

ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ – СОФИЯ

Първа научно-приложна конференция с международно участие
„СТОМАНОБЕТОННИ И ЗИДАНИ КОНСТРУКЦИИ – ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА“

22 – 23 октомври 2015

22 – 23 October 2015

First Scientific-Applied Conference with International Participation

“REINFORCED CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES – THEORY AND PRACTICE”

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY – SOFIA

48 ^{ТОМ}
vol.

2015

св. 12 – III
fasc.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОНТАКТНАТА ЗОНА ПРИ УСИЛВАНЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ПОДОВИ КОНСТРУКЦИИ

Ил. Маринов¹

Ключови думи: контактна зона, усилване, подови конструкции

Научна област: възстановяване и усилване на стоманобетонни конструкции

РЕЗЮМЕ

В строителната практика често се налага съществуващи подови конструкции да се усилят поради промяна в инвестиционните намерения, допуснати грешки по време на проектирането и изпълнението, промяна в стандартите и др.

Статията предлага обзор на механизмите за връзка в контактната зона, както и взаимодействието между тях. Направен е преглед и критичен анализ на нормативната база, разглеждаща тези проблеми, както и начините за моделиране на контактната зона.

Коментирани са предимствата и недостатъците на методите за моделиране и изследване, направен е анализ за възможностите за моделиране, алгоритмите и методите за решение. Описани са някои съвременни методи за моделиране на реалното поведение на контактната зона между усилян и усилащ елемент, като са дадени препоръки за тяхното практическо приложение.

1. Общи положения

В периода на експлоатацията на сградите и съоръженията по подовите им конструкции се проявяват различни повреди и дефекти. Някои от тях не са само неестетични, а са и опасни за носещата способност на конструкцията и водят до предаварийно и/или аварийното ѝ състояние. Някои от причините за възникването на повредите и дефектите са: влияние на околната среда, неправилна експлоатация,

¹ Илко Маринов, строителен инженер, конструктор, e-mail: ylkomarinov@mail.bg

промяна на инвестиционните намерения, човешки грешки при проектирането или изпълнението и т.н.

Възстановяването и/или усиляването на стоманобетонни плочи със стоманобетон, стомана и покриване и обвиване с армирани с влакна полимери (FRP материали) са едни от най-често срещаните техники и намират широко приложение в строителната практика. Повърхността, между съществуващия бетон и усиливащия материал се определя като контактна зона и от нейното изпълнение и поведение по време на експлоатацията зависи основно работата на усиления елемент.

2. Характеристики на контактна зона

В [9] са представени основните характеристики за следните контактни зони:

2.1. Контактна зона стар/нов бетон

При възстановяването и/или усиляването на стоманобетонни плочи със стоманобетон се изпълнява (възможни са различни технологии) допълнителен нов слой от бетон (неармиран или армиран).

Принципно опънните усилия се предават чрез армировката, а срязващите сили, чието направление е успоредно на контактната повърхност, както и натисковите сили, перпендикулярни на нея, се предават директно по контактната повърхност [2]. Върху способността за предаване на напрежения между съществуващ и укрепващ елемент в контактна зона влияят следните основни показатели: грапавина и чистота на съществуващата бетонна повърхност; клас и качество на изпълнение на стария и новия бетон; ексцентрицитет и направление на срязващата сила; процент на армиране на контактната повърхност и наклон на дюбелиращата армировка спрямо нормалата ѝ и т.н.

Общата носимоспособност на срязване зависи главно от следните механизми за предаване на напреженията [2], [9]:

- *Адхезивна връзка*

Адхезията може да има значителен принос към общата носимоспособност, стига контактната повърхност между стария и новия бетон да не е замърсена. Адхезивната връзка на срязване вследствие на хлъзгане е много корава и е ефективна при приплъзване по-малко от 0,05 mm. Ако е осигурена добра връзка, чрез вземане на подходящи мерки (почистване на повърхността, нагряване, високо качество на новия бетон и др.), стойностите на съпротивлението на срязване за класове на бетона, не по-големи от C50/60, са в следните граници [9]: за грапава повърхност: 1,5 – 2,5 N/mm², а за много грапава повърхност: 2,5 – 3,5 N/mm².

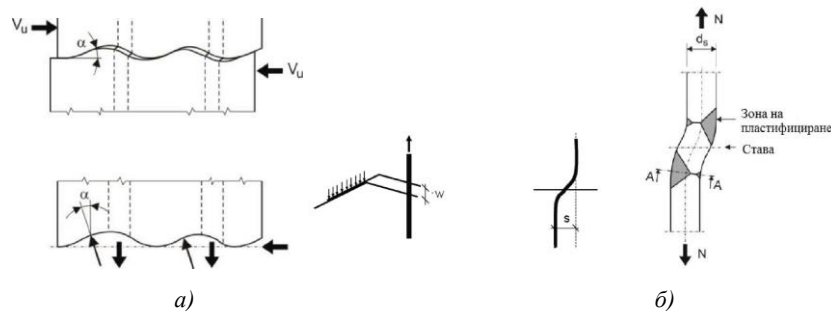
- *Механично зацепване*

Подходящата обработка на повърхността за подобряване на адхезивната връзка може да доведе и до засилване на ефектите от механично зацепване. Обработването на повърхността (нагряване чрез пясъкоструене, водоструене, лепене и др.) освен с почистването ѝ, може да доведе до подкопаване на зърната на едрия добавъчен материал и заклиняването им с новия бетон. Механичното зацепване играе важна роля, дори при приплъзване, по-голямо от 0,05 mm, при което адхезивната връзка е вече разрушена. И при този механизъм характеристиката на срязване вследствие на хлъзгане е много корава и намалява с увеличаване на приплъзването. Стойностите на съпротивле-

нието на срязване за класове на бетона, не по-големи от С 50/60, са в следните граници [9]: за много грапава повърхност: 1,5 – 2,0 N/mm².

- *Триене*

То се поражда под действието на външни натискови сили, перпендикулярни на контактната повърхност и е в пряка зависимост от тях, както и от грапавината на повърхността. Зависи също и от заскобяващото (дюбелното) действие на армировката. Армировката или свързващите пръти, които пресичат повърхността, могат да доведат и до активиране на процесите на триене, стига да има значително награвяване на повърхностите, така че приплъзването вследствие на срязване да е съпроводено с отваряне на контактната зона (фиг. 1а).



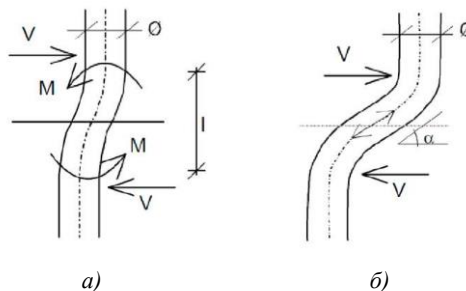
Фиг. 1. Контактна зона

- а) отваряне на контактната зона при приплъзване и участие на армировката,
- б) заскобяващо и дюбелно действие на армировката [9]

Стойностите на коефициента на триене μ за класове на бетона, не по-големи от С50/60, са в следните граници [9]: за гладка повърхност 0,5 – 0,7 N/mm², за грапава повърхност 0,7 – 1,0 N/mm², за много грапава повърхност 1,0 – 1,4 N/mm².

- *Дюбелно действие на армировката (вкл. анкери), пресичаща контактната повърхност*

Дюбелното действие на армировката се отнася преди всичко до съпротивлението от огъване на отделните армировъчни пръти, които пресичат контактната повърхност. Приплъзването по контактната повърхност води до преместване на горния спрямо долния край на свързващите пръти, като при това в пръта възникват напрежения от огъването му. Към напрегнатото му състояние се прибавят и опънните напрежения от отваряне на връзката (фиг. 1б).



Фиг. 2. Дюбелно действие на армировката
а) от огъване, б) от прищипване [9]

Тези опънни напрежения обаче не позволяват да се развие съпротивлението от огъване, което е следствие от пластичния момент на пръта. Максималното съпротивление от огъване се достига при приплъзване от около 0,1 – 0,2 пъти диаметърът на пръта (фиг. 2а). При големи приплъзвания се наблюдава и т.нар. ефект на прищипване на армировката: с увеличаване на преместванията на горния спрямо долния край на пръта се увеличава хоризонталният компонент на опънната сила в него, която допринася за съпротивлението на срязване (фиг. 2б).

Естествено, характеристиката на срязване вследствие на хлъзгане при дюбелното действие се увеличава с увеличаване на приплъзването.

Граничните тангенциални напрежения в контактната повърхност могат да бъдат описани със следната формула [2]:

$$\tau_u = \tau_c + \mu \cdot (\rho \cdot \kappa_1 \cdot f_y + \sigma_n) + \kappa_2 \cdot \rho \cdot \sqrt{f_y \cdot f_{cc}} \leq \beta \cdot v \cdot f_{cc} , \quad (1)$$

където:

τ_c е съпротивлението вследствие на адхезия и механично зацепване;

ρ е коефициентът на напречно армиране;

κ_1 и κ_2 са коефициенти на взаимодействие, които отчитат, че дюбелиращата армировка е подложена на огъване и осова сила едновременно, както и че максималните стойности на отделните механизми се появяват при различно приплъзване;

f_y е границата на провлачване на дюбелиращата стомана;

f_{cc} е якостта на едноосов натиск на бетона;

σ_n са напреженията от външно въздействие, нормални на контактната повърхност;

v е коефициент, който отразява намаляването на якостта на натиск при страничен опън;

β отчита наклона на натиснатите зони, които се образуват поради неравния характер на повърхността.

Формулата описва сумата от приноса на адхезията/механичното зацепване + приноса на триенето + приноса на дюбелното действие на армировката.

2.2. Контактна зона бетон/стомана

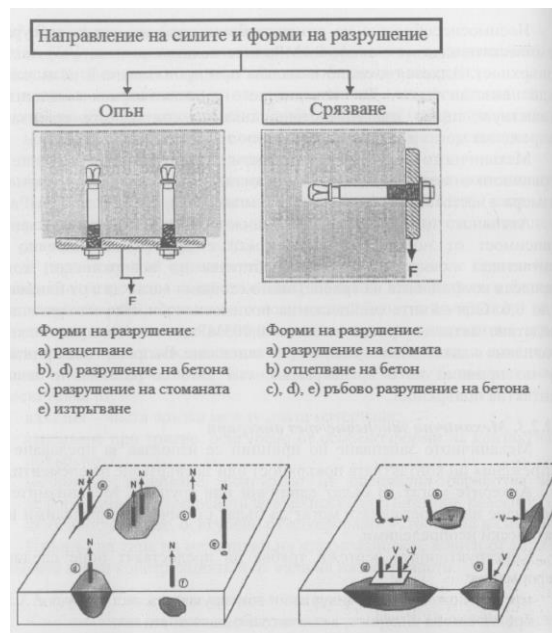
В [9] е направена следната класификация, в зависимост от механизмите на взаимодействието на стоманобетонни и стоманени елементи:

- взаимно ограничаване на премествания на междустоманобетонен и стоманен елемент и/или субконструкция (напр. при добавяне на нови стоманени елементи за глобално усилване на стоманобетонната конструкция);
- взаимодействие между стоманобетонни и стоманени компоненти, при които тяхното поведение е като на един елемент (напр. при усилване на отделни стоманобетонни елементи със стоманени плочи, ленти, профили и др.).

В първия случай стоманените елементи се свързват със стоманобетона чрез механични устройства и предизвикват локални въздействия в него. При втория случай коравината и носимоспособността на връзката води до активиране на композитно поведение на елемента и/или конструкцията [3]. Разглеждат се както разпределените,

така и локалните ефекти от взаимодействието. Взаимодействието между бетон и стомана бива:

- адхезия – чиста връзка между двата материала;
- зацепване при триене, осигурено от особени форми на контактната повърхност;
- механично зацепване, осигурено от специална обработка или деформация на стоманената повърхност (вдлъбнатини, релефи);
- дюбелно действие, осигурено от анкериращи устройства и системи.



Фиг. 3. Примерни форми на разрушение на анкери при усилване със стомана [2]

2.3. Контактна зона бетон/неметална армировка (FRP материали)

Използването на залепени армирани с влакна полимери (FRP материали) е сравнително нов метод за възстановяване и/или усилване на подови конструкции.

Според [9] сумарната носимоспособност на срязване, зависеща от стремената и армирания с влакна полимер, се изчислява като сума от приноса на съществуващия стоманобетонен елемент и приноса на армирания с влакна полимер, като не се допуска тя да надхвърли максималната носимоспособност на срязване на стоманобетонния елемент, зависеща от диагоналния натиск в стеблото.

Връзка на бетон с неметална армировка – разбира се взаимодействието и преносът на сили между съществуващия бетон и неметалната (FRP) армировка. Напреженията във връзката могат да бъдат представени като функция от приплъзването (относителното преместване).

Част от всеки проект за увеличаване на носимоспособността на срязване или огъване трябва да бъде определянето на максималната сила, която може да бъде трансферирана от съществуващия бетон към външната неметална армировка, а така също и определянето на нормалните и тангенциалните напрежения в контактната повърхност.

3. Начини за моделиране на усилен сечения, подложени на огъване

3.1. Някои практически решения без моделиране на контактната зона

3.1.1. Модели с еквивалентно монолитно сечение

Един от най-разпространените в практиката подходи за проектиране на усилен конструкции е чрез еквивалентно монолитно сечение (ЕМС). Основен принцип при този подход е, че се приема идеална връзка между усиления и усиляващия материал, т.е. пренебрегва се приплъзването в контактната повърхност. Освен това се пренебрегва предварителното натоварване, т.е. приема се, че се усилюва ненапрегнат и недеформиран елемент [4].

Концептуален принцип при всички техники за възстановяване и/или усиляване е разрушението на сечението като монолитно да става преди разрушението на връзката между съществуващия и новия материал. Поради тази причина моделирането на елементите с ЕМС е оправдано, при положение че се докаже с допълнителна проверка горната предпоставка. Подходът е неточен, тъй като приплъзване в контактната повърхност винаги има, независимо че разрушението на връзката е предшествано от разрушението на сечението като монолитно. Приплъзването намалява коравината на елемента, поради което полученият с ЕМС капацитет на елементите е по-голям от действителния.

3.1.2. Модели с редуцирано еквивалентно монолитно сечение

Един опростен начин за проектиране е да се работи с обобщено хомогенно сечение, приведено към избрания за основен материал (обикновено съществуващия бетон) [4]. Използват се редуцираните геометрични характеристики на усиленото сечение, намерени посредством отношението на еластичните модули на усиляващите материали и основния материал. Важно е да се отбележи, че така въведено сечение ще има неограничено идеално еластично поведение, а нелинейността трябва да бъде допълнително въведена в сечения (области) на очаквано пластифициране [4].

3.1.3. Модели с действително еквивалентно монолитно сечение

Съвременните изчислителни софтуери, базирани на метода на крайните елементи, позволяват да се моделират конструкции с действителните геометрични и физически характеристики на усилените сечения на елементите. За целта, в зависимост от вида на усиляването, могат да се използват различни подходи. Ако усиляването е само надлъжно или само напречно на конструктивния елемент, могат да се използват специални послойни крайни елементи. Във всички случаи съществуващите и усиляващите части на конструкцията могат да се моделират с различни крайни елементи, отразяващи характеристиките на съответния материал. В този случай концепцията за ЕМС се запазва, ако различните крайни елементи имат общи възли в контактната повърхност – така се моделира идеална връзка между усиляващ и усилян елемент.

3.2. Някои практически решения, формирани чрез моделиране на контактната зона

Едно таково решение се разглежда в [7]. Изследвани са греди, подложени на огъване, усилен с тънки слоеве с висока якост и добра деформируемост. До конкретно натоварване тези греди показват линейно еластично поведение, без разделяне

на слоевете. Тогава, по аналогия с механиката на флуидите, се предполага, че граничният слой се дефинира в рамките на съединителното (контактното) тяло. Предлага се модел на плавен преход между еластичния модул на бетона и този на усилващия слой с използването на параболична функция за апроксимация.

Един добър подход за анализ на контактната зона е моделирането с помощта на крайни елементи в средата на различни софтуерни продукти – например SAP 2000 [10]. Такъв подход може да се използва и на базата на програмата ANSYS, чрез използването на контактната технология и/или пружинни елементи.

3.2.1. Модели с контактни елементи (фиг. 4а)

С помощта на т.нар. „контактна технология” се контролира взаимното преместване на една част от съществуващия стоманобетон (например: възел, при контакт „възел/възел”) и определена част от новопроектирания стоманобетон. Контактната задача е типична нелинейна задача и за нейното решение се изискват собствени цикли на итерации за постигането на равновесие. В края на итерациите се проверява изменението на състоянието на всеки елемент и се изчислява значението за условието на сходимост на решението. Най-често сходимостта на решението се сравнява с определен критерий за сходимост. При последната итерация трябва състоянието на елементите да не се е променило и да е изпълнен критерият за сходимост.

В библиотеката на програмния продукт ANSYS се съдържат пет типа контактни модели: възел към възел, възел към повърхност, повърхност към повърхност, линия към линия и линия към повърхност. Всеки един от тях използва и дефинира различен набор от контактни елементи и е подходящ за решаването на различни задачи.

При контактното моделиране първо се определят частите от модела, които могат да са в контакт (в зависимост от товара, материала, граничните условия и други фактори). В случая на моделиране на конструкции в процес на възстановяване и усилване това са контактуващите повърхности на усилвания и усилващия материал, които първоначално са в пряк контакт. Те, с увеличаване на натоварването се приплъзват и евентуално могат да изгубят контакт, т.е. да настъпи разрушение на връзката [8].

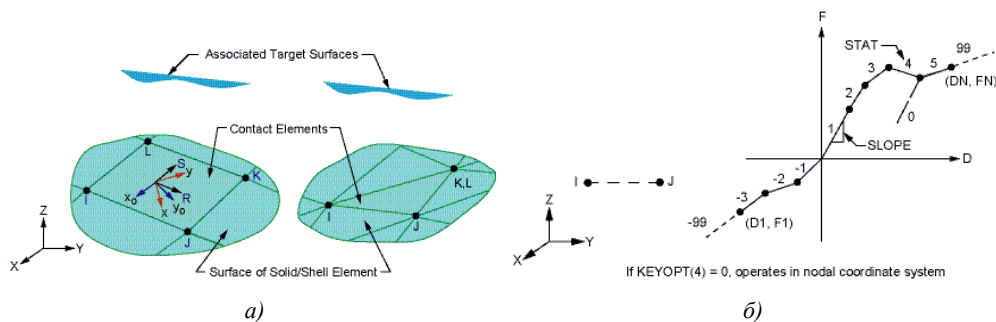
Най-подходящ за решаването на поставената задача – моделирането на контактната зона на елементи, подложени на усилване, е контактният модел „повърхност към повърхност”. Този модел може да се използва както при корави към деформируеми, така и при деформируеми към деформируеми крайни елементи. Изборът зависи от отношението на коравината на усилваните и усилващите части от конструкцията. Създаването на контактна двойка става, като се насложат контактен елемент на едната повърхност и съответен целеви елемент на другата, като двата елемента трябва да са с еднакви реални константи за реализиране на сдвояването им. В някои случаи е възможно да се използва и контактен модел „възел към възел”, но моделът „повърхност към повърхност” има някои предимства пред него:

- поддържа контактни елементи от нисък и висок ред (с възли само в краищата и с междинни възли);
- осигурява по-добри контактни резултати за нормални сили и напрежения на триене;
- няма ограничения за формата на целевата повърхност (дължащи се на геометрията на модела или дискретизацията на мрежата).

При избора на контактни (и пружинни) елементи трябва да се отчита и това, че те нямат аналог във физическия свят. Те описват физическото явление: в случая това е

контактът между усилван и усилващ материал. Контактни елементи в библиотеката на програмния продукт ANSYS са: от CONTA171 до CONTA178 [6].

Контактният елемент CONTA173 се използва за представяне на контакта и приплъзгачата повърхност между 3-D „целева“ деформируема повърхност, определена от този елемент. Елементът е приложен за 3-D конструктивен анализ и свързващо контактно поле и се намира на 3-D повърхността на „твърди“ елементи (SOLID65, SOLID70, SOLID96, SOLID185, SOLID285) или елементи от тип „черупки“ (SHELL28, SHELL41, SHELL131, SHELL157, SHELL181). Връзката се осъществява, когато повърхността на елемента „прониква“ през един от елементите на целевия сегмент (TARGE170) по определена целева повърхност. Може да се дефинира напрежение при срязване и триене. Този тип елементи също така позволяват разделяне на свързващия контакт, за да се симулира разслояване между повърхностите (фиг. 4а).



Фиг. 4. Елементи [6]
а) CONTA173, б) COMBIN39

За целите на изследване при възстановяването и/или усилването на стоманобетонни елементи със стоманобетон и FRP материали най-подходящи са контактните елементи от типа: „повърхност/повърхност“, а за възстановяването и/или усилването със стомана: „възел/възел“ или „линия/повърхност“.

Опцията **Debonding** (разслояване, разлепване, отлепване) също може да се използва за моделиране при възстановяването и/или усилването на стоманобетонни елементи със стоманобетон и FRP материали. Тя може да се използва за симулиране на разслояване разлепването, отлепване на две повърхности, т.е. разглежданият модел се дефинира като състоящ се от различни слоеве с взаимодействие между тях [6] и [1].

3.2.2. Модели с пружинни елементи (фиг. 4б)

Взаимодействието и по-специално приплъзването в контактната повърхност между усилващ и усилван материал може да се симулира и с пружинни крайни елементи. Предимството тук е, че решението е много по-леко, в сравнение с използването на контактната технология, а теоретичното предизвикателство е определянето на подходяща диаграма „сила–деформация“ на пружината, която да отразява реално действащите механизми за предаване на напреженията, действащи при различни стойности на приплъзването. Диаграмите, които реално са криволинейни, се задават като мулти-линейни посредством множество от точки. Недостатък е невъзможността да се симулира загуба на контакт и поведението на елемента след това. В модела е необходимо елементите, моделиращи усилващите и усилвани части на конструкцията, да нямат общи възли, а съседните им възли се свързват с пружинен краен елемент [6] и [4].

Пружинните елементи в библиотеката на програмния продукт ANSYS са: COMBIN14, COMBIN37, COMBIN39, COMBIN40 и COMBI165 [6].

Пружинният елемент COMBIN39 е еднопосочен елемент с нелинейна обобщена диаграма на сила–деформация (фиг. 4б), който може да се използва в почти всеки анализ.

За целите на изследване при възстановяването и/или усилването на стоманобетонни елементи със стоманобетон и FRP материали най-подходящи са пружинните елементи от типа: „повърхност/повърхност”, а при възстановяването и/или усилването със стомана: „възел/възел”.

4. Практически изводи и препоръки

- Прилаганите в практиката EMC (еквивалентно монолитно сечение) и/или други опростени процедури за изследване на капацитета на усиленото сечение често не са в посока на сигурността, независимо от удобството при тяхното използване.
- Използването на контактни и/или пружинни елементи от библиотеката на програмния продукт ANSYS за моделиране на контактната зона е една възможност за по-точно отчитане на механизмите на взаимодействие между усилян и усилящ материал.
- Задълбоченото изследване на различните параметри, характеризиращи контактната зона, както и тяхното влияние върху крайното поведение на усиления елемент, е от особена важност, за да може възможно най-точно да се определят характеристиките на контактните и/или пружинните елементи.
- Всички резултати и изводи от численото моделиране изискват валидиране с реални експериментални резултати. Експериментите ще дадат допълнителна възможност да се намерят по-точни стойности на отделните параметри.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кабанов, Ю.* Контактные технологии в действии. ANSYS SOLUTION, Русская редакция, 2007.
2. *Трайкова, М.* Възстановяване и усилване на сгради. Проблеми, конструктивни решения, практически препоръки. София, 2014.
3. *Чардакова, Т.* Възстановяване и усилването на съществуващи стоманобетонни конструкции съгласно Model Code 2010. VI-та Международна научна конференция "АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО – СЪВРЕМЕННОСТ", 30 Май – 1 Юни 2013 Варна, България.
4. *Чардакова, Т.* Анализ на ефектите от локални намеси върху цялостното поведение на монолитни стоманобетонни скелетно-гредови конструкции в процес на възстановяване и усилване. Докторска дисертация, УАСГ, София, 2015.
5. *Чардакова, Т., Кр. Възгечев, М. Трайкова.* Усилване на конструктивни елементи от монолитни стоманобетонни скелетно-гредови конструкции. Нова кампания, София, 2015.
6. ANSYS v.15.0.0 Help SAS IP, Inc. 2013.

7. *Baltov, A., A. Yanakieva.* BENDING OF CONCRETE BEAMS REINFORCED VIA THIN LAYERS. XV-та МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ВСУ'2015.

8. *Crawford, J.* Мифы о контактных элементах. ANSYS SOLUTION, Русская редакция, 2006 – 2007.

9. FIB Model Code for Concrete Structures. 2010.

10. *Traykova, M., R. Boiadjieva.* Influence of the interface mechanisms on the behavior of strengthened with reinforced concrete or steel existing RC slabs. International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Leipzig, Germany October 2015.

RESEARCH ON THE INTERFACE ZONE OF STRENGTHENED RC SLABS

I. Marinov¹

Keywords: *interface zone, strengthening, slabs*

Research area: *rehabilitation and strengthening of RC structures*

ABSTRACT

Very often the construction practice imposes strengthening of existing slabs because of changes in the original purposes, mistakes made in the design or/and the execution, new standards, etc.

The paper presents a review of the mechanisms in the interface zone and the influence between them. A critical analysis of the existing standards considering the problem and the methods for modelling of the interface zone are done.

The advantages and the disadvantages of the different methods and procedures for modelling are discussed. Some contemporary procedures for analysis of the behaviour of the interface zone and some general recommendations for practical application are presented.

¹ Ilko Marinov, Structural Engineer, e-mail: ylkomarinov@mail.bg