

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ТРИЕНЕ ЗА ФРИКЦИОННИ БОЛТОВИ СЪЕДИНЕНИЯ

Цветан Георгиев<sup>1</sup>

*УАСГ, Строителен факултет, катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“*

## TEST DETERMINATION OF SLIP FACTOR FOR SLIP RESISTANT BOLTED CONNECTIONS

Tzvetan Georgiev

*University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, department of Steel and Timber structures*

### **Abstract:**

The accurate and reliable determination of the slip factor is the basis for safety in the design and construction of high strength slip resistant bolted connections. Changing the regulatory framework, evolution of the construction practices and new materials in the steel construction sector require updating of knowledge regarding these bolted connections. The paper presents experimental results of testing experimental program devoted to the determination of the slip factor for bolted connections category C as per EN 1993-1-8. Different techniques of surface preparation and coating have been tested. Obtained experimental results are reported and factors, which affect the coefficient of friction has been analyzed. Some findings and conclusions are given as well relevant design recommendations..

**Key words:** *slip factor, high strength friction bolted connections, test results*

### **1. Въведение**

Използването на болтови фрикционни съединения е широко разпространено в проектирането и строителството на стоманени и комбинирани мостове или в конструкции подложени на циклични натоварвания. Този вид съединения са добре познати и прилагани у нас. Съгласно [1], болтови съединения, които пренасят срязващи сили са класифицирани като категория „С“ или „В“ в зависимост от това дали критерии за тяхната работа чрез триене е крайно или експлоатационно

---

<sup>1</sup> Цветан Георгиев, доцент д-р инж. / катедра Метални, дървени и пластмасови конструкции, УАСГ, София, бул. Хр. Смирненски 1, cvgeorgiev\_fce@uacg.bg

гранично състояние. С навлизането на Еврокод, поради изискванията на [2], тези категории болтови съединения трябва да се ползват и в съединенията на дисипативните елементи, част от системите са поемане на сеизмичните сили. Наред с това, фрикционни болтови съединения в съчетание с ползване на уголемени или овални отвори, както е изяснено в [3], предлаган много добро съчетание между либерализирани критерии за производство, улеснен монтаж и възможност за игнориране на ефектите от неработни деформации. Всичко това в съчетание със значителния напредък в областта на производството на високоякостни болтове и развитието на строителната химия, предполага все по-масовото използване на болтови съединения работещи чрез триене в типове конструкции извън традиционните.

Съществен момент в сигурността на болтови съединения работещи на триене е постигането на проектния контактен натиск и проектния коефициент на триене. Докато при определянето на контактният натиск разполагаме с преки или косвени методи за контрол [4], то при определянето на коефициента на триене се осланимае основно на фирмени технически спецификации за ползваните консервиращи покрития (които тук ще наричаме фрикционни грундове) и спазване на технологичните предписания при почистване и консервиране на контактите триещи се повърхнини.

Въпреки, че на строителния пазар има достатъчно фирмени продукти, предназначени за консервация на контактите повърхнини във фрикционните съединения и за които производителите предоставят данни за постигания коефициент на триене в [5] е дадена процедура за експериментално доказване на този коефициент. По този начин може да се контролира фирмената техническа спецификация и да се провери дали коректно се прилага технологичната последователност на почистване и консервиране на повърхнините. Не на последно място интерес представлява и въпроса, как евентуална грешка в технологията на консервиране се отразява на коефициента на триене.

В търсене на отговор на поставените въпроси и за целите на извършван контрол върху реализацията на голям индустриален проект със стоманени конструкции, в периода 2012 – 2013 година в УНИЛ по Метални конструкции на УАСГ, бяха проведени редица тестове за определяне на коефициенти на триене, резултатите от които са обобщени в настоящия доклад.

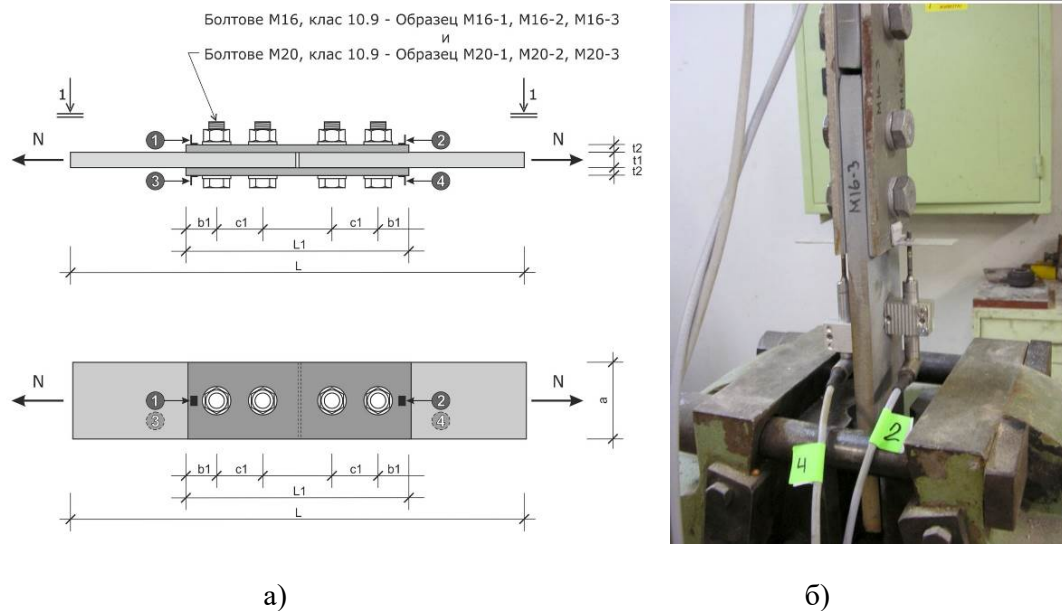
## **2. Описание на експерименталната постановка**

Ползваната експериментална постановка е изцяло продиктувана от препоръките и изискванията на [5]. Тестовете са проведени в УНИЛ<sup>2</sup> по МК на УАСГ.

Изпитването се извършва чрез универсална изпитвателна машина тип УММ-50 с обхват на натоварване 50 t. Елементите за пробните образци са доставени в лабораторията, като от времето на налягане до времето на изпитване са изминали около 15 денонощия. Образците се товарят на опън със сила, която се увеличава плавно. Стойността на силата се измерва чрез датчик, свързан към машината за изпитване. От двете страни на изпитвания образец, по надлъжната ос, се монтират датчици за преместване с обхват 0-10 mm. Чрез тях се измерва взаимното приплъзване на стоманените плочи (Датчик 1, 2, 3, 4, фигура 1) [6,7].

---

<sup>2</sup> УНИЛ по МК е съкращение на Университетска научно-изследователска лаборатория към катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“ на Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия, София.



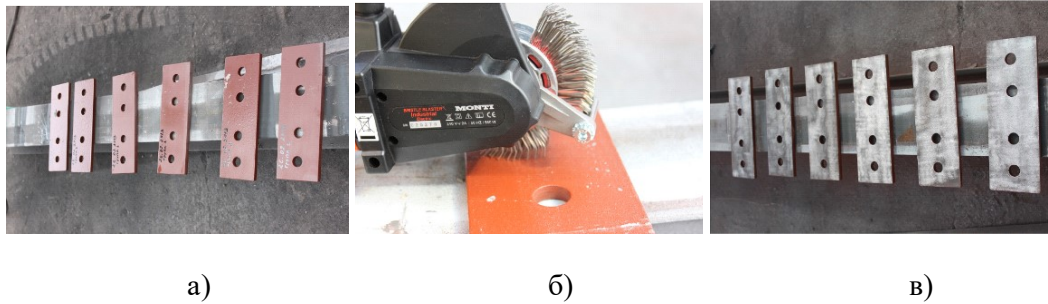
**Фиг. 1.** Опитна постановка:

а) схема на образците и датчиците; б) фотография от провеждане на тестовете, източник [6]

### 3. Групи серии от експериментални тестове и експериментални образци

Съгласно създадената програма, бяха предвидени две групи тестове условно наречени група 1 и група 2. При група 1 бяха проведени две серии от по три експериментални образци, първите три от които с болтове клас M16-10.9 (серия 1-1) и вторите три с M20-10.9 (серия 1-2). Повърхностите на образците бяха почистени с дробеструйна машина до степен Sa 2½, средна грапавост (G) според ISO 8503-1. Целта на тестове от серии 1-1 и 1-2 бе да се определи стойността на коефициента на триене и да провери дали има корелация между диаметъра на напрегнатите болтове и получавания коефициент на триене. Всички експериментални образци от група 1 бяха произведени по една и съща технология.

Експериментална група 2 се състои от 9 теста, разпределени в три серии по три стандартни образца, съответно 2-1, 2-2 и 2-3. При всичките 9 експериментални образци, бяха ползвани болтове M20-10.9, произведени от един и същ производител. Целта на група тестове 2 бе да се изследва в каква степен технологичната последователност на подготовка на повърхнините влияе върху коефициента на триене. За целта образците от серия 2-1 бяха почистени с дробеструйна машина до степен Sa 2½ и след това грундиращи с антикорозионен грунд. След което грунда се почиства посредством механична телена четка Bristle Blaster (фигура 2, а) отново до степен Sa 2½ и средна грапавост (G) според ISO 8503-1. Следва полагане на фрикционен грунд с номинална дебелина на слоя до 80 микрона върху контактните повърхности. Замисълът на серия 2-1 бе да се симулира грешка в завода производител по отношение на обработката на фрикционните повърхности и последвало прилагане на ремонтна технология. Такъв проблем бе реално провокиран от практическа ситуация и установяване на ефективността на ремонтната технология представлява интерес както от теоретична така и от приложна гледна точка.



**Фиг. 2.** Обработка на образците от серия 2-1:

- а) полагагане на антикорозионен грунд; б) почистване с механична телена четка; в) почистване преди полагагане на фрикционен грунд;

Образците от серия 2-2 бяха почиствени с дробеструйна машина до степен Sa 2 ½ и средна грапавост (G) според ISO 8503-1. След почистването, образците са сглобени в проектно положение. Контактните повърхности остават без нанесено върху тях покритие (фигура 3). Замисълът на серия 2-2 бе да се определи коефициент на триене, върху който влияе само степента на почистване.

Образците от серия 2-3 бяха почиствени с дробеструйна машина до степен Sa 2½ и средна грапавост (G) според ISO 8503-1. След почистването, върху образците се нанася консервиращо покритие (фрикционен еднокомпонентен метализиращ грунд на цинкова основа) с номинална дебелина на слоя до 80 микрона. Замисълът на серия 2-3 бе да се определи коефициент на триене, при спазване на предписанията на производителя на фрикционния грунд.



**Фиг. 3.** Образците от серии 2-1, 2-2 и 2-3

#### 4. Експериментални резултати и методология на тяхната обработка

Като пряк резултат от експеримента се получава силата на приплъзване  $F_s$  [kN]. Тя се отчита през цялото време на теста, чрез индуктивен датчик, свързан към измерителния механизъм на изпитвателната машина и записваща система управлявана софтуерно. Стойността, която се отчита съответства на регистрирано приплъзване 0,15мм между точки 1-2 или 3-4 (фигура 1).

За определяне на контактния натиск в съединението е изходено от опънната сила в напрегнатите болтове. В тестовите на експерименталните образци от група 2, опънната сила в е определена чрез пряко измерване, така както е пояснено в [4]. За тестовите от група 1 е изходено от натрупания експериментален опит и е приета стойност 0,16 за K<sub>2</sub>-класовете на болтовете M16 и M20. Стойността на натягащия момент M<sub>r,2</sub> се измерва посредством тариран динамометричен ключ и като се изходи от формула (3.1) се достига до опънната сила в болта F<sub>p,c</sub>.

$$(3.1) \quad F_{p,c} = \frac{M_{r,2}}{d.k_2}, \text{ където } d \text{ е диаметъра на болта}$$

Прието е че опънната сила във всички болтове от експерименталните образци е една и съща, тъй като са натягани с един и същ момент. Осреднената стойност на коефициента на триене μ<sub>m</sub> се получава по формули (3.2 и 3.3). Резултатите от проведените експерименти са обобщени в таблици 1,2 и 4.

$$(3.2) \quad \mu_i = \frac{F_{S,i}}{4.F_{p,c}}, \mu_i - \text{коефициент на триене получен от теста на } i - \text{тия образец;}$$

$$(3.3) \quad \mu_m = \frac{\sum \mu_i}{n}, \mu_m - \text{осреднен коефициент на триене за съответната експериментална серия;}$$

**Таблица 1. Резултати от серия 1-1**

| Образец /<br>диаметър на<br>болта | Сила на приплъзване F <sub>S,i</sub> [kN]       | Коефициент на триене<br>μ <sub>i</sub>        |
|-----------------------------------|---|---|
| Образец 1 / M16                   | 203.8   | 0.466   |
| Образец 2 / M16                   | 214.3   | 0.490   |
| Образец 3 / M16                   | 196.9   | 0.450   |
| брой образци<br>n=3               | Средна сила на приплъзване<br><b>205.0 [kN]</b> | осреднен коефициент на<br>триене <b>0.469</b> |
| Стандартно<br>отклонение S        | 8.4832  | 0,0201  |

**Таблица 2. Резултати от серия 1-2**

| Образец /<br>диаметър на<br>болта | Сила на приплъзване<br>[kN]                     | F <sub>Si</sub> | Коефициент на триене<br>μ <sub>i</sub> = F <sub>Si</sub> / (4* F <sub>p,c</sub> ) |
|-----------------------------------|---|-----------------|---|
| Образец 1 / M20                   | 237.6   |                 | 0.345   |
| Образец 2 / M20                   | 283.4   |                 | 0.412   |
| Образец 3 / M20                   | 316.9   |                 | 0.461   |
| брой образци<br>n=3               | Средна сила на приплъзване<br><b>279.3 [kN]</b> |                 | осреднен коефициент на<br>триене <b>0.406</b>                                     |
| Стандартно<br>отклонение S        | 37.331  |                 | 0,0582  |

**Таблица 3.** Резултати от серии 2-1, 2-2 и 2-3

| Серия / Образец |             | Сила на приплъзване<br>$F_{Si}$ [kN] | Коефициент на триене<br>$\mu_i$ |
|-----------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Серия 2-1       | Образец 1-1 | 262.3                                | 0.407                           |
|                 | Образец 1-2 | 270.3                                | 0.420                           |
|                 | Образец 1-3 | 265.0                                | 0.411                           |
| Серия 2-2       | Образец 2-1 | 283.5                                | 0.440                           |
|                 | Образец 2-2 | 335.6                                | 0.521                           |
|                 | Образец 2-3 | 342.5                                | 0.532                           |
| Серия 2-3       | Образец 3-1 | 305.0                                | 0.474                           |
|                 | Образец 3-2 | 326.9                                | 0.508                           |
|                 | Образец 3-3 | 306.9                                | 0.476                           |

**Таблица 4.** Определяне на средните стойности на силата на приплъзване и коефициент на триене

| Серия     | Средна сила на приплъзване $F_{Sm}$ [kN] | Осреднен коефициент на триене $\mu_m$ | Коефициент на вариация (V%) |
|-----------|--|---------------------------------------|-----------------------------|
| Серия 2-1 | 265.9                                    | 0.413                                 | 1.50                        |
| Серия 2-2 | 320.5                                    | 0.498                                 | 9.90                        |
| Серия 2-3 | 312.9                                    | 0.486                                 | 3.95                        |

### 5. Изводи и заключения

Проведените групи и серии тестове се основават на по три образца в серия. Това не позволява напълно да се осланяме на препоръките на [5] за обработка на резултатите от теста и за получаване на характеристична стойност на коефициента на триене. Въпреки това могат да се забележат някои ясни зависимости. Така например, група тестове 1 обхваща експериментални серии 1-1 и 1-2, в които образците са произведени по една и съща технология, от един и същ производител и чрез полагане на един и същ фрикционен грунд. Въпреки това получените осреднени стойности на коефициента на триене се различават с около 15%. Това може да се обясни с факта, че контактния натиск при тези серии бе определен по косвен път, чрез използване на  $K_2$ -клас със стойност 0,16. Тъй като диаметъра на болтовете е единственият различаващ се параметър между серия 1-1 и 1-2, то авторът счита че именно от там се появява и разликата в  $K_2$ -класовете между болтове M16 и M20. Логично е да се формулира и заключението, че при фрикционни болтови съединения определянето на  $K_2$ -класовете следва да се прави за всяка партида болтове, а не да се работи с таблични стойности, каквато бе практиката у нас до сега. Подобен извод е формулиран и в [4].

Група тестове 2 бе насочена към изследване на влиянието на отделните компоненти, като почистване и грапавостта на повърхността и влиянието на положението на грунда. От обобщените резултати показани в таблица 4, може да се заключи, че най-голяма осреднена стойност на коефициента на триене се среща в

серия 2-2, тогава когато не е положен грунд. От друга страна именно в тази серия се наблюдава и най-голямата вариация на отчетените резултати. В крайна сметка, характеристичната стойност на коефициента на триене е по-нисък от този в серии 2-1 и 2-3, но не бива да се забравя, че извода се основава само на ред от 6 броя измерени стойности.

От анализа на резултатите от серия 2-1, може да се заключи, че ремонтна технология е възможна за прилагане в обектови условия, но че нейното ползване води до намаляване на коефициента на триене с около 18%.

Резултатите от група тестове 1 и 2 показват, че използването на фрикционни грундове, при стриктно спазване на технологията на почистване и полагане, може да осигурява постигането на клас повърхност на триене „В“ с препоръчителен коефициент на триене 0.40. За ползване на по-високи стойности задължително трябва да се прилага доказване чрез изпитване на представителни образци.

### **Благодарности**

Авторът изказва своята благодарност на инж. Огнян Ганчев, ръководител на УНИЛ по МК към УАСГ за реализираната опитна постановка и професионално проведените тестове.

Авторът изказва своята благодарност и на ръководството на проект „Ново Оловно Производство“ на КЦМ АД за доверието и за проявеното разбирането от провеждането на заявените тестове.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] БДС EN 1993-1-8. Еврокод 3: „Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-8: Проектиране на възли“.
- [2] БДС EN 1998-1. Еврокод 8: „Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Част 1: Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради“.
- [3] Heistermann C., M. Veljkovic , R. Simões, C. Rebelo , L. Simões da Silva, „Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes“, Journal of Constructional Steel Research 82 (2013) 223–233.
- [4] Георгиев Цв., „Зависимост въртящ момент-опънна сила при високоякостни болтове“, Пети национален симпозиум по стоманени, дървени и комбинирани конструкции, УАСГ, 27-28 Ноември, 2014.
- [5] EN 1090-2:2008 (E) , Annex G "Test to determine slip factor".
- [6] Ганчев О., „Протокол за определяне на коефициент на триене (slip factor) при изпитване на предварително напрегнати болтове M16 и M20, клас 10.9“, ЦНИП при УАСГ, Септември, 2012.
- [7] Ганчев О., „Протокол за определяне на коефициент на триене (slip factor) при изпитване на предварително напрегнати болтове Friedberg, M20, клас 10.9“, ЦНИП при УАСГ, Март, 2013.