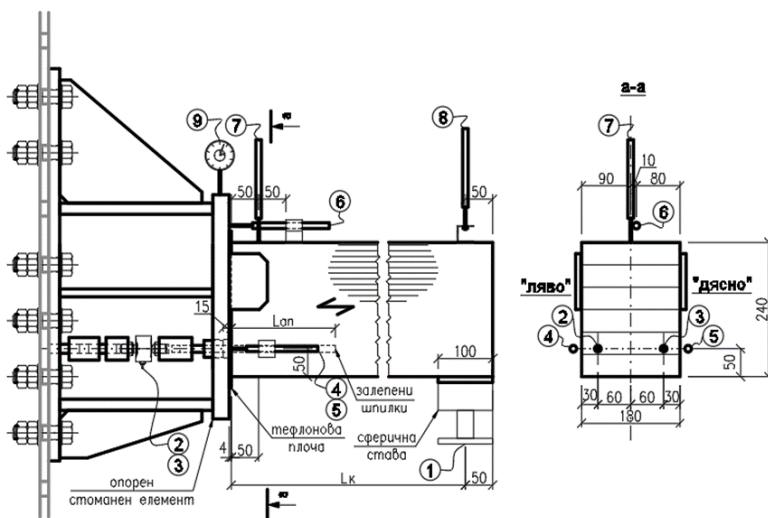
Изпитани до разрушение са 30 образеца – дървени конзолни греди със залепени стоманени шпилки. Дървесината е клас GL32h по БДС EN 14080:2013, заводски изсушена до равновесна влажност  $12\pm 3\%$ . Размерите на напречното сечение на гредите са 180/240 mm, а дължината варира в три размера – 800 mm, 1750 mm и 3050 mm. За нормализиране на стойностите на влажността на дървесината гредите са съхранявани една година на закрито при относителна влажност на въздуха  $65\pm 3\%$  и температура  $20\pm 2^\circ\text{C}$ . Стоманените шпилки са стандартни поцинковани шпилки M12 кл. 4.6 с декларирано удължение при скъсване  $>12\%$ . Изпитвани са образци с номинална дължина (дълбочина) на залепване в дървесината 120 mm и 240 mm (10.d и 20.d). Лепилният състав е двукомпонентно епоксидно лепило HILTI HIT-RE 500. Наименованията и основните характеристики на изпитваните образци са синтезирани в табл. 1.



Сн. 1. Общ вид на постановката



Сн. 2. Муфа, монтирана на 15 mm



Фиг. 2. Схема на опитната постановка и датчиците

**Таблица 1. Основна серия опитни образци**

	$L_k = 800 \text{ mm}$	$L_k = 1750 \text{ mm}$	$L_k = 3050 \text{ mm}$
$L_{an} = 120 \text{ mm}$	M12-80/12-1	M12-175/12-1	M12-305/12-1
	M12-80/12-2	M12-175/12-2	M12-305/12-2
	M12-80/12-3	M12-175/12-3	M12-305/12-3
	M12-80/12-4	M12-175/12-4	M12-305/12-4
	M12-80/12-5	M12-175/12-5	M12-305/12-5
$L_{an} = 240 \text{ mm}$	M12-80/24-1	M12-175/24-1	M12-305/24-1
	M12-80/24-2	M12-175/24-2	M12-305/24-2
	M12-80/24-3	M12-175/24-3	M12-305/24-3
	M12-80/24-4	M12-175/24-4	M12-305/24-4
	M12-80/24-5	M12-175/24-5	M12-305/24-5

За предотвратяване на появата на пукнатина надлъжно на залепената шпилка при натоварване, характерно за образците с  $L_{an} = 240 \text{ mm}$ , изпитани в рамките на етап I [10], тук за основната серия опитни образци са взети специални мерки. На 50 mm от опорното сечение са поставени два винта с цяла резба  $d8 \times 200$ , които пресичат пукнатината и усилват зоната срещу неблагоприятното действие на напречната сила (сн. 3).



**Сн. 3. Винтове за предотвратяване на появата на надлъжна пукнатина**

### 3. Резултати

#### 3.1. Максимални осови сили в шпилките

В табл. 2 са представени максималните стойности на силите в датчици номер *1*, *2* и *3*, респективно в хидравличния крик и двете шпилки, получени от експериментите. Във всички случаи се приема, че напречната сила за гредата, съответстваща на силата в хидравличния крик, се разпределя по равно между двете шпилки, от които се предава на опорния стоманен елемент. При анализа на резултатите в зависимост от последователността на разрушение във времето шпилките са разделени условно на „първа“ и „втора“.

**Таблица 2. Максимални сили в силомерите и съответните компоненти**

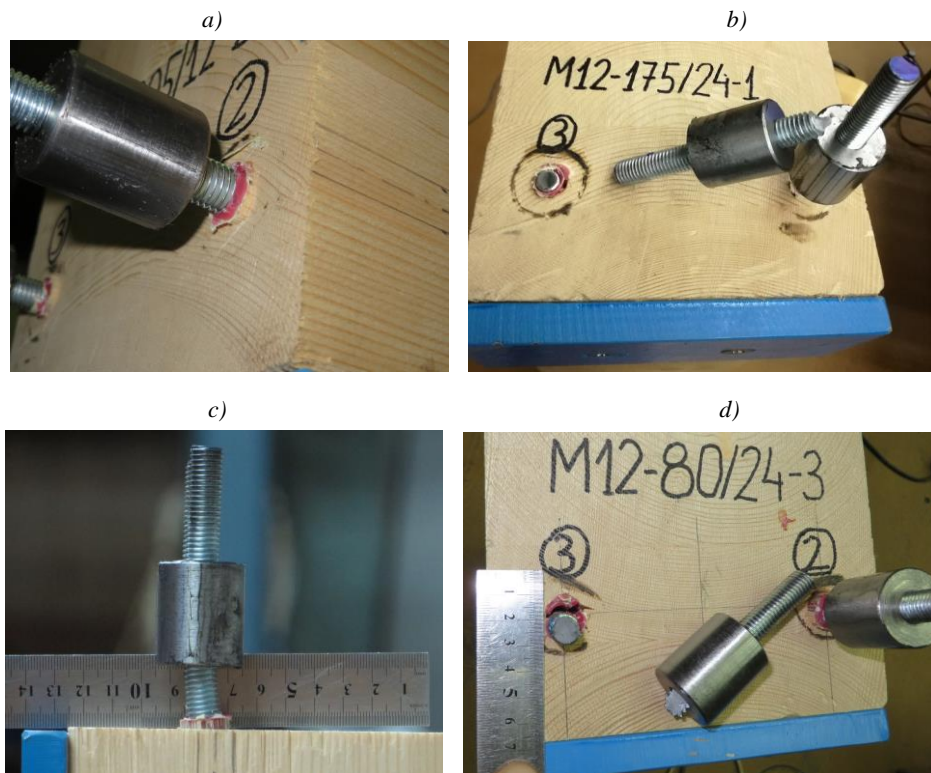
№	Наименование	Макс. сила в крик 1, [kN]	Максимална сила в тензодоза, [kN]		Съответна сила в крика, [kN]		Първа се разрушава
			шп. 2	шп. 3	шп. 2	шп. 3	
1	M12-80/12-1	7,1	26,8	24,5	6,6	7,1	шп. 3
2	M12-80/12-2	10,1	34,6	19,4	8,6	10,1	шп. 3
3	M12-80/12-3	9,1	22,2	20,7	9,1	9,1	шп. 3
4	M12-80/12-4	9,6	31,9	21,7	7,8	9,6	шп. 3
5	M12-80/12-5	8,1	24,6	21,4	6,0	8,1	шп. 3
6	M12-175/12-1	6,3	44,9	30,9	5,1	6,3	шп. 3
7	M12-175/12-2	5,7	35,3	28,7	3,9	5,7	шп. 3
8	M12-175/12-3	6,3	35,0	32,0	3,4	6,3	шп. 3
9	M12-175/12-4	6,6	31,2	36,0	6,6	6,6	шп. 2
10	M12-175/12-5	5,6	35,4	28,9	3,9	5,6	шп. 3
11	M12-80/24-1	17,6	49,9	39,6	13,0	17,6	шп. 3
12	M12-80/24-2	15,1	36,0	50,9	15,1	13,4	шп. 2
13	M12-80/24-3	18,2	40,7	52,2	18,2	13,3	шп. 2
14	M12-80/24-4	19,1	51,8	42,8	13,7	19,1	шп. 3
15	M12-80/24-5	15,6	34,7	51,4	15,5	12,1	шп. 2
16	M12-175/24-1	10,3	50,5	51,0	10,3	6,2	шп. 2
17	M12-175/24-2	9,3	47,6	49,5	9,3	5,6	шп. 2
18	M12-175/24-3	9,8	51,7	48,7	6,3	9,8	шп. 3
19	M12-175/24-4	9,5	47,5	52,9	9,5	6,1	шп. 2
20	M12-175/24-5	10,6	52,0	50,4	10,6	10,5	шп. 3
21	M12-305/24-1	4,0	44,9	37,9	3,1	4,0	шп. 3
22	M12-305/24-2	5,9	51,6	51,5	5,9	5,9	шп. 2
23	M12-305/24-3	4,4	50,5	40,5	3,5	4,2	шп. 3
24	M12-305/24-4	5,5	48,7	49,7	5,5	3,3	шп. 2
25	M12-305/24-5	4,5	39,8	50,1	4,5	3,2	шп. 2
26	M12-305/12-1						прекратен
27	M12-305/12-2	3,7	32,9	35,4	3,7	3,7	шп. 2
28	M12-305/12-3	3,7	34,3	35,8	3,6	3,7	шп. 2
29	M12-305/12-4	3,4	32,6	49,5	3,4	3,2	шп. 2
30	M12-305/12-5						прекратен

### 3.2. Типове разрушение

В изпитаните 30 образца с по 2 шпилки всеки се наблюдават качествено различни видове разрушение на елементите:

- „изтръгване“ – разрушение под действието на срязващи напрежения на границата лепило-дървесина или между дървесните влакна;
- „скъсване“ – разрушение от опън на стоманената шпилка;
- „смачване+изтръгване“ – пластифициране на дървесината под действието на голяма напречна сила, съпроводено с пластична деформация (пластична става) в стоманената шпилка. С увеличаване на силата и изчерпване на носимоспособността за опън, разрушението настъпва от типа „изтръгване“;

- d) „смачкване+скъсване“ – пластифициране на дървесината под действието на голяма напречна сила, съпроводено с пластична деформация в стоманената шпилка. С увеличаване на силата и при наличие на по-голяма носимоспособност на лепеното съединение за осови сили стоманената шпилка се разрушава от опън+срязване.



Сн. 4. Типове разрушение

Разрушенията, съпроводени със скъсване на стоманената шпилка, са относително малко – общо 5%. Появата на пластифициране от напречна сила е по-характерно за случаите на по-къса конзола и по-голяма закотвяща дължина на шпилката.

При някои образци (два случая) се наблюдава развитие на пукнатина надлъжно на шпилката. Нейното последващо разширение обаче е възпрепятствано от поставените точно с тази цел напречни винтове. В крайна сметка се достига до успешното завършване на експериментите.

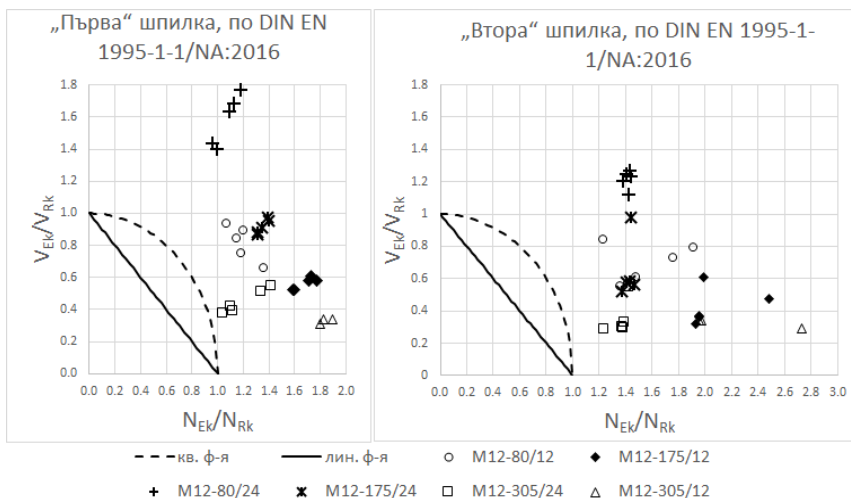
## 4. Анализ и изводи

### 4.1. Анализ на всички резултати

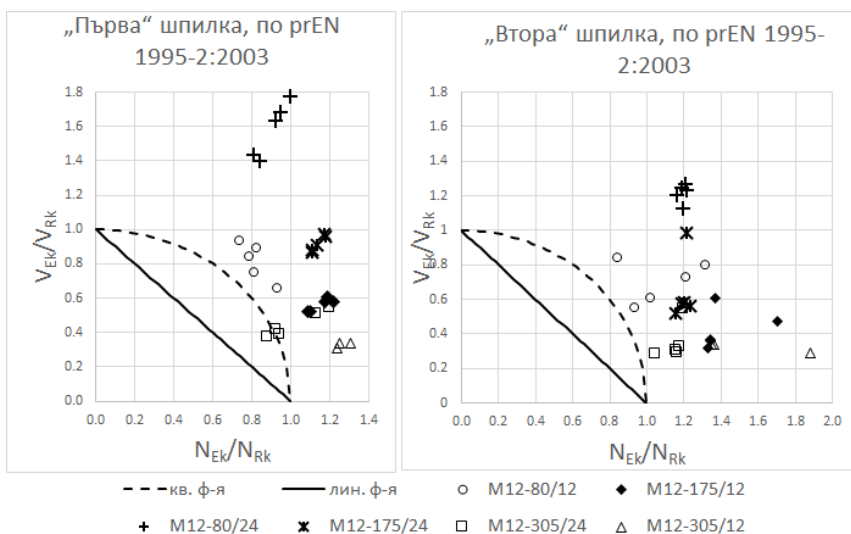
Резултатите от всички експерименти, съотнесени към коментираните в т. 1 изчислени носимоспособности, са нанесени върху графика на взаимодействие (фиг. 3 и фиг. 4). При по-ниските носимоспособности, предписани от [1], резултатите са „транслирани“

вдясно спрямо фиг. 4 и [2], т.е. зоната на безопасност, заградена от линейната или квадратната крива на взаимодействие, е по-далеч от реалните сили, при които са се разрушили опитните образци.

Правят впечатление относително високите стойности на реализираните напречни сили спрямо предписаните носимоспособности за „първите“ шпилки от серии M12-80/24 и M12-175/24 –  $V_{Ek}/V_{Rk} \approx 0,9 \div 1,8$ . Характерно за тези образци е относително голямото преместване в опорното сечение (датчик № 7) – средно 9 mm и 6 mm за двете серии съответно. При определяне на носимоспособностите в стандартите за изпитвания обаче се поставя и ограничение на допустимото относително преместване, тъй като позволяването на голяма деформация на съединението под действието на характеристичен граничен товар би създавало експлоатационни проблеми.



Фиг. 3. Интеракционни зависимости за „първа“ и „втора“ шпилка, носимоспособности по [1]

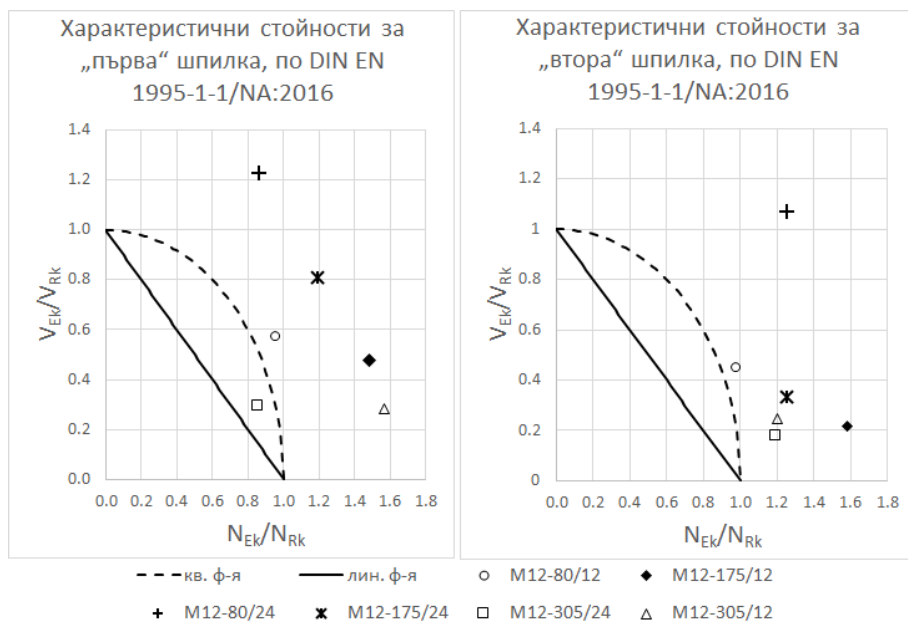


Фиг. 4. Интеракционни зависимости за „първа“ и „втора“ шпилка, носимоспособности по [3]

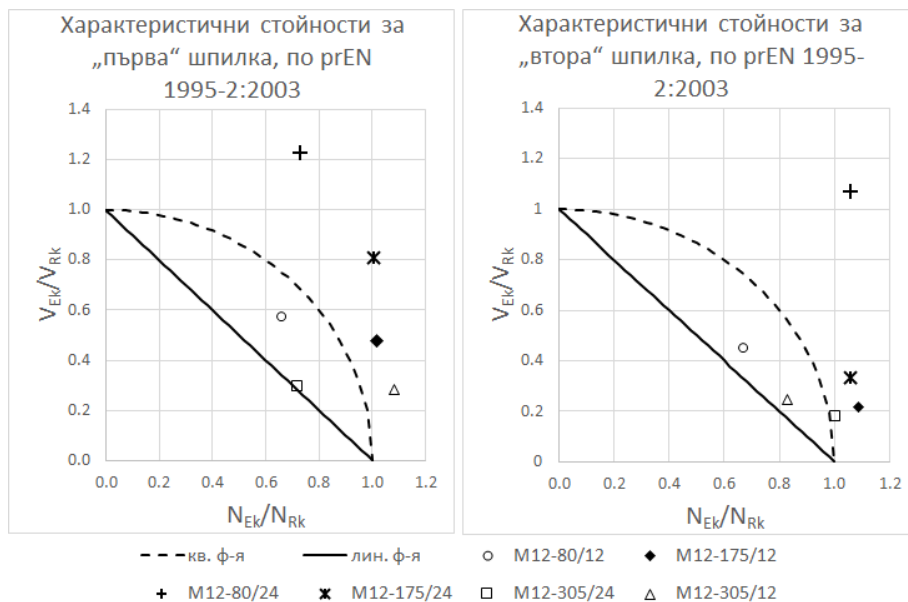


## 4.2. Характеристични стойности

Извършена е статистическа обработка на резултатите от експериментите в съответствие с БДС EN 14358:2016. На базата на логнормално разпределение на стойностите е определена характеристичната стойност (5%-квантил) за отделните случаи.



Фиг. 5. Характеристични стойности – „първа“ и „втора“ шпилка, носимоспособности по [1]



Фиг. 6. Характеристични стойности – „първа“ и „втора“ шпилка, носимоспособности по [3]

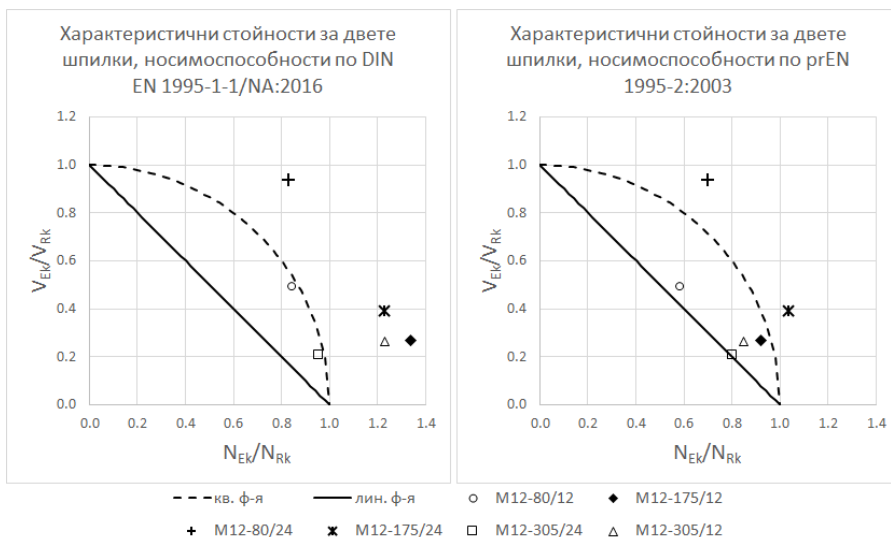
От фиг. 5 е видно, че като цяло взаимодействието при носимоспособности, определени по [1], дава резултати с добър запас на сигурност, с малко изключение на серията M12-305/24 за „първа“ шпилка.

Повече внимание в настоящия анализ се обръща на случая с носимоспособности, определени по [3]. Фиг. 6 представя резултатите с отделна обработка на „първа“ и „втора“ шпилка. Може да се направи заключението, че квадратната парабола като крива на взаимодействие в случая не дава резултати в полза на сигурността, тъй като немалка част от резултатите попадат в заградената от нея зона на безопасност. Приблизителна оценка на точността и достоверността на резултатите може да се направи с помощта на коефициента на вариация (CoV) на резултатите – табл. 3.

**Таблица 3. Коефициент на вариация CoV – „първа“ и „втора“ шпилка, по [3]**

№	Серия	CoV за „първа“ шпилка		CoV за „втора“ шпилка	
		$N_{Ek}/N_{Rk}$	$V_{Ek}/V_{Rk}$	$N_{Ek}/N_{Rk}$	$V_{Ek}/V_{Rk}$
1	M12-80/12	0,09	0,14	0,18	0,18
2	M12-175/12	0,05	0,07	0,11	0,26
3	M12-305/12	0,05	0,05	0,19	0,09
4	M12-80/24	0,09	0,10	0,05	0,05
5	M12-175/24	0,05	0,05	0,05	0,26
6	M12-305/24	0,14	0,17	0,05	0,27

Според някои източници може да се счита, че статистическата извадка е „еднородна“, когато коефициентът на вариация е в границите 10 – 12% и „приблизително еднородна“ между 10% и 30%. Би могло да се направи заключение, че представените резултати попадат обикновено в графата „еднородна“ извадка, особено за случая на „първа“ шпилка по ред на разрушение, а в останалите случаи – в графата „приблизително еднородна“.



**Фиг. 7. Характеристични стойности – общо за двете шпилки**

Когато и двете шпилки („първа“ и „втора“) се обработят съвкупно статистически, разпределението на получените характеристични стойности е представено на фиг. 7.

При разглеждане на така получените резултати и носимоспособности, определени по [3] (фиг. 7 дясно), видимо квадратната парабола не дава резултати в полза на сигурността. За тези условия по-удачно би било да се търси крива на взаимодействие под формата на права линия.

## 5. Заключение

В рамките на научното изследване е разработена опитна постановка за изпитване на дървени греди със залепени стоманени шпилки, чрез която се постига едновременно натоварване на шпилките с осова и напречна сила. В УНИЛ към катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“ при УАСГ са реализирани изпитвания на 30 експериментални образеца в 6 серии с вариране на стойностите на дължината на конзолната греда и дълбочината на залепване на прътите, съставляващи основната група експерименти по темата.

При различните изпитани образци се наблюдава качествена разлика в типа на разрушението – т.нар. „изтръгване“, „скъсване“, „смачкване+изтръгване“ и „смачкване+скъсване“. При по-късите греди с по-голяма закотвяща дължина на шпилката преобладава влиянието на напречната сила и т.нар. разрушение от „смачкване“, съпроводено с пластична деформация от огъване в стоманената шпилка. За по-дългите греди ръководещо е осовото натоварване и очаквано се наблюдава предимно разрушение от опън.

На база на носимоспособности, изчислени по методики, предписани в различни нормативни документи, е извършена статистическа обработка на резултатите. Определени са средни и характеристични стойности и е извършена оценка на достоверността на обработката с помощта на коефициента на вариация. Като се има предвид междинният етап на работата и резултатите, получени по време на проведените експерименти, към момента могат да бъдат направени следните изводи:

- Действащото национално приложение на Германия към Еврокод 5 [1] предписва „относително ниски“ стойности на носимоспособността за осови сили, от което и взаимодействието на осова и напречна сила е достатъчно добре обезпечено със сигурност.
- Отмененото Приложение С на [3] с „относително по-високи“ носимоспособности за опън препоръчва използването на квадратна функция на взаимодействие, която не може да бъде потвърдена от настоящите експериментални резултати. В случая по-подходящо би било приемането на линейна функция на взаимодействие.

Може да се заключи, че основната част от планиваната експериментална работа по научната тема е извършена, като данните са обработени статистически и са изведени характеристични стойности. Направено е сравнение на резултатите с предписанията на водещи нормативни документи.

Поради актуалността на темата и предвид текущото преразглеждане на Европейските норми за проектиране на строителни конструкции (Еврокод) и разработването на т.нар. „второ поколение Еврокодове“, екипът планува да продължи работата по проблемите, засегнати от научната тема, с допълнителни експерименти и анализи.

## Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-85/2016 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. DIN EN 1995-1-1/NA:2016. Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
2. DIN 1052:2004. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
3. prEN 1995-2:2003. Design of Timber Structures. Part 2: Bridges.
4. *Johansen, K. W.* Theory of timber connections. International Association for Bridge and Structural Engineering, No. 48, 1949.
5. БДС EN 1995-1-1. Проектиране на дървени конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.
6. *Jensen, J. L., Quenneville, P.* Connections with Glued-in Rods Subjected to Combined Bending and Shear Actions. Paper 42-7-9. In: Proceedings of the 42nd conference of CIB-W18, 2009.
7. *Walker, J., Xiao, R.* Strength of glued-in rods under combined axial and lateral loading. In: Experimental Research with Timber, COST Action FP1004, 2014.
8. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции.
9. NDS for Wood Construction, 2018.
10. *Шопски, М.* Поведение на стоманени шпилки, слепени с конструктивна дървесина, при комбинирано действие на осови и напречни сили. // Годишник на УАСГ, том L, брой 4, с. 73 – 88, София, 2017.

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON GLUED-IN STEEL RODS SUBJECTED TO COMBINED AXIAL AND LATERAL LOADING

**M. Shopski<sup>1</sup>**

*Keywords: glued-in rods, glulam, combined loading*

### ABSTRACT

A series of experimental tests on steel threaded rods glued into timber under the combined action of axial and lateral loading has been conducted. The load bearing capacity and deformability of the connectors are regarded in the study. The results are analyzed and compared with the provisions in different design codes. The mean and characteristic values from the experiments are plotted on a tension-shear interaction diagram.

---

<sup>1</sup> Martin Shopski, Eng. PhD Student., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: martin.shopski@gmail.com