



DOI: [10.71167/uaceg.2025.580310](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.580310)

Получена: 13.06.2025 г.

Приета: 20.06.2025 г.

ВЛИЯНИЕ НА ШАЙБИТЕ ВЪРХУ НОСИМОСПОСОБНОСТТА НА ЕДНОСРЕЗНИ БОЛТОВИ СЪЕДИНЕНИЯ

Л. Здравков¹, В. Танев², Д. Динев³

Ключови думи: едносрезно болтово съединение, шайби, лабораторно изпитване, носимоспособност, нелинеен анализ

РЕЗЮМЕ

Болтовите съединения са най-разпространеният способ за снаждане на обекта на тънкостенни поцинковани листове. За целта се използват болтове с малък диаметър (M8, M10 или M12) и съответните гайки. Според стандарт БДС EN 1993-1-8 [1] само при едносрезни съединения с една редица болтове следва да се осигурят шайби както под главите, така и под гайките на болтовете. Т.е., при две или повече редици болтове не е необходимо поставянето на шайби под главата на болта.

Във връзка с авария на тънкостенни стоманени силози [2], в лаборатория на Университета по архитектура, строителство и геодезия е проведено изпитване на едносрезни съединения с два реда болтове, без шайби под гайките. Тяхната носимоспособност се е оказала по-ниска от теоретично определената. Първоначалното обяснение е, че липсата на плоски шайби под главите на болтовете води до големи завъртания, а оттам – до намалена носимоспособност. За да проверят това логично на пръв поглед обяснение, авторите са провели серия от лабораторни и числени изпитвания на едносрезни съединения с два реда болтове. Резултатите от тях показват, че наличието на шайби под главата на болта и под гайката оказва влияние върху носимоспособността на този тип съединения.

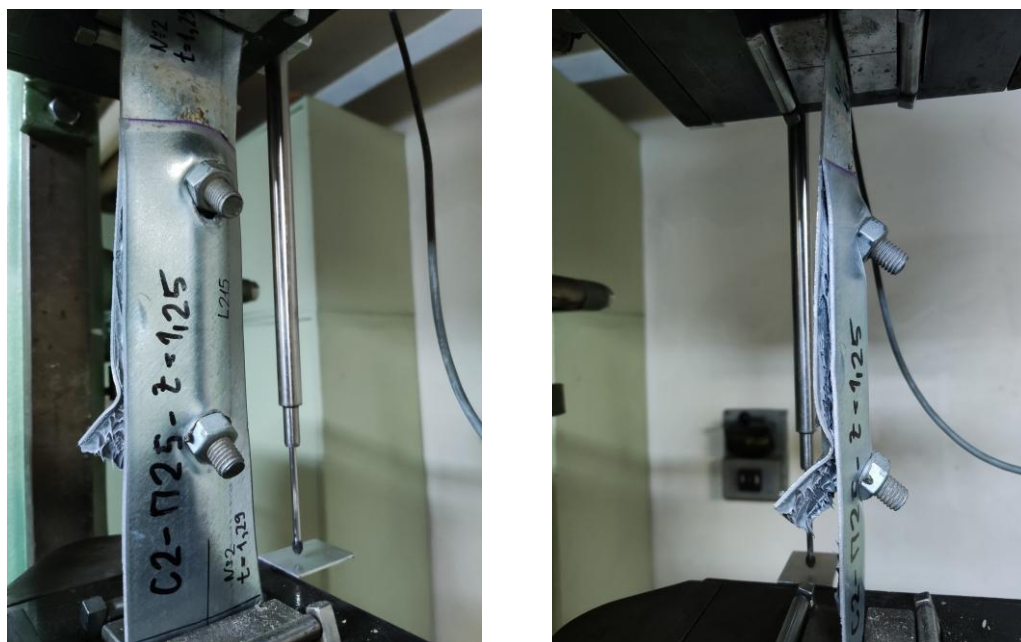
¹ Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

² Въльо Танев, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tanev_fce@uacg.bg

³ Добромир Динев, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg

1. Въведение

Сутринта на 16.08.2021 г., няколко минути след началото на първото изпразване на стоманен силос от тънкостенна поцинкована ламарина, цилиндричното му тяло се разкъсва и той се разрушава цялостно. При падането на земята силозът и прикрепената към него елеваторна кула удрят и разкъсват стената на съседния силос. Екип от Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ) беше поканен на мястото на аварията за оглед и за установяване на причините за настъпването ѝ. За целта членовете на екипа изпитаха образци от стоманените листове в корпуса и направиха контролни изчисления. В процеса на работа бяха изпитани няколко снаждания на листове с припокриване, реализирани с по два болта М10, клас 8.8. Листовете в съединенията са с дебелина $t = 1,25$ mm. Получените лабораторни резултати $F_{b, test}$ са сравнени с определените по аналитичен път $F_{b, 1,25, Rk}$ съгласно методиката на стандарт БДС EN 1993-1-3:2007 [3]. Оказва се, че характеристичните носимоспособности на болтовото съединение на смачкване $F_{b, 1,25, Rk}$ са по-големи от експериментално определените $F_{b, test}$. Първото възникнало обяснение е, че това се дължи на липсата на плоски шайби под гайките в изпитваните болтови снаждания между листовите. В резултат на това не се възпрепятства завъртането на болтовете, което води до големи местни деформации под главите им и под гайките, вж. фиг. 1.



Фиг. 1. Завъртане на болтовете в снаждането и деформации в листовите при лабораторните изпитвания от 2021 г. [2]

За да бъде проверено това логично на пръв поглед обяснение, авторите са провели серия от лабораторни и числени изпитвания на едносрезни болтови съединения. В половината от тях под главите на болтовете и гайките са поставени шайби, а в другата половина няма такива. Освен това, авторите са варирали с дебелината на снажданите стоманени листове.

2. Определяне на носимоспособността на болтовите съединения

Изследването е направено с образци, имащи показаните на фиг. 2 начин на снаждане, форма и размери. Последните са подбрани така, че да отговарят на посочените в (6) граници на валидност:

номинална дебелина на снажданите листове – $t = 0,8 \div 2,5$ mm;

листове са студено деформирани;

съединителни средства – два болта М8, клас 8.8;

отвори за болтовете – $d_o = 9$ mm;

$e_1 = 18$ mm $> 1,0d_o = 9$ mm;

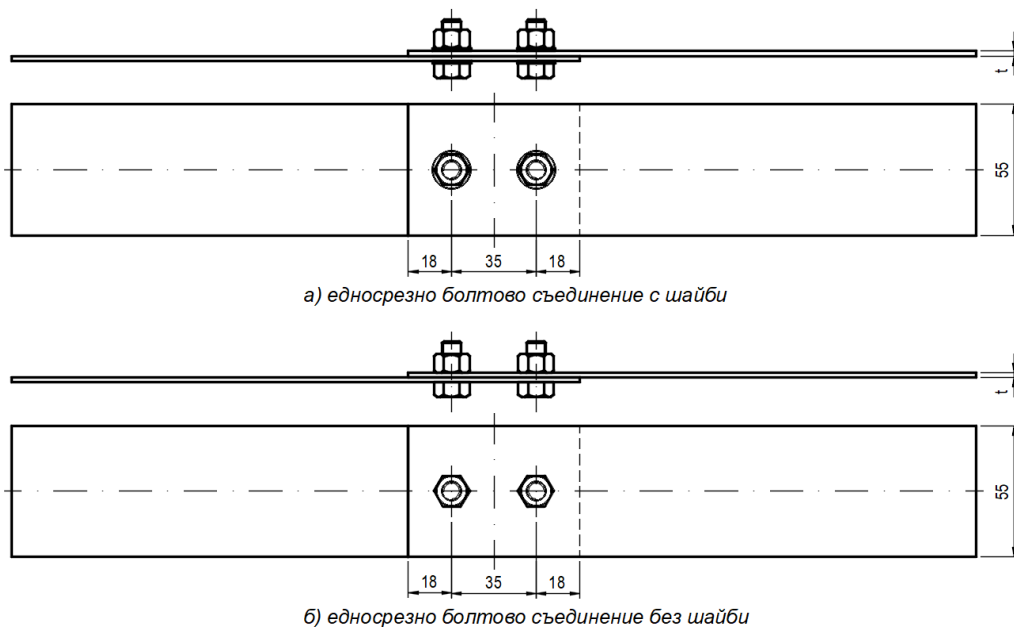
$e_2 = 27,5$ mm $> 1,5d_o = 13,5$ mm;

$p_1 = 35$ mm $> 3,0d_o = 27$ mm,

където e_1 е разстоянието от центъра на болта до ръба на присъединяваната част по направление, успоредно на посоката на опъна, вж. фиг. 3;

e_2 – разстоянието от центъра на болта до ръба на присъединяваната част в направление, перпендикулярно на посоката на опъна;

p_1 – разстоянието между центровете на болтовете в направление, успоредно на посоката на опъна.

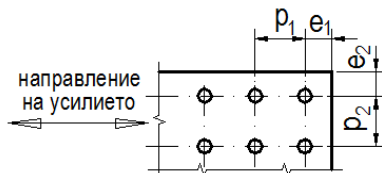


Фиг. 2. Форма и размери на изследваните образци с болтове

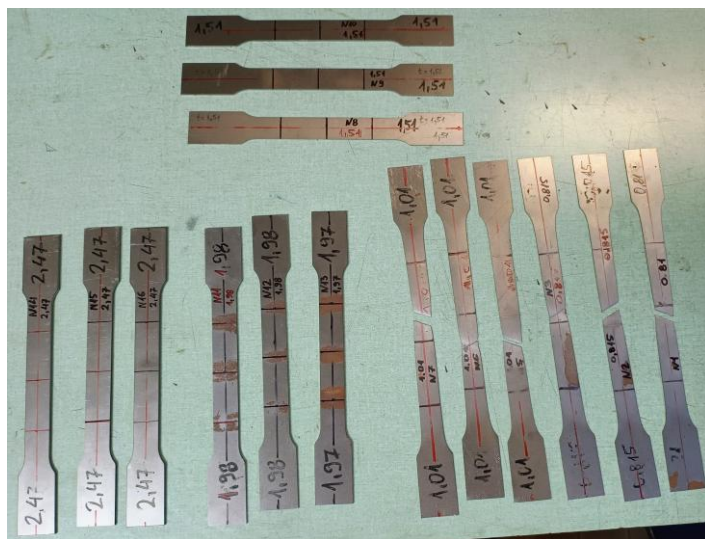
Половината от едносрезните болтови снаждания между двата листа са реализирани чрез болтове, гайки и шайби, вж. фиг. 2а, а втората половина от снажданията – само чрез болтове и гайки, вж. фиг. 2б. Целта е да се определи влиянието на шайбите в този тип едносрезни съединения.

Стоманата в лабораторните образци е DC01 по стандарт EN 10130:2006 [4], с произход Египет. Студеното валцуване е извършено в Турция. Пазарът в България предлага студенодеформирани листове само с този клас нисковъглеродни стомани при търсените дебелини от $t < 3,0$ mm. Производителят е представил сертификати за

механичните характеристики и химическия състав на стоманата. Независимо от тях, механичните характеристики за всяка от използваните дебелини са определени опитно в лаборатория на УАСГ, вж. фиг. 4.



Фиг. 3. Означения на разстоянията между отворите и разстоянията до краищата на съединяваните елементи [1]



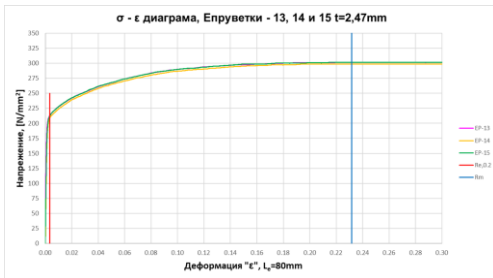
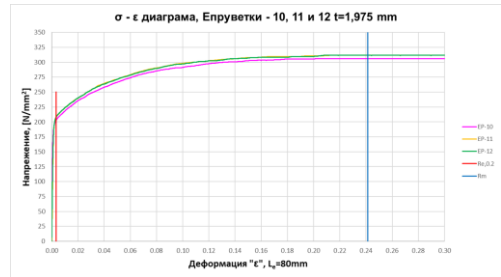
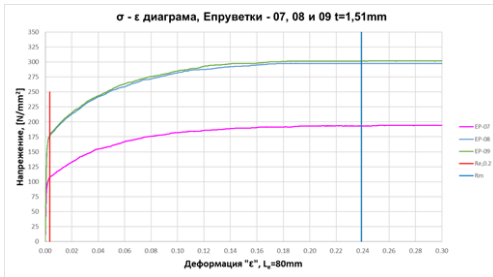
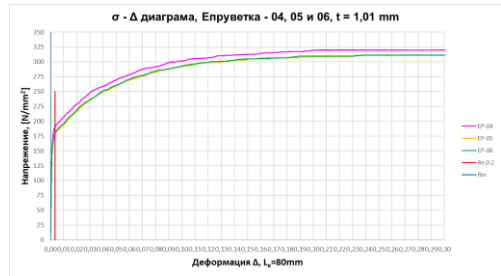
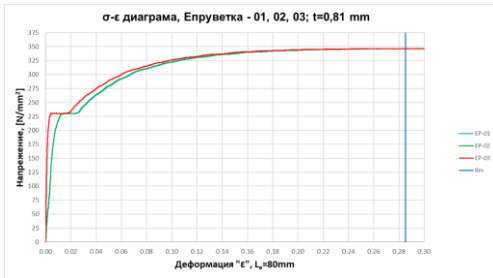
Фиг. 4. Образци за определяне на механичните характеристики на стомана DC01

За всяка от изпитаните епруветки е построена зависимостта напрежение – деформации ($\sigma - \Delta$), при дължина на базата на уреда $L_e = 80$ mm, вж. фиг. 5.

На тази база са получени осреднените механични показатели на изследваните образци, по дебелини, вж. табл. 1. Тук правят впечатление определените много ниски стойности на модула на еластичност E .

Таблица 1. Осреднени механични показатели на изследваните образци от стомана DC01

№	t mm	f_y MPa	f_u MPa	E MPa
1	0,81	224,02	341,27	164 121
2	1,01	182,74	314,10	140 178
3	1,51	201,06	264,55	125 695
4	1,98	206,20	309,77	165 158
5	2,47	211,46	300,63	154 878



Фиг. 5. Реална зависимост σ - ϵ за стомана DC01

2.1. Аналитично определяне

В стандарт БДС EN 1993-1-3:2007 [3] е посочена методика за аналитично определяне на носимоспособността на болтовете, снаждащи стоманени листове с малка дебелина. Записаните там формули имат вида:

а) характеристична носимоспособност на смачкване:

$$F_{b,Rk} = 2,5\alpha_b k_t d t f_u, \quad (1)$$

където d е диаметърът на цилиндричното тяло на болта;

t – изчислителната дебелина на снажданите стоманени листове;

f_u – характеристичната стойност на якостта на опън на стомана в снажданите тънкостенни листове.

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0, \frac{e_1}{3d} \right\}, \quad (2)$$

$$k_t = \frac{0,8t + 1,5}{2,5} \text{ при } 0,75 \text{ mm} \leq t \leq 1,25 \text{ mm}, \quad (3)$$

$$k_t = 1,0 \text{ при } t > 1,25 \text{ mm}; \quad (4)$$

б) носимоспособност на срязване

Характеристичната носимоспособност на срязване при болтове клас 8.8 се определя чрез израза:

$$F_{v,Rk} = 0,6A_s f_{ub}, \quad (5)$$

където A_s е площта на напречното сечение на болта в равнината на срязване;

f_{ub} – характеристичната стойност на якостта на опън на болтовете.

Формули (1 – 5) са валидни, когато са изпълнени посочените в стандарт БДС EN 1993-1-3:2007 [3] условия:

$$\begin{aligned} 0,75 \text{ mm} \leq t < 3 \text{ mm} & \quad f_u \leq 550 \text{ MPa} \\ e_1 \geq 1,0d_o & \quad p_1 \geq 3,0d_o \\ e_2 \geq 1,5d_o & \quad p_2 \geq 3,0d_o \end{aligned} \quad (6)$$

В представената по-горе аналитична методика на стандарт БДС EN 1993-1-3:2007 [3] не се отчита наличието на шайби и разстоянието p_1 между центровете на болтовете.

В американския стандарт AISI S100-16 [5], при определяне на носимоспособността на болтовите съединения в стоманени листове с малка дебелина са предвидени две възможности – да не се отчитат деформациите в отворите за болтовете или тези деформации да се отчитат, като при първата възможност може да се отчита още наличието на шайби под главата на болта и гайката. Записаните в AISI S100-16 [5] формули за определяне на характеристичните носимоспособности имат вида:

а) когато не се отчитат деформациите на отворите за болтовете

$$F_{b,Rk} = C m_f d t f_u, \quad (7)$$

където C е коефициент, определян от таблица J3.3.1-1 на AISI S100-16, в зависимост от вида на отворите и отношението d/t . При разглежданите тук случаи, където отворите са стандартни и отношението $d/t < 10$, коефициентът $C = 3,0$;

m_f – коефициент, определян от таблица J3.3.1-2 на същия стандарт, в зависимост от броя на срезове в съединението, вида на отворите за болтове и наличието на шайби. При разглежданите тук случаи на едносрезно съединение и стандартни отвори коефициентът m_f ще бъде със следните стойности:

= 1,00 – при наличие на шайби под главата на болта и под гайката;

= 0,75 – без шайби под главата на болта и под гайката, или само с една шайба.

б) при отчитане на деформациите в отворите за болтовете

$$F_{b,Rk} = (4,64\alpha t + 1,53) d t f_u, \quad (8)$$

където α е коефициент за превръщане на мерните единици, както следва:

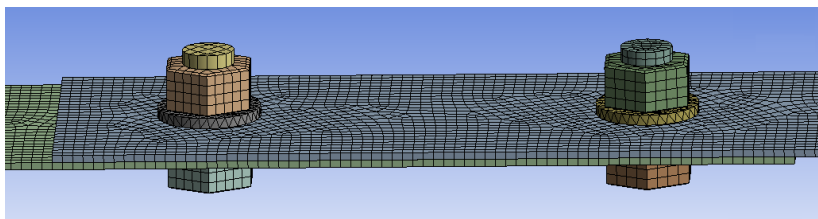
= 1,0 за U.S. мерна система (с t в инчове);

= 0,0394 за SI мерна система (с t в милиметри).

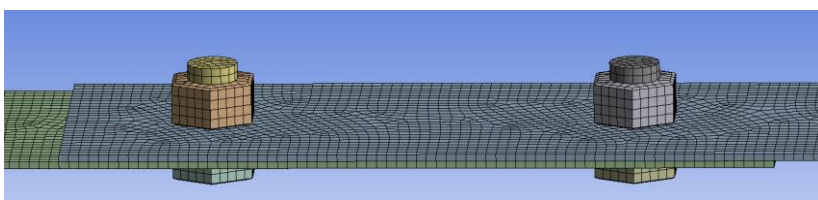
2.2. Числено определяне

С помощта на софтуерен продукт ANSYS [6] са създадени множество числени модели на едносрезни болтови снаждания, чиито вид и размери са показани на фиг. 3. Формата и размерите на болтовете M8, гайките и шайбите $\varnothing 9$ са съгласно стандартите EN ISO 4014:2000 [7], EN ISO 4032:2000 [8] и EN ISO 7089:2000 [9].

За моделирането на тънкостенните листове е използван елемент solid186, който се прилага при симулиране на пластична работа на материала. Елементи solid186 имат по 20 възела – в ъглите и в средата на ръбовете. Всеки възел има по три степени на свобода. Максималният размер на крайните елементи в числените модели, вж. фиг. 6, е 2 mm.



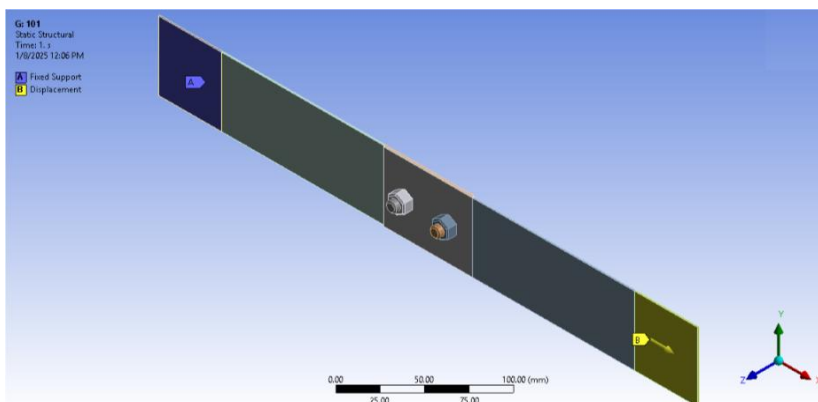
а) болтово снаждане с използване на шайби



б) болтово снаждане без шайби

Фиг. 6. Числен модел на снаждането чрез болтове

Граничните условия в изчислителния модел са описани така, че да наподобят в максимална степен проведеното експериментално изпитване в лабораторията на УАСГ (фиг. 7). Определянето на носещата способност на болтовото съединение в изчислителния модел е извършено чрез натоварване с контрол на преместванията.



Фиг. 7. Гранични условия на числения модел

Носимоспособността на болтовите съединения е определена по следния начин:

а) в десните, линейно подвижни краища на моделите, е приложено преместване в надлъжна посока. Целта е, при така подобрите дължини на образците, нормалните напрежения в снажданите листове да достигнат границата на провлачане на стоманата;

б) преместването се реализира постепенно, на стъпки. При решението се следи за сходимост на силите, преместванията и на завъртанията;

в) опорните реакции в левите (неподвижните) опори дават информация за усилията в болтовите съединения. Най-голямата сила на практика е носимоспособността на болтовете.

Решенията на числените модели са извършени с отчитане на геометричното и материално нелинейно поведение на съставните компоненти на съединението. Материалното нелинейно поведение на листовата стомана DC01 е описано с мултилинейна работна диаграма съгласно резултатите от изпитването на лабораторните образци, вж. табл. 1 и фиг. 5.

2.3. Експериментално определяне

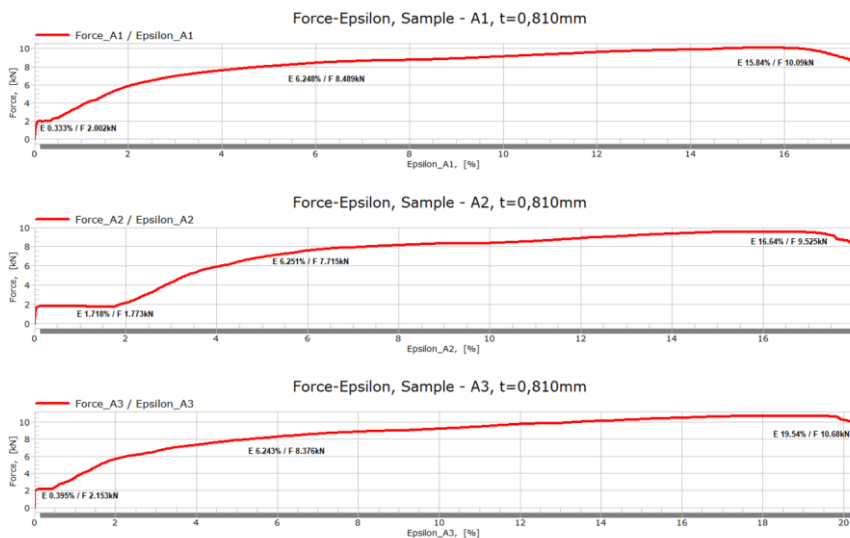
За изпитването на болтовите съединения, вж. фиг. 8, е използвана машина (преса) за натоварване с постоянна скорост от 5 mm/min. Нарастването на относителните деформации на изпитваните образци е 0,001/s, което е в съответствие със стандарт БДС EN ISO 6892-1:2020 [10]. За запис на данните от експериментите са използвани калибрирани датчици за премествания, сили и относителни деформации (екстензометри). Данните от датчиците са усилявани и записвани посредством универсален усилвател QuantumX, модел 840В, на фирма „НВМ“. Честотата за отчитане и записване на резултатите при всички серии експериментални изпитвания е минимум 20 Hz.

Екстензометърът е с клас на точност 0,5 според ISO 9513:2012 [11].

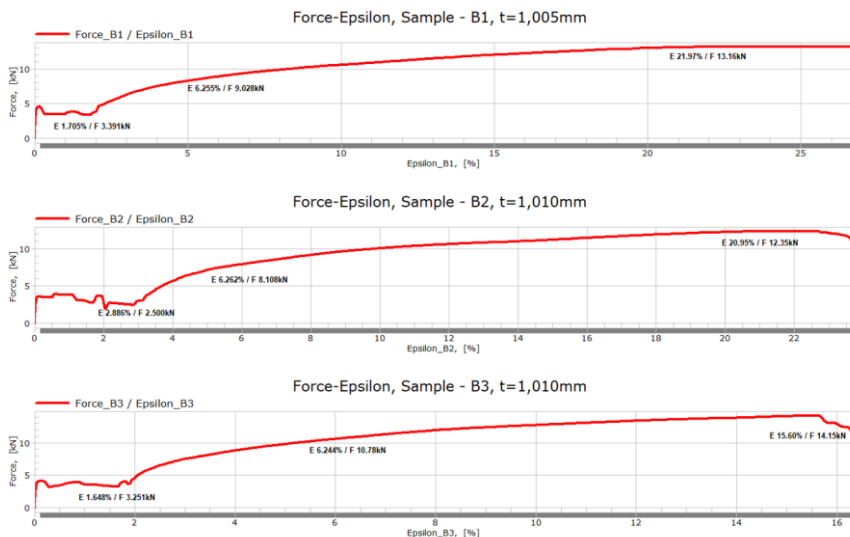


Фиг. 8. Опитна постановка за определяне на носимоспособността на еднорезно болтово съединение

При провеждане на изпитванията е отчитано какви са опънните усилия в краищата на стоманените образци при съответните надлъжни деформации в тях. На тази база са построени графики сила-преместване за всеки изпитан образец. На фиг. 9 са показани тези зависимости при листове с дебелини $t = 0,81$ и $1,01$ mm. При по-големите дебелини зависимостите са аналогични. Максималното отчетено усилие съответства на характеристичната носимоспособност на едносрезното болтово съединение.



a) при листове с дебелина $t = 0,81$ mm



б) при листове с дебелина $t = 1,01$ mm

Фиг. 9. Зависимост сила-деформации в болтовото съединение, определена опитно

3. Резултати от определяне на носимоспособността на болтовите съединения

3.1. При използване на аналитични методи

Определените по формули (1 – 4) характеристични стойности на носимоспособността на смачкване $F_{b,Rk}$ на един болт М8 са показани в табл. 2.

Характеристичната носимоспособност на срязване $F_{v,Rk}$ при болтове М8, клас 8.8, е определена по формулата:

$$F_{v,Rk} = 0,6A_s f_{ub} = 0,6 \cdot 0,366 \cdot 80 = 17,57 \text{ kN}.$$

Вижда се, че за всички дебелини на листовите е меродавна носимоспособността на смачкване.

Таблица 2. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,Rk}$, определена аналитично, според стандарт БДС EN 1993-1-3:2007 [3]

№	t mm	Широчина mm	d mm	e_1 mm	p_1 mm	a_b	k_t	f_u MPa	$F_{b,Rk}$ kN
1	0,81	55	8	18	35	0,75	0,859	341,27	3,562
2	1,01	55	8	18	35	0,75	0,923	314,10	4,392
3	1,51	55	8	18	35	0,75	1,0	264,55	5,992
4	1,98	55	8	18	35	0,75	1,0	309,77	9,2
5	2,47	55	8	18	35	0,75	1,0	300,63	11,138

Характеристичните стойности на носимоспособността на смачкване $F_{b,Rk}$ на един болт М8, когато не се отчитат деформациите на отворите, са показани в табл. 3.

Таблица 3. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,Rk}$, определена аналитично, по AISI S100-16 [5], когато не се отчитат деформациите на отворите

№	t mm	Широчина mm	d mm	C	Шайба		f_u MPa	$F_{b,Rk}$ kN
					m_f			
1	0,81	55	8	3	със	1,0	341,27	6,634
					без	0,75		4,976
2	1,01	55	8	3	със	1,0	314,1	7,614
					без	0,75		5,71
3	1,51	55	8	3	със	1,0	264,55	9,587
					без	0,75		7,19
4	1,98	55	8	3	със	1,0	309,77	14,72
					без	0,75		11,04
5	2,47	55	8	3	със	1,0	300,63	17,821
					без	0,75		13,366

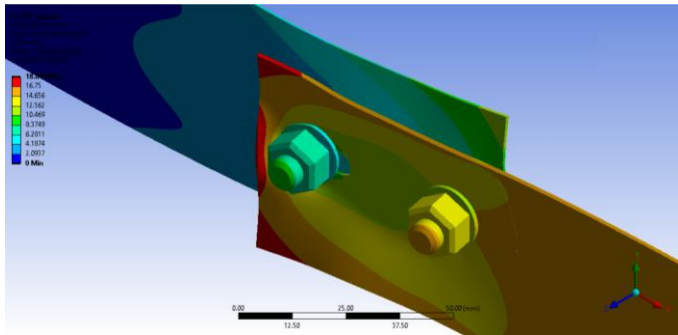
Определените по формула (8) характеристични стойности на носимоспособността на смачкване $F_{b,Rk}$ на един болт М8, когато се отчитат деформациите на отворите, са показани в табл. 4.

Таблица 4. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,Rk}$, определена аналитично, по стандарт AISI S100-16 [5], когато се отчитат деформациите на отворите

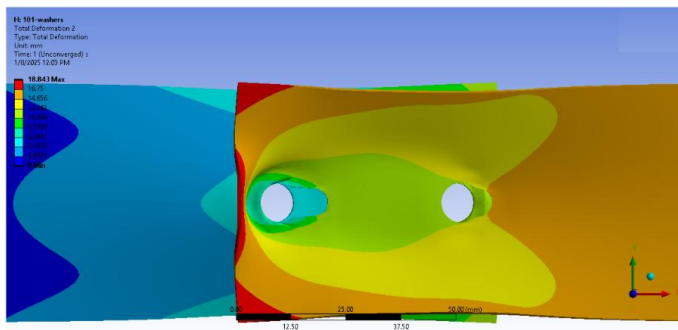
№	t mm	Широчина mm	d mm	α	f_u MPa	$F_{b,Rk}$ kN
1	0,81	55	8	0,0394	341,27	3,711
2	1,01	55	8	0,0394	314,10	4,352
3	1,51	55	8	0,0394	264,55	5,772
4	1,98	55	8	0,0394	309,77	9,283
5	2,47	55	8	0,0394	300,63	11,771

3.2. При използване на числени методи

В числените модели е отчетено завъртане на болтовете и свързаните с това деформации в снажданите стоманени листове, вж. фиг. 10. Те са подобни на деформациите в стоманените образци при лабораторните изпитвания, вж. фиг. 13г.



Фиг. 10. Деформиране на листовите в числените модели



Фиг. 11. Характерно овализиране на отворите за болтове (болтовете не са показани)

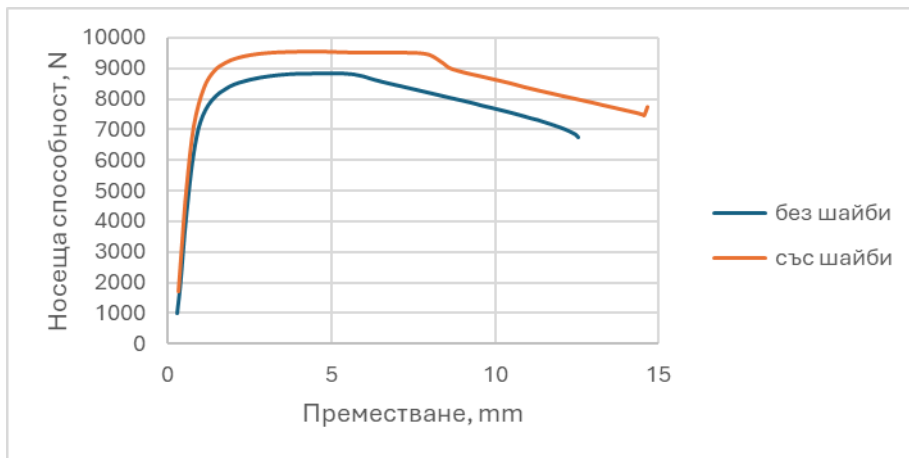
Особено характерна е овализацията на отворите за болтове, вж. фиг. 11. Такава е наблюдавана както при изпитванията в лабораторията на УАСГ, вж. фиг. 13в, така и в изследванията на *Kim и др.* [12], *Kim и Cho* [13], *Lim и др.* [14], *Khalifa и др.* [15].

Определените чрез числени методи характеристични стойности на носимоспособността $F_{b,FEA,Rk}$ на един болт М8 са показани в табл. 5.

Таблица 5. Характеристична носимоспособност $F_{b,FEA,Rk}$, определена чрез числено моделиране

№	t mm	Широчина mm	d_o mm	e_1 mm	p_1 mm	Шайба	f_u MPa	$F_{b,FEA,Rk}$ kN
1	0,81	55	9	18	35	със	341,27	4,772
						без		4,418
2	1,01	55	9	18	35	със	314,1	5,484
						без		5,113
3	1,51	55	9	18	35	със	264,55	8,709
						без		8,301
4	1,98	55	9	18	35	със	309,77	13,736
						без		12,08
5	2,47	55	9	18	35	със	300,63	17,11
						без		16,15

Добавянето на шайби към болтовото съединение води до повишаване на носещата способност, вж. фиг. 12. Същевременно с това води до подобряване на дуктилното поведение на съединението, особено при големи дебелини на листовете.



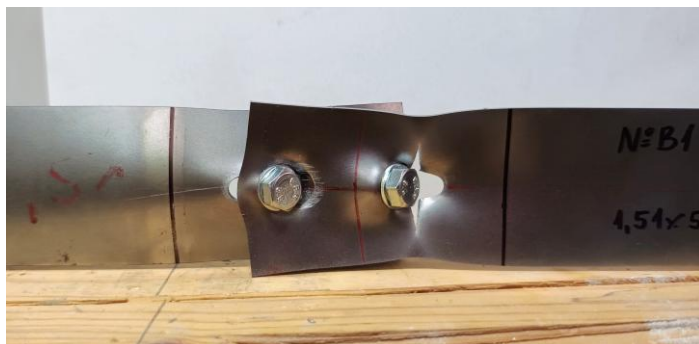
Фиг. 12. Типична крива, описваща зависимостта „преместване-носимоспособност“, получена от численото моделиране

За доказване на коректността на числено определените стойности на $F_{b,FEA,Rk}$ те са сравнени с получените по експериментален път, вж. т. 3.3.

3.3. При експериментално определяне

При опитното определяне на носимоспособността на едносрезните болтови съединения са наблюдавани следните крайни форми на разрушение:

- а) разкъсване през отслабеното сечение, напречно на оста, вж. фиг. 13а;
- б) надлъжно разцепване на краищата на елементите, вж. фиг. 13б;
- в) овализация на отворите, вж. фиг. 13в;
- г) завъртане на болтовете в съединението, вж. фиг. 13г.



а) разкъсване на отслабеното сечение



б) надлъжно разцепване на краищата на образците



в) овализация на отворите



г) завъртане на болтовете в съединението

Фиг. 13. Наблюдавани форми на разрушение на болтовите съединения при проведените лабораторни изпитвания

Следва да се подчертае, че показаните на фиг. 13а и б форми на разрушение са се случили, въпреки че са спазени всички конструктивни изисквания, записани в стандарт БДС EN 1993-1-3:2007 [3].

Определените по експериментален път характеристични стойности на носимоспособността на смачкване $F_{b,test}$ са показани в табл. 6 ÷ 10.

Таблица 6. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,test,0,8}$ при номинална дебелина $t = 0,8$ mm, определена опитно

Образец №	t mm	Широчина mm	d mm	d_o mm	e_1 mm	p_1 mm	Шайба	$F_{b,test,0,8}$ kN
A1	0,81	55	8	9	18	35	със	5,05
A2	0,81	55	8	9	18	35		4,77
A3	0,81	55	8	9	18	35		5,34
A4	0,81	55	8	9	18	35	без	3,78
A5	0,81	55	8	9	18	35		3,78
A6	0,805	55	8	9	18	35		4,05

Таблица 7. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,test,1,0}$ при номинална дебелина $t = 1,0$ mm, определена опитно

Образец №	t mm	Широчина mm	d mm	d_o mm	e_1 mm	p_1 mm	Шайба	$F_{b,test,1,0}$ kN
Б1	1,005	55	8	9	18	35	със	6,58
Б2	1,01	55	8	9	18	35		6,18
Б3	1,01	55	8	9	18	35		7,08
Б4	1,01	55	8	9	18	35	без	4,54
Б5	1,01	55	8	9	18	35		4,64
Б6	1,01	55	8	9	18	35		4,87

Таблица 8. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,test,1,5}$ при номинална дебелина $t = 1,5$ mm, определена опитно

Образец №	t mm	Широчина mm	d mm	d_o mm	e_1 mm	p_1 mm	Шайба	$F_{b,test,1,5}$ kN
B1	1,51	55	8	9	18	35	със	11,1
B2	1,51	55	8	9	18	35		10,69
B3	1,49	55	8	9	18	35		10,78
B4	1,49	55	8	9	18	35		11,54
B5	1,49	55	8	9	18	35	без	8,82
B6	1,505	55	8	9	18	35		8,66

Таблица 9. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,test,2,0}$ при номинална дебелина $t = 2,0$ mm, определена опитно

Образец №	t mm	Широчина mm	d mm	d_o mm	e_1 mm	p_1 mm	Шайба	$F_{b,test,2,0}$ kN
Г1	1,96	55	8	9	18	35	със	14,71
Г2	1,98	55	8	9	18	35		14,81
Г3	1,98	55	8	9	18	35	без	12,14
Г4	1,98	55	8	9	18	35		12,02
Г5	1,97	55	8	9	18	35		11,96

Таблица 10. Характеристична носимоспособност на смачкване $F_{b,test,2,5}$ при номинална дебелина $t = 2,5$ mm, определена опитно

Образец №	t mm	Широчина mm	d mm	d_o mm	e_1 mm	p_1 mm	Шайба	$F_{b,test,2,5}$ kN
Д1	2,45	55	8	9	18	35	със	17,415
Д2	2,46	55	8	9	18	35		17,38
Д3	2,46	55	8	9	18	35		17,335
Д4	2,45	55	8	9	18	35	без	14,865
Д5	2,465	55	8	9	18	35		14,78
Д6	2,46	55	8	9	18	35		14,725

4. Изводи

От текущото изследване за носимоспособността на едносрезни болтови съединения на листове от стомана DC01, изпълнени чрез два болта М8, клас 8.8, могат да бъдат направени следните изводи:

а) поставянето на шайби под главите на болтовете и под гайките повишава носимоспособността на едносрезните болтови съединения. При експериментално

определените стойности се наблюдава нарастване на носимоспособността на смачкване с повече от 20 %;

б) при численото моделиране на болтовото съединение също се наблюдава повишаване на носимоспособността на смачкване, когато има поставени шайби. Тук нарастването е от порядъка на 8 %, което е доста по-голямо от полученото при предишно изследване на авторите [16];

в) определените числено и по експериментален път носимоспособности на едносрезното болтово съединение са по-големи от изчислените според стандарти БДС EN 1993-1-3:2007 [3] и AISI S100-16 [5];

г) в предишно изследване на авторите [16], проведено със стомана HX420LAD и болтове M10 беше установено, че изчислената според стандарт AISI S100-16 [5] носимоспособност, когато се отчитат деформациите на отворите, е по ниска от получената според стандарт БДС EN 1993-1-3:2007 [3]. Тук, в настоящото изследване, с „меката“ стомана DC01 и по-близко разположени болтове, те на практика са еднакви.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-294/24 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. BDS EN 1993-1-8:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints. Bulgarian Institute for Standardisation, June, 2007.
2. *Zdravkov, L., Tanev, T.* Reasons for the collapse of steel silos for a wheat with 1600 m³ capacity. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 65, No. 3, pp. 206 – 216, September n. 221, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20898/j.iass.2024.006>.
3. BDS EN 1993-1-3:2007. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Bulgarian Institute for Standardisation, April, 2009.
4. EN 10130:2006. Cold-Rolled Low-Carbon Steel Flat Products for Cold Forming – Technical Delivery Conditions. European Committee for Standardization, Brussels.
5. AISI S100-16. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. 2016 Edition, American Iron and Steel Institution, 2016.
6. ANSYS® 2024 Academic Documentation. Ansys Inc., Canonsburg, PA, the USA.
7. EN ISO 4014:2000. Hexagon head bolts – Product grades A and B. European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
8. EN ISO 4032:2000. Hexagon nuts, style 1 – Product grades A and B. European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
9. EN ISO 7089:2000. Plain washers – Normal series – Product Grade A. European Committee for Standardization, Brussels, 2000.
10. BDS EN ISO 6892-1:2020. Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019). Bulgarian Institute for Standardisation, 2020.
11. ISO 9513:2012. Metallic materials – Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing. ISO/TC 164/SC 1, 2012.
12. *Kim, T., Kuwamura, H., Kim, S., Lee, Y., Cho, T.* Investigation on ultimate strength of thin-walled steel single shear bolted connections with two bolts using finite element analysis. Thin-Walled Structures, vol. 47, pp. 1191 – 1202, 2009. DOI: 10.1016/j.tws.2009.04.009.

13. Kim, T., Cho, Y. Ultimate Behavior of Single Shear Bolted Connections with Thin-Walled Aluminum Alloys (6061-T6). *Advanced Materials Research* Vols. 446 – 449, pp. 3441 – 3445, 2012. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.446-449.3441](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.446-449.3441).

14. Lim, J., Kim, T., Kim, S. Ultimate strength of single shear bolted connections with cold-formed ferritic stainless steel. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, vol. 14, No. 2, pp. 120 – 136, 2013. DOI: [10.1631/jzus.A1100316](https://doi.org/10.1631/jzus.A1100316).

15. Khalifa, A., El-Aghoury, I., Ibrahim, S. Structural Performance of Bolted Thin-Walled Steel Truss Connections with C-Channel and L-Angle Sections. // *International Journal of Research in Engineering & Management*, vol. 5, No. 2, pp. 79 – 88, 2022. DOI: [10.13140/RG.2.2.11163.75048](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11163.75048).

16. Zdravkov, L., Tanev, T., Dinev, D. Effect of the washers on the bearing resistance of the bolted connections. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1323, 012007, 2024. DOI: [10.1088/1757-899X/1323/1/012007](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1323/1/012007).

EFFECT OF THE WASHERS ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF SINGLE-SHEAR BOLTED CONNECTIONS

L. Zdravkov¹, V. Tanev², D. Dinev³

Keywords: *single-shear bolted connection, washers, laboratory testing, bearing capacity, nonlinear analysis*

ABSTRACT

Bolted connections are the most common method for joining thin-walled galvanized sheets at the site. For this purpose, small-diameter bolts (M8, M10 or M12) and the corresponding nuts are used. According to the standard BDS EN 1993-1-8, only for single-shear joints with one row of bolts, washers should be provided both under the bolt heads and under the nuts. That is, for two or more rows of bolts, it is not necessary to place washers under the bolt head. In connection with a failure of thin-walled steel silos, a test of single-shear connections with two rows of bolts without washers under the nuts was carried out in the laboratory of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy (UACEG). Their load-bearing capacity turned out to be lower than the theoretically determined one. The initial explanation is that the lack of flat washers under the bolt heads leads to large rotations, and hence to reducing load-bearing capacity. To test this seemingly logical explanation, the authors conducted a series of laboratory and numerical tests on connections with two rows of bolts. The results show that the presence of washers under the bolt head and under the nut affects the load-bearing capacity of this type of connection.

¹ Lyubomir Zdravkov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

² Vatyu Tanev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tanev_fce@uacg.bg

³ Dobromir Dinev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg