

УНИВЕРСИТЕТ ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ  
Пети национален симпозиум по стоманени, дървени и комбинирани конструкции

27-28 НОЕМВРИ 2014  
27-28 NOVEMBER 2014

Fifth National Symposium on Steel, Timber and Composite Structures  
UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY

---

## ЗАВИСИМОСТ ВЪРТЯЩ МОМЕНТ-ОПЪННА СИЛА ПРИ ВИСОКОЯКОСТНИ БОЛТОВЕ

Цветан Георгиев<sup>1</sup>

*Ключови думи:* болтови съединения, въртящ момент, лабораторни тестове, високоякостни болтове, предварително налягане.

*Научна област:* стоманени конструкции

### РЕЗЮМЕ

Точното определяне на опънната сила във високоякостните болтове, използвани в болтови съединения категория *C*, е от особена важност в процеса на проектиране, реализация и контрол на отговорни стоманени конструкции. Масовото навлизане на Еврокод и стандарта EN 14399 в областта на болтовите съединения, води до промени в установената практика и до известни затруднения сред практикуващите инженери. Доклада обобщава резултатите от проведени лабораторни тестове на високоякостни болтове. Изследвана е зависимостта въртящ момент - опънна сила и са анализирани факторите, които влияят върху тази зависимост. Представени се някои изводи и обобщения, полезни за практиката.

### 1. Въведение

Развитието на съвременното строителство чрез стомана, поставя предизвикателствата пред конструкторите, породени от нуждата за проектиране на големоотворни или високи конструкции, при които приносят на динамичните ефекти на натоварването е значителен. Наред с това непрекъснатият икономически натиск от скъпото строително време при монтажни работи стимулират все по-масовото прилагане на фриксионни болтови съединения. С навлизането на Еврокод, тези съединения са дефинирани като болтови съединения категория *C* и в частност категория *B*. Съществено изискване при изпълнение на такива болтови съединения е достоверното определяне на опънната сила в болта, а най-често това определяне се извършва чрез косвени методи за контрол на въртящия момент. В този смисъл, точното определяне на опъна в болта зависи от точното определяне на зависимостта

---

<sup>1</sup> Цветан Георгиев, доц. д-р инж., катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, София 1046, ул. Христо Смирненски 1, e-mail: cvgeorgiev\_fce@uacg.bg

между опънна сила и приложения въртящ момент. Този проблем не е нов за строителната практика у нас. Той до сега бе решаван, чрез прилагане на общоприети стойности за въртящите моменти. С прилагането на европейските стандарти такава практика не се препоръчва, а се изисква диференциран подход насочен към избрания производител на болтовете.

## 2. Механика на поведението на болта при натягане

Натрупаният експериментален и теоретичен опит при работа с болтове показват, че обикновено съществува линейна зависимост между приложения въртящ момент  $T$  и създадената опънна сила  $F_p$  в стеблото на болта (Bickford, 2008) [1].

Такава зависимост може да бъде представена във вида:

$$T = C \cdot F_p \quad (1)$$

В техническата литература се срещат множество изрази, които дефинират константата  $C$ . Една възможност е дадена чрез формула (2) предложена от Motosh (1976) [2, 3], където:

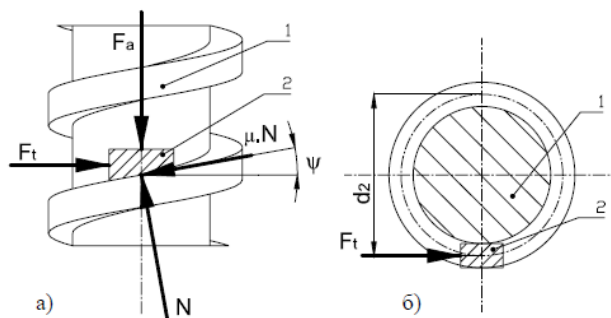
$$T = \left( \frac{\psi}{2\pi} + \frac{\mu_t \cdot r_t}{\cos \beta} + \mu_n \cdot r_n \right) \cdot F_p \quad (2)$$

$T$  е приложеният въртящ момент с цел натягане на болта;  $F_p$  – опънната сила в стеблото на болта в следствие от натягането;  $\psi$  – ъгълът на изкачване на резбата;  $\mu_t$  – коефициент на триене между резбите на болта и гайката;  $r_t$  – ефективен контактен радиус на резбите;  $\beta$  – половината от ъгъла на профила на резбата;  $\mu_n$  – коефициент на триене между повърхностите на гайката и повърхността на прикрепения елемент;  $r_n$  – ефективен контактен радиус на гайката и прикрепения елемент.

От израз (2) е видно, че взаимовръзката между въртящ момент и опънна сила зависи от наклона на резбата, съпротивлението от контактното триене между резбите на болта и гайката и от съпротивлението на триенето между гайката и прикрепения елемент. Както е известно, коефициентите на триене при стоманите зависят от твърде много фактори и е много трудно да бъдат определени теоретично. Според (Bickford, 2008) няколко десетки различни параметъра влияят само върху коефициента на триене. Това биха могли да бъдат твърдостта на стоманите, степента на гладкост на триещите се повърхности, вида на резбата, скоростта на натягането, степента на пасване на резбите, наличие или отсъствие на шайби и др. За целите на настоящото изследване е полезно факторите, които влияят върху зависимостта въртящ момент – опънна сила да бъдат обобщени в следните три групи:

- *геометрия* - в тази група обобщаваме геометрията на болта и гайката, производствените толеранси, монтажната точност и съосност на болт с отворите, наличието на перпендикулярност между болта и повърхността на съединяваните елементи и др.;
- *триене* – в тази група обобщаваме факторите обуславящи самото триене между повърхностите, наличие или липса на смазка, поцинковане и вид на поцинковането, замърсители и др.;

- *технология* – в тази група обобщаваме фактори, като субективната роля на монтажника, прецизността на динамометричния ключ, неизбежната релаксация в съединението породена от неплътност на контактните повърхнини и др.



**Фиг. 1.** Опростен силов модел на болт в състояние на натягане. 1 - болт, 2 - гайка;  
а) изглед; б) разрез

Опростена интерпретация на силите, действащи при натягане на болтове е показана на фигура 1. Силата  $F_t$  приложена с рамо  $d_2$  (условния среден диаметър на нарязаната част на стеблото) представлява въртящия момент  $T$ . Силата  $F_a$  представлява опънатата сила в стеблото на болта, породена от натягането.  $N$  е обобщен контактен натиск между резбите на гайката и болта и между главата на болта и елемента, а  $\mu$  е обобщен коефициент на триене.

От казаното до тук, можем да обобщим, че въпреки очакваната линейна зависимост (1), стойността на константата  $C$  зависи от множество и разнообразни по произход фактори, върху които проектанта няма пълен контрол.

### 3. Каква бе практиката до сега у нас и какво изискват европейските стандарти

Авторът няма личен професионален опит от целия период в който се проектират и строят стоманени конструкции в България. Под практика „до сега“ ще разбираме периода, преди въвеждането на европейските норми в страната, но след 1990 година. Този период в областта на стоманените конструкции никак не е кратък, той е твърде динамичен и характеризира с промяна на практиките, внос на инженерни решения от Европа и постепенна смяна на поколенията инженери. Ползването на фрикционни съединения и предписаните към тях въртящи (натягащи) моменти най-често става по общоприети стойности зависещи от диаметъра на болта и вида на покритието (поцинковани или оксидирани). Тук очевидно влиянието на DIN е най-силно, тъй като в практиката масово бе възприето ползване на стойностите препоръчани от немския стандарт [10]. Наред с това динамиката на развитието на пазарното стопанство позволи на строителния пазар да се появят болтове произвеждани в Европа, Азия и Америка. Самите болтове с европейски сертификати най-често имат азиатски

производствен произход. Това разнообразие от потенциални доставчици предполага ползваните болтове да са произведени от заводи въввели различни производствени практики и следващи различни системи за контрол.

Европейският стандарт, който регламентира високоякостните болтове ползвани за фрикционни съединения е EN 14399 [9], а практиките за прилагане и контрол на фрикционни съединения се регламентират от EN 1090-2 [8]. Според Цанков (2011) [4], характерното за европейската нормативна база е, че тя регламентира четири метода за контрол на опънното усилие в болта. Това са методът на въртящия момент, комбиниран метод, HRC метод и метод с използване на индикатори за чист опън (DTI). Първите два метода се осланят на взаимовръзката между въртящ момент и опънно усилие и ъгъл на завъртане на гайката и опънно усилие, а последните два метода изискват ползване на специални модели болтове или индикаторни шайби. Редно е да отбележим, че европейските стандарти никъде не предписват директна стойност на въртящия (натягащ) момент, а препоръчват определянето на т.н. *k*-класове, чрез които се регламентира зависимостта въртящ момент – опънно усилие в болта. Тази зависимост е дадена чрез израза (3).

$$M_r = k \cdot D \cdot F_{p,C}, \quad (3)$$

където:

$M_r$  - въртящ (натягащ) момент за болта, измерва се чрез динамометричен ключ, N.m;

$k$  - *k*-фактор, в зависимост от точността на определянето му бива  $k_2$ ,  $k_1$  и  $k_0$ ;

$D$  - диаметър на ненарязаната част на стеблото на болта в милиметри;

$F_{p,C}$  - опънното усилие в болта, kN;

Въведените чрез европейските норми *k*-фактори, биват 3 вида в зависимост от точността на тяхното определяне. Най-прецизен е  $k_2$  факторът и той следва да се определи от завода производител и да се опише в сертификата на съответната партида или да се определи чрез тестове от специализирана лаборатория. Това изискване обаче не е задължително, то трябва да се вмени чрез проекта. Факторът  $k_1$  е с по-ниска степен на точност, а факторът  $k_0$  е общоприета, но не дотам надеждна стойност. За ползване на методът на въртящия момент (който е най-масовият метод ползван у нас) се изисква работа само с  $k_2$  фактор, а за работа с комбинирания метод е позволено са се работи и с  $k_1$  фактор.

Логичен е въпросът, защо европейските норми въвеждат толкова комплициран подход? Не може ли просто са се предпишат стандартни стойности на въртящите моменти и да се улесни процесът на проектиране и контрол. За съжаление, такова централизирано решение би било неточно и неправилно. Както бе разяснено в точка 2., зависимостта между въртящ момент и опънно усилие в тялото на болта зависи от редица и разнообразни по своя произход фактори. Наред с това, като се отчете, че европейските норми са валидни за територия, където има различни производствени практики, традиции и наследство от националната нормативна база и като добавим сериозната разлика в манталитета на европейците, очевидно няма как да се подходи централизирано и общовалидно. Това налага да се вмени отговорност на проектанта за всеки конкретен проект да предпише въртящите моменти, а те зависят от избора на конкретния болт. От тук идва и голямата разлика с практиката в недалечното минало, което може да бъде поредният източник на „еврокод скептецизъм“ у нас. Без обаче да изпадаме в ролята на адвокати на Еврокод, следва да подчертаем, че сигурността на строителните конструкции и надеждността на

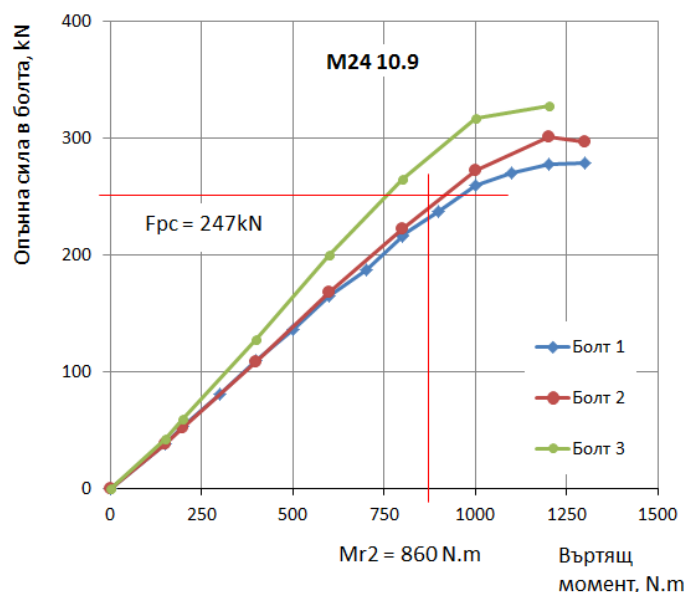
прилаганите технологии, именно в Еврокод са изведени на едно ново качествено ниво, което е наложило по-усложнен подход при работа с предварително напрегнати болтови съединения. Уместно е да добавим и че практиката в Северна Америка е подобна на европейската.

#### 4. Лабораторни тестове и резултати

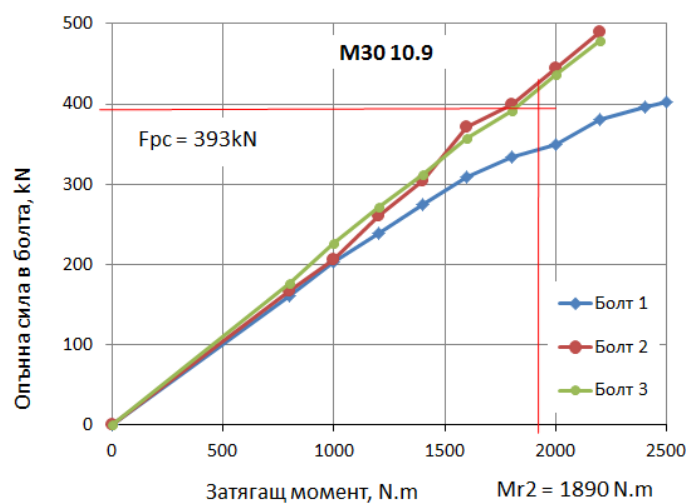
За да се приложат високоякостни болтове във фрикционни съединения за няколко реални строежа, в Лабораторията по стоманени конструкции на УАСГ през периода 2012 и 2013 година, бяха извършени редица тестове [5,6,7]. Авторът имаше възможност да участва в съставянето на заданието и съответната програмата за тези тестове. Обект на изпитване бяха високоякостни болтове M24 и M30 клас 10.9 съгласно EN 14399-4, произведени от различни производители. За изпитването е разработена и изпълнена експериментална постановка, на която главата на изпитвания болт се закрепва неподвижно и между нея и гайката се нанася силоизмерител (месдоза). Под гайката и главата на болта се поставят шайби. Изпитването се извършва чрез въртене на гайката посредством динамометричен ключ. Вида на опитната постановка и фотос от експеримента са показани на фигура 2.



Фиг. 2. Опитна постановка – ляво, Изпитвани болтове - дясно.

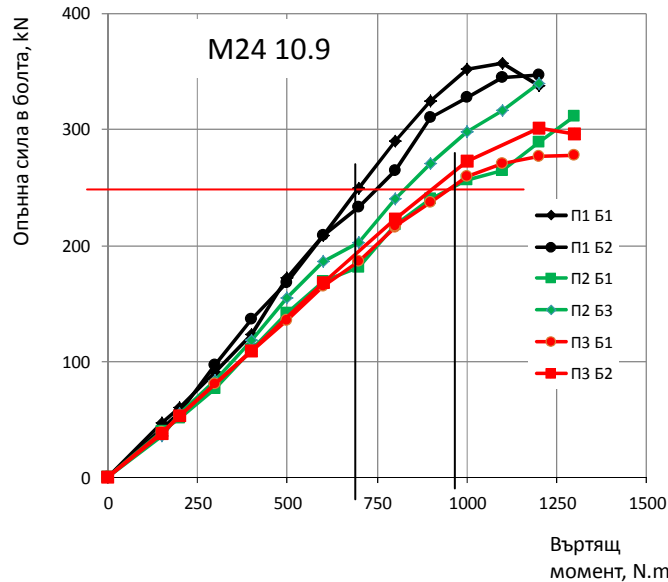


Фиг. 3. Експериментално получена зависимост Опънна сила – Въртящ момент за болтове М24.



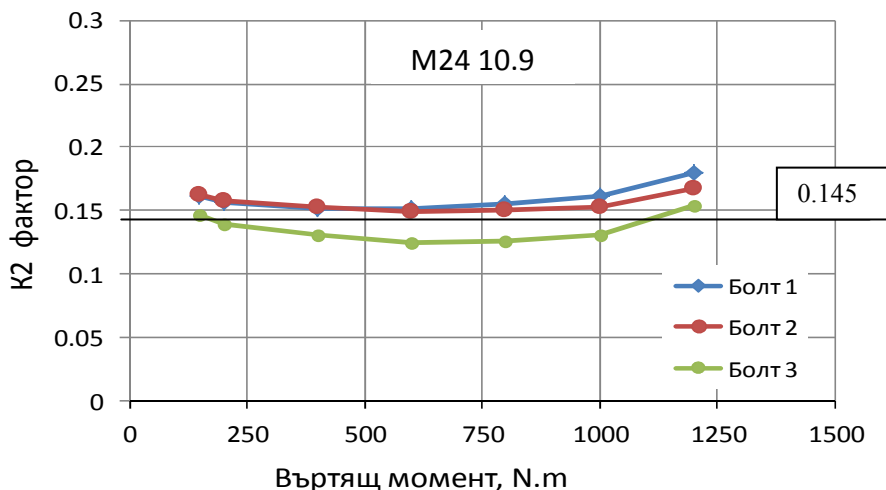
Фиг. 4. Експериментално получена зависимост Опънна сила – Въртящ момент за болтове М30.

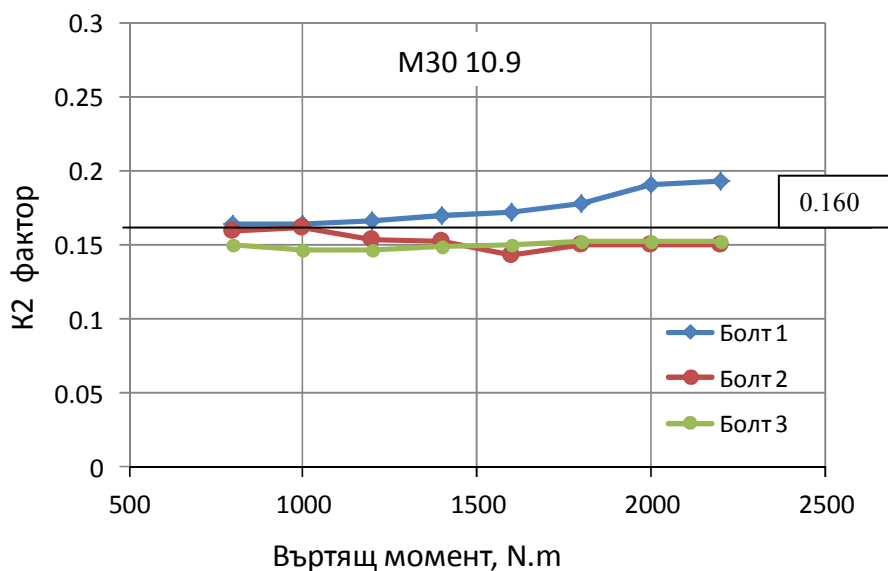
Получените експериментални резултати бяха обобщени и анализирани с цел да се даде физическа интерпретация на теоретичната постановка разгледана в точка 2 и да се анализира разсейването на резултатите между различните експериментални образци в зависимост от диаметъра на болта, производителя и др. На фигури 3 и 4 са показани експериментално получени зависимости между въртящ момент и опънна сила, а с червените линии са показани какви биха били средните стойности на въртящия момент и опънната сила, определени чрез  $k_2$  факторите, получени от същия тест.



**Фиг. 5.** Зависимост Опънна сила – Въртящ момент за болтове M24, получена при изследване на болтове произведени от 3 различни производителя, условно наречени П1, П2 и П3.

На фигура 5 е показана зависимостта въртящ момент – опънна сила при три серии болтове, произведени от три различни европейски производителя. Както ясно се вижда от графиката, зависимостта е линейна в почти целия диапазон на въртящите моменти, но се наблюдава разлика в резултатите между болтовете на отделните производители. Въртящите моменти отговарящи на силата  $F_{p,c} = 247\text{kN}$  варират от 700Nm при първия производител до 970Nm при третия производител. Очевидно няма как да се постигне надеждно налягане на болтовете, ако се работи с предварително набелязана стойност на  $K$ .

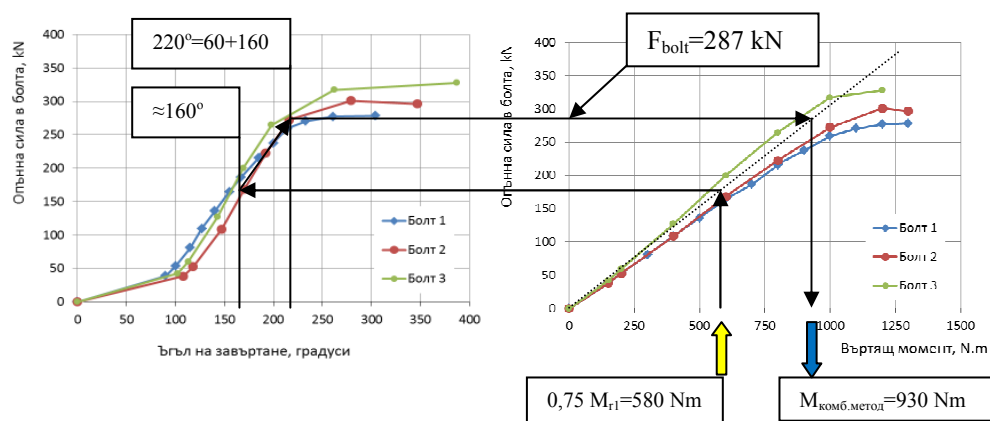




Фиг. 6. Промяна на  $K_2$  фактора при промяна на въртящия момент

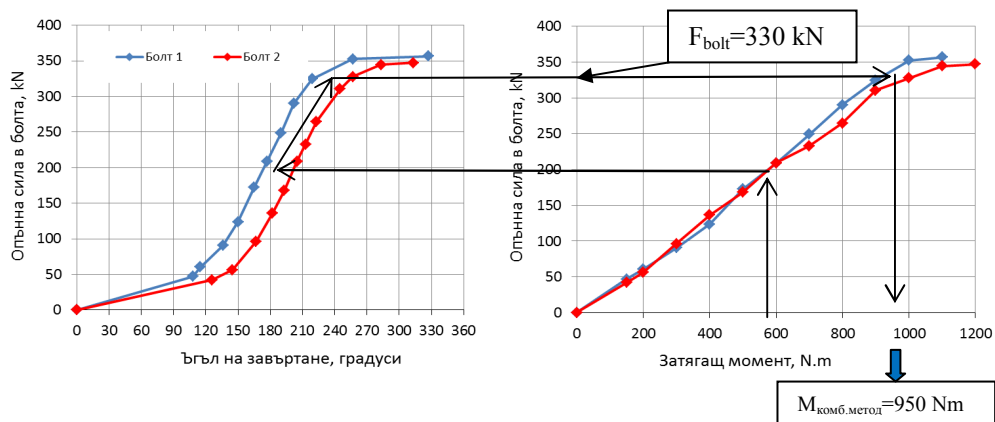
Анализът на фигура 6 показана, че  $K_2$  фактора остава почти непроменен при различните въртящи моменти, но все пак някакви малки отклонения в стойностите се забелязват. От проведените тестове, съгласно предписанията на Annex H от EN 1090-2:2008, определените  $K_2$  фактори са съответно 0.145 за болтове M24 и 0.160 за болтове M30, което съвпада с условни средни стойности показани на фигура 6.

Друга важна зависимост, която бе предмет на изследване е връзката между ъгъла на завъртане на гайката и опънната сила в болта. Такива зависимости са показани на фигура 7 ляво и фигура 8 ляво. Разликата между двете фигури е в това, че са ползвани болтове от различни производители.



Фиг. 7. Зависимости ъгъл на завъртане-опънна сила и онагледяване на механизъмът на работа на комбинация метод, Производител 1.





**Фиг. 8.** Зависимости ъгъл на завъртане-опънна сила и онагледяване на механизъмът на работа на комбинирания метод, Производител 2.

Кривите, които изразяват зависимостта между ъгъла на завъртане на гайката и опънната сила в болта имат нелинеен характер. В тези криви могат да бъдат разчетени три характерни клона. Това са началният клон в който се „обират“ луфтовете в съединението, следва среден работен клон при който зависимостта е линейна и крайният клон в който отново се поражда нелинейност. Крайният клон вероятно е така силно нелинеен, поради силното триене между болта и гайката и началото на пластични деформации в тялото на болта. Най-съществен е средният клон, който не случайно наричаме работен клон и който е в основата на прилагането на комбинирания метод. На фигури 7 и 8, чрез показаните стрелки се онагледява как всъщност работи комбинираният метод. Съгласно препоръката на [8], следва да натегнем болта чрез въртящ момент  $0,75 \cdot M_{r,0} = 0,13 \cdot D \cdot F_{p,c}$ . След което чрез гаечен ключ следва да направим 1/6 оборот. Като използваме комбинираната графика показана на фигура 7 и проследим стрелките, установяваме че сме достигнали до опънна сила  $287kN$ , която би се получила от въртящ момент  $930N.m$ . Тази опънна сила е с 16% повече от теоретично определената  $F_{p,c} = 247kN$ . В техническата литература често споменаван факт е, че комбинирания метод дава по-висок резултат на налягане с около 10-15 %, което се потвърждава и от този тест. Приблизителността на този метод се изразява в приемането, че  $K$  фактора има стойност  $0,13$  и от това, че предписание 1/6 оборот е толкова кръгъл за да може лесно да се измерва на строежа. Ползването на комбинирания метод без предварителна оценка на  $K_2$  фактора крие и своите рискове. Когато реалният  $K_2$  фактор е по-нисък от приетата стойност  $0,13$  може да се достигне до преналягане т.е чрез навиването да получим пластифициране в тялото на болта или резбата. Случаят показан на фигура 8 е точно такъв. Реалният  $K_2$  фактор има стойност  $0,121$ . Когато подходим към налягане на болтовете, без конкретно да е установена стойността  $K_2$ , както е показано на случая от фигура 8, се достига до опънна сила от  $330kN$ , която вече е с 33% повече от теоретично определената  $F_{p,c} = 247kN$ . Вероятно това ще доведе до пластифициране, което е видно и от дясната графика на фигура 8. Препоръката на автора е винаги да се получават  $K_2$  факторите, да се построят комбинираните графики от типа на тези от фигура 7 и 8 и проектантът сам да установи до колко допълнителни градуса да навие

гайката. В случая на фигура 8, препоръката би била да се направи 1/8 оборот и тогава би се достигнало до опънна сила от 300kN.

## 5. Заключение

От проведените тестове на високоякостни болтове могат да бъдат изведени следните заключения. При предписване на налягане на болтове, ползването на готови данни за въртящи моменти не е допустимо, тъй като това крие редица неизвестни. Болтовете могат да останат недонапрегнати или пренапрегнати. Анализирани в статията болтове, показват резултати за  $K_2$  фактора при различните производители съответно 0,136; 0,121; 0,145 за болтове M24 10.9 и 0,133; 0,121; 0,160 за болтове M30 10.9. Вариациите в резултатите при болтовете M24 са 20%, а при болтове M30 32%.

$K_2$  факторът се изменя незначително при различните стойности на въртящия момент.

Вариациите на  $K_2$  фактора и при болтове от един и същ производител могат да възлезнат до 40%, затова при провеждането на тестове е препоръчително работа с по-голям брой болтове, които да бъдат взети от различни пакети. При провеждане на тестове е препоръчително да се вземат данни и за ъгъла на завъртане, което дава възможност проектанта да изведе комбинирани криви. Това дава възможност успешно да се ползва комбинирания метод, който в определени случаи с липса на достъп е единственото възможно средство за налягане. При наличие на данни за ъгъла на завъртане, като функция от опънната сила, проектантът може да прецизира комбинирания метод и да предпише ъгъл за допълнително завъртане на гайката, както е необходимо. По този начин точността на комбинирания метод би била същата, както и при метода на въртящия момент, а производителността на труда при монтаж, много по-висока.

Работата с предварително напрегнати болтове в болтови съединения категории „B“ и „C“ предполага в проекта да се заложат индикативни стойности на въртящите моменти с ясно подчертана уговорка, че тези стойности се прецизират след избор на конкретните болтове. Данните за  $K_2$  факторите се изискват от Производителите или при невъзможност се поучават чрез тестове.

## Благодарности

Авторът изказва своята благодарност на инж. Огнян Ганчев, ръководител на лабораторията по стоманени конструкции към УАСГ за реализираната опитна постановка и професионално проведените тестове. По скромното мнение на автора, такива тестове се реализираха за първи в страната и именно те биха дали убедителна информация, знания и кураж на множество проектантите при прилагането на напрегнати високоякостни болтове за трикционни съединения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Bickford J.H.*, “Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints”, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2008.
2. *Motosh, N.*, “Development of Design Charts for Bolts Preloaded up to the Plastic Range”, J. of Engng. for Ind., **98**, 3, 858-861 (1976).

3. *Melenciuc S., Venghiac V., Ștefancu A. and Budescu M.*, “Factors Influencing the Preload Level of High Strength Bolts for Structural Steel Connections”. Buletinul Institutului politehnic din Iași, Tomul LVII (LXI), Fasc. 1, 2011.
  4. *Цанков М.*, „Изпълнение на стоманени строителни конструкции съгласно еврокод“. КИИП, 2011.
  5. *Ганчев О.*, „Протокол за определяне на “k-factor” на болтове Nedloy и VSP M24 и M30, клас 10.9, предназначени за фрикционни съединения“. ЦНИП при УАСГ, Октомври 2012.
  6. *Ганчев О.*, „Протокол за определяне на “k-factor” на болтове Friedberg M24 и M30, клас 10.9, предназначени за фрикционни съединения“. ЦНИП при УАСГ, Декември 2012.
  7. *Ганчев О.*, „Протокол за определяне на зависимостта на опънна сила – затягащ момент за болтове Friedberg M24, клас 10.9, предназначени за обект София Саут Ринг Мол, подобект северен скайлайт“. ЦНИП при УАСГ, Октомври 2013.
  8. *CEN/TC 135*, БДС EN 1090-2:2008+A1:2011, “ Изпълнение на стоманени конструкции и конструкции от алуминиеви сплави. Част 2: Технически изисквания за стоманени конструкции” , 2011.
  9. *CEN/TC 185*, БДС EN 14399:2006, “Високоякостни болтови съединения за строителството с предварително налягане“. 2006.
  10. *DIN 18800-7:2008-11*, „Steel structures - Part 7: Execution and constructor's qualification.“, 2008.
-

# RELATION TORQUE MOMENT – TENSION FORCE IN HIGH STRENGTH BOLTS

Tzv. Georgiev<sup>2</sup>

**Keywords:** bolted connections, torque moment, laboratory tests, high strength bolts, bolt preloading

**Research area:** steel structures

## ABSTRACT

The precise calibration of the bolt tension force in bolted connections category *C* is of high importance for the safety and reliable design, execution and operating of the steel structures. The application of Eurocode 3 (EN 1993-1-8) and EN 14399 for bolt connection design leads to change of the already established design procedures and practices, hence creating some difficulties among the practitioners. The current report summarizes some results of high strength bolts lab tests that have been performed. The relation between the torque moment and the bolt tension force has been investigated and the influencing factors are analyzed. Some conclusions are derived and some recommendations for practitioners are formulated.

---

<sup>2</sup> Tzvetan Georgiev, Dr. Eng., associate professor in department of „Steel and Timber Structures“, UACEG, Sofia 1046, 1 Hristo Smirnenski bulv., e-mail: cvgeorgiev\_fce@uacg.bg