

ВИСШЕ СТРОИТЕЛНО УЧИЛИЩЕ „ЛЮБЕН КАРАВЕЛОВ” - СОФИЯ
СТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ
Катедра „Строителни конструкции”

инж. Иван Йорданов Иванчев

ИЗСЛЕДВАНИЯ ВЪРХУ ШИРОЧИНАТА НА ПУКНАТИНИТЕ ПРИ
СТОМАНОБЕТОННИ ЕЛЕМЕНТИ

АВТОРЕФЕРЕТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен „Доктор”
по професионално направление: 5.7. „Архитектура, строителство и геодезия”
Научна специалност: 02.15.04 „Строителни конструкции”

Научен ръководител:
проф. д-р инж. Тотю Бориславов Даалов

София, 2016 г.

Авторът е докторант към катедра „Строителни конструкции“ при „Строителен факултет“ на ВСУ „Любен Каравелов“- София.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра „Строителни конструкции“, състоял се на 26.09.2016 г.

Експерименталните изследвания по дисертацията са извършени в Научноизследователски строителен институт (НИСИ) - гр. София. Използвани са наличните уреди, машини, измервателни преобразуватели и др. на НИСИ-София и „Лаборатория за обследване и изпитване на строителни конструкции“ към ВСУ „Любен Каравелов“.

Издавам моята признателност на научният ми ръководител проф. д-р инж. Тотю Даалов за ценните професионални насоки, споделените знания и помощта в разработването на настоящата дисертация. Благодаря на колегите от НИСИ за подкрепата и съдействието при подготовката и провеждането на експерименталната работа. Благодаря на колегите си от катедра „Строителни конструкции“, Деканското и Ректорското ръководство при ВСУ „Любен Каравелов“ за съветите, мненията, моралната и финансовата подкрепа по време на разработването на дисертацията. Благодаря на всички, които вярваха в моя потенциал.

На родителите ми

Дисертационният труд съдържа 164 страници, 156 фигури, 44 таблици, 102 формули и 127 литературни източници.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на отч. в зала на ВСУ „Л. Каравелов“.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в деловодството на ВСУ, Ректорат на ВСУ, етаж 3, стая № 33.

Научно жури: 1. проф. д-р инж. Тотю Бориславов Даалов
2. доц. д-р инж. Димо Марков Кисов
3. проф. д-р инж. Борянка Илиева Захаријева - Георгиева
4. проф. д-р инж. Йордан Иванов Милев
5. проф. д-р инж. Спас Цонков Памукчиев

Резерви: 1. доц. д-р инж. Веселин Славчев Славчев
2. доц. д-р инж. Дария Милчева Михалева

Автор: **инж. Иван Йорданов Иванчев**

Заглавие: **Изследвания върху широчината на пукнатините при стоманобетонни елементи**

УВОД

В стоманобетонни конструкции, подложени на огъване, срязване, усукване, опън в резултат на пряко натоварване и на ограничения, или на принудени деформации се образуват пукнатини. Те влошават експлоатационните качества и дълготрайността на конструкциите. Широчината на пукнатините за елементи, подложени на огъване се ограничава, за да се гарантира дълготрайността на конструкциите (защита на армировката), външния вид на елементите и коравината на елементите.

В различни теории и норми за проектиране е залегнало определянето на широчината на пукнатините с оглед да се избегнат недопустимо големи пукнатини и да се осигури нормална експлоатация на конструкциите. Пукнатините в бетона са естествен резултат от малката му якост на опън. Опънни напрежения може да възникват при различни ситуации, по различно време в елементите на конструкцията или в отделни участъци от тях.

Изследванията върху широчината на пукнатините и разстоянието между тях при стоманобетонни елементи е актуален въпрос, който е предмет на многобройни теоретични и експериментални изследвания, нормативни документи, стандарти и представлява интерес за учените от цял свят. За това свидетелстват големият брой публикации в специализирани научни издания.

Съществуват доста теории за определяне на широчината на пукнатините и разстоянието между тях и няма универсално приета теория за определяне на параметрите им. Ето защо в различните нормативни документи са приети различни формули за изчисляването им.

Фактът, че формулите, които се използват в EC2 и в другите стандарти се променят, показва, че продължават изследванията върху процеса на пукнатинообразуване с цел прецизиране на големия брой параметри и фактори, които оказват съществено влияние.

Пукнатините могат да възникнат и по други причини, като например пластично съсъхване или химични реакции във втвърдяващия се бетон, при които се получава изменение на обема. Такива пукнатини могат да бъдат недопустимо широки, но те не са предмет на настоящата дисертация.

Целта на дисертационния труд е да се направят експериментални и теоретични изследвания върху широчината на пукнатините, нормални спрямо надлъжната ос на стоманобетонни елементи, подложени на огъване, като се отчетат факторите, имащи съществено значение.

За постигане на така формулираната цел са поставени следните задачи:

- Да се направи преглед и анализ на по-важните теории, нормативни документи и изследвания за определяне на широчината на пукнатините и разстоянието между тях при стоманобетонни елементи и да се обобщи състоянието на проблема;
- Да се изготвят експериментални стоманобетонни елементи, от обикновен бетон без предварително налягане на армировката, с геометрични и конструктивни параметри, близки до натурните, съобразени с възможностите на наличното лабораторно оборудване и да се създаде информационна измервателна система за измерване и обработка на резултатите;
- Да се оценят и уточнят факторите, влияещи върху широчината на пукнатините;
- Да се изследва и определи експериментално разстоянието между пукнатините, средната деформация на опънната армировка и бетона, влиянието на отношението ϕ / ρ_{eff} и на бетонното покритие върху широчината на пукнатините за стоманобетонни елементи, подложени на огъване;
- Да се извърши комплексен анализ на получените резултати за влиянието на основните фактори върху параметрите на пукнатините, като се съпоставят помежду си при различните етапи на натоварване и със съответните теоретично изчислени стойности;
- Да се провери валидността на предложените формули за изчисление на параметрите на пукнатините според различни нормативни документи, като се сравнят резултатите с направените експериментални изследвания.

Дисертационната работа съдържа увод, използвани означения, четири глави, заключение и използвана литература.

В **Глава I** е направено литературно проучване и анализ на основните теории, нормативни документи, експериментални изследвания и фактори, влияещи при определяне на параметрите на

пукнатините при стоманобетонни елементи. Обобщено е състоянието на проблема. Формулирани са целта и задачите на дисертационния труд.

В **Глава II** е описан проведеният експеримент за определяне на параметрите на пукнатините при стоманобетонни елементи, подложени на огъване, който е комплекс от технически, технологични, метрологични и организационни мерки, осигуряващи целесъобразно провеждане на изследванията, според поставената цел и задачи в дисертацията. Разгледани са използваните пробни тела, стоманобетонни греди, измервателни преобразуватели, уреди, стендове, програмни продукти, методи и стандарти, използвани в изследванията. Описана е създадената експериментална информационна система за измерване и обработка на резултатите при изследванията на пукнатините. Формулирана е методиката и са систематизирани основните етапи на експерименталното изследване.

В **Глава III** са описани експериментално определените якостни, деформационни характеристики и работни диаграми на бетона и армировъчната стомана. Построени са графики на експериментално определеното деформирано състояние на напречното сечение, определени са средната деформация на опънната армировка на ниво център на тежестта y , максималните, средните и минималните разстояния между пукнатините, средната и максималната ширина на пукнатините в участъка с постоянен огъващ момент при различните степени на натоварване на гредите, средната деформация на бетона между две пукнатини на ниво център на тежестта на опънната армировка, средното напрежение на бетона между две пукнатини за опънатия ръб на сечението. Експериментално е установено влиянието на бетонното покритие и отношението ϕ / ρ_{eff} при различни стойности на напрежението в опънната армировка в сечение с пукнатина върху максималната и средната ширина на пукнатините и максималното и средното разстояние между тях.

В **Глава IV** са сравнени експериментално получените в трета глава параметри на пукнатините и характеристики на използваните материали с определените по различни нормативни документи (EC2, НПБСК, Model Code 2010, DIN 1045-1, ACI 318-11, BS 8110 и СНиП 52-01). Якостни и деформационни характеристики на бетона и армировъчната стомана, получени от експеримента, са сравнени с определените по EC2. Направено е сравнение между експериментално получените и определените по различни нормативни документи максимални и средни разстояния между пукнатините, максимална и средна ширина на пукнатините при различни стойности на огъващия момент, влиянието на бетонното покритие и отношението ϕ / ρ_{eff} при различни стойности на напрежението в опънната армировка в сечение с пукнатина върху максималната и средната ширина на пукнатините и максималното и средното разстояние между тях в участъка с постоянен огъващ момент.

В заключение са дадени систематизирани претенции за научно-приложни и приложни приноси в дисертационния труд, перспективи за бъдещи изследвания и публикации по темата на дисертационния труд.

ГЛАВА I

Образуване на пукнатини в стоманобетона. Преглед на основните теории и нормативни документи за определяне на широчината и разстоянието между пукнатините при стоманобетонни елементи. Експериментални резултати от литературни източници. Състояние на проблема

В обзора на дисертацията е разгледано:

- начин на образуване на пукнатини в стоманобетонни елементи и влияние на разстояние между пукнатините, закотвяща дължина, средна деформация на опънна армировка и бетон, напрежение в опънна армировка, ефективна опънна зона и бетонно покритие върху широчината на пукнатините;
- определяне на широчината на пукнатините и разстоянието между тях според теории с приемане на хлъзгане на Saliger, Мурашов, теория без приемане на хлъзгане на Broms, теории с приемане на локално хлъзгане на Ferry Borges, Welch, Leonhardt, Beeby;
- изчисляване на параметрите на пукнатините според БДС EN 1992-1-1, FIB Model Code 2010, DIN 1045-1 2008, ACI 318-11, НПБСК-87, BS 8110-1997 и СНиП 52-02-2012;

- експериментални резултати от литературни източници на Rehm и Rusch, Hartl, Eligehausen, Borosnyoi и Snobli, Vandewalle, Makhlof и Malhas, Cairns, Caldentey, Peiretti, Iribarren, Soto и оценяване влиянието на напрежението в надлъжната армировка, отношението ϕ/ρ_{eff} , бетонното покритие и други фактори върху широчината на пукнатините.

ГЛАВА II

Методика и основни етапи на експерименталното изследване за определяне на параметрите на пукнатините при стоманобетонни елементи, подложени на огъване

II.1. Пробни тела и стоманобетонни греди, изготвени за експеримента

II.1.1. Пробни тела за определяне на якостни, деформационни характеристики и работна диаграма на бетона

За изследване на кубова якост на натиск, цилиндрична якост на натиск, якост на опън при разцепване, модул на еластичност и определяне на работната диаграма на бетона са изработени съгласно БДС EN 12390-2 [7] 75 бр. цилиндри с размери 150/150 mm, 39 бр. кубчета с размери 150/150/150 mm и 24 бр. призми с размери 100/100/400 mm. Размерът им е избран в зависимост от големината на едрия добавъчен материал (БДС EN 12390-1 [6]). Изготвени са от бетон клас C25/30, ситна фракция на едрия добавъчен материал ($d_{max}=12$ mm), консистенция S3.

За определяне на характеристиките на бетона са изпитани:

- на възраст 3-ти, 7-ми, 14-ти, 28-ми ден и в дните на провеждане на изпитванията на сериите стоманобетонни греди по 3 броя цилиндри за определяне цилиндричната якост на натиск, по 3 броя кубчета за определяне кубовата якост на натиск, по 3 броя цилиндри за определяне якостта на опън при разцепване;

- по 3 броя призми за определяне модула на еластичност на възраст 28-ми ден и в дните на провеждане на изпитванията на сериите греди и за получаване на работна диаграма на бетона в дните на изпитване на сериите греди.

Определени са:

- **кубова и цилиндрична якост на натиск** съгласно БДС EN 12390-3 [8], като телата са натоварени на машина за изпитване на материали на натиск до разрушение, съгласно БДС EN 12390-4 [9];

- **якост на опън при разцепване** според БДС EN 12390-6 [10];

- **модул на еластичност** съгласно БДС EN 12390-13 [11]. Експериментът е проведен на машина за изпитване на материали на натиск Toni Technik като са използвани екстензометри за измерване на деформациите.

- **работна диаграма (диаграма напрежения-деформации)** чрез изпитване на призмите, използвани за определяне на модула на еластичност на бетона. Деформациите са измерени с два индуктивни датчика с ход 50 mm, прикрепени към страничните повърхности на пробното тяло. Индуктивните датчици са свързани към измервателен уред Spider 8 и получените резултати са обработени с програмния продукт Catman Professional 5.0. Натоварването е извършено на степени, като първата е 15 kN, а следващите са през 30 kN до разрушаване. На база получените зависимости за изменение на силата във времето и деформацията във времето е изчертана диаграмата напрежения-деформации на бетона.

II.1.2. Епруветки от армировъчни пръти за определяне на якостни, деформационни характеристики и работна диаграма на армировъчната стомана

За изследване на характеристиките на армировъчните пръти, вложени в стоманобетонните греди с дължина 60 cm са изготвени 3 бр. епруветки с диаметър Ф6 (стомана B235), 3 бр. епруветки с диаметър Ф8 (стомана B235), 3 бр. епруветки с диаметър N8 (стомана B500), 3 бр. епруветки с диаметър N12 (стомана B500) и 3 бр. епруветки с диаметър N18 (стомана B500).

Изпитванията на армировъчната стомана са извършени според БДС EN ISO 6892-1 [13]. За провеждането им пробните тела са подложени на деформация, предизвикана от опънна сила до разрушаване. Натоварването е реализирано с машини за изпитване на опън с обхват до 100 kN и до 350 kN в зависимост от диаметъра на армировъчния прът. При измерването на деформациите са използвани 2 бр. индуктивни датчици на фирмата HBM с ход 50 mm. За дублиране на получените резултати на две от епруветките с диаметър N12 и две с диаметър N18 са премахнати по 3 ребра и

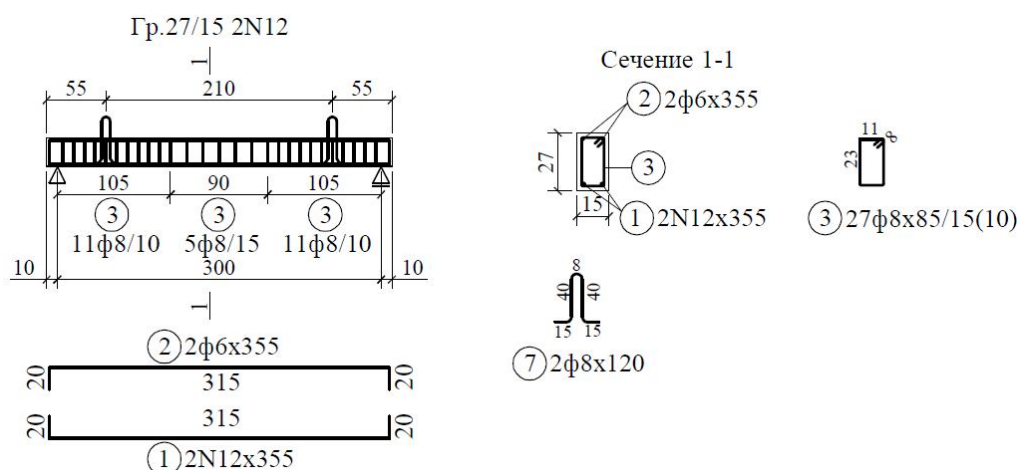
са залепени по два тензорезистора КФ5П1 на фирмата VEDA с база 10 mm. Построени са зависимостите $\sigma - \varepsilon$ (напрежения-деформации).

Определени са относителното общо удължение при разрушение A_r и относителното общо удължение при максимална сила A_{gt} .

II.1.3. Стоманобетонни греди

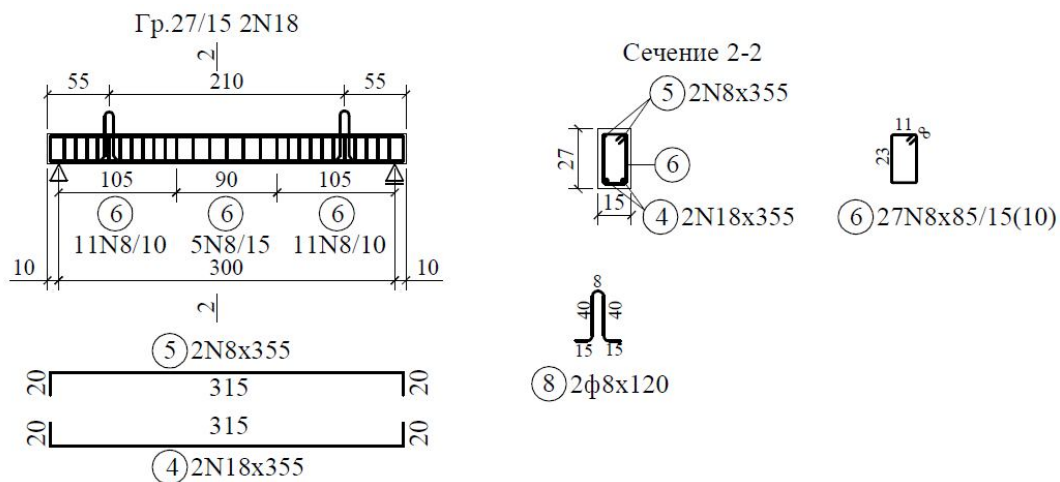
За експериментални изследвания върху широчината на пукнатините и разстоянието между тях при стоманобетонни елементи, подложени на огъване, са изготвени 12 броя греди - 4 серии с по 3 греди за всяка серия. Сериите се различават по вложената надлъжна армировка, бетонно покритие и коефициент на армиране. Конструктивните им параметри са подбрани така, че да отговарят на характерните параметри на срещаните в практиката в промишленото и гражданското строителство греди. Лабораторният характер на експерименталното изследване налага използването на елементи със сравнително по-малки височина, широчина на напречното сечение и отвор. Разстоянието между стремената е подбрано така, че да се осигури разрушаване на елементите вследствие огъване, а не от срязване. Образците са:

- 3 бр. греди (A1, A2, A3) с напречно сечение 27/15cm, отвор 3m, вложена надлъжна долна армировка от 2N12, стремена $\phi 8/10(15)$ cm (фиг. II.10);
- 3 бр. греди (B1, B2, B3) с напречно сечение 27/15cm, отвор 3m, вложена надлъжна долна армировка от 2N18, стремена $N 8/10(15)$ cm (фиг. II.11);
- 3 бр. греди (C1, C2, C3) с напречно сечение 30/15cm, отвор 3m, вложена надлъжна долна армировка от 2N12, стремена $\phi 8/10(15)$ cm (фиг. II.12);
- 3 бр. греди (D1, D2, D3) с напречно сечение 30/15cm, отвор 3m, вложена надлъжна долна армировка от 2N18, стремена $N 8/10(15)$ cm (фиг. II.13).

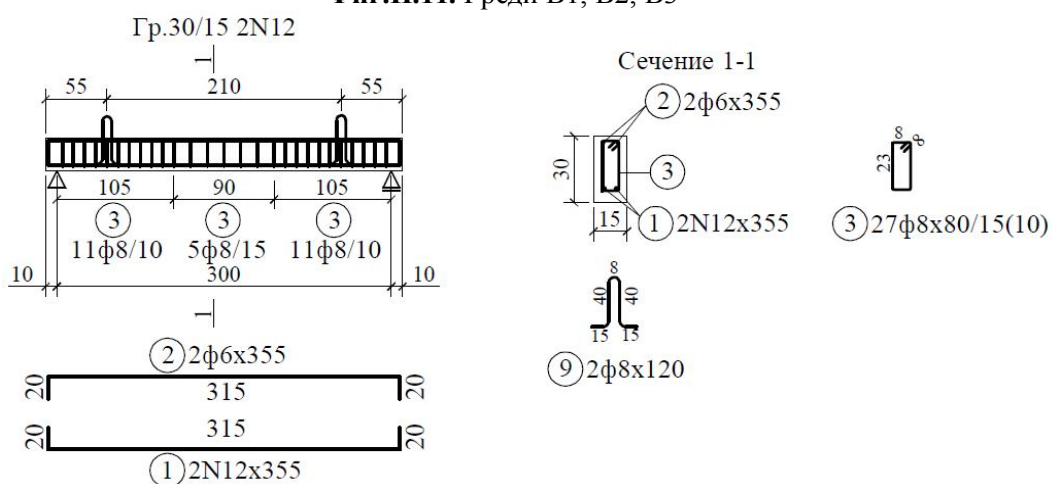


Фиг. II.10. Греди A1, A2, A3

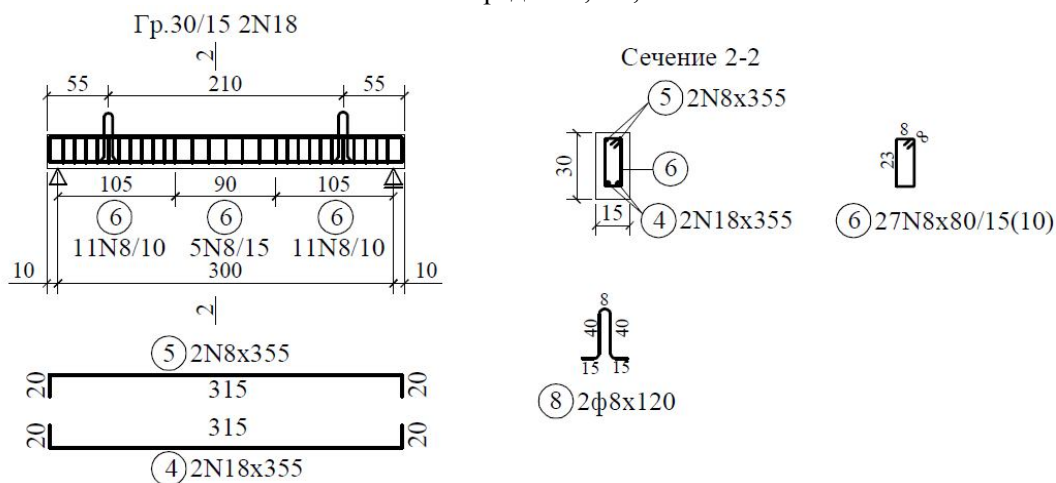
Гредите се различават по височина на напречното сечение, която е 27 cm за греди A1, A2, A3, B1, B2, B3 и 30 cm за греди C1, C2, C3, D1, D2, D3, с което се осигурява по-голямо бетонно покритие за серии C и D. За да се осигури сравнимост на резултатите от експеримента стоманобетонните греди и пробните тела са изготвени в един ден от един и същ бетон. Схемата за изпитване на опитните образци е проста греда с две концентрирани сили в третините (четири точков тест) и съвпада с изчислителната статическа схема. Натоварването е статично и се извършва с помощта на хидравлична натискава преса. То се осъществява на степени, различни за отделните серии, съответстващо на тяхната носеща способност. При греди от серии A и C силата за всяка точка при различните степени на натоварване е: 1 kN, 2 kN, 3 kN, 4 kN, 5 kN, 6 kN, 7 kN, 8 kN, 9 kN, 10,5 kN, 12 kN, 13,5 kN, 15 kN, 17 kN, 19 kN, 21 kN, 23 kN, 25 kN и 27 kN. За серии B и D при различните степени на натоварване силата за всяка точка е: 1 kN, 2 kN, 3 kN, 4 kN, 5 kN, 6 kN, 7 kN, 8 kN, 10,5 kN, 13,5 kN, 17 kN, 21 kN, 25 kN, 29 kN, 33 kN, 37 kN, 41 kN, 45 kN, 49 kN, 53 kN и 57 kN. При всички греди е осъществено натоварване над експлоатационното, а за 8 от тях до провлачване на армировката.



Фиг.П.11. Греди В1, В2, В3



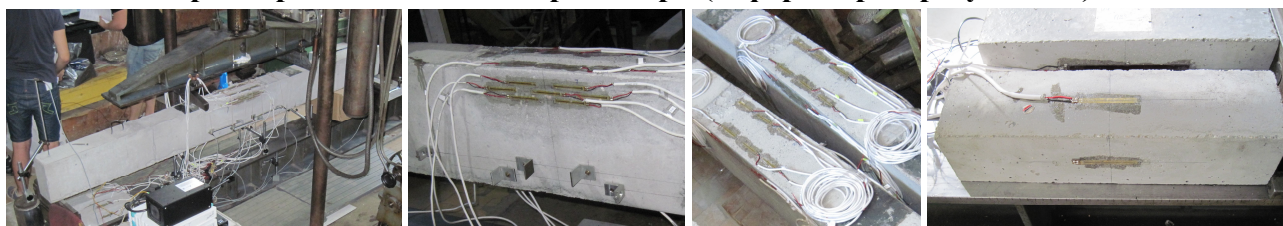
Фиг.П.12. Греди С1, С2, С3



Фиг.П.13. Греди D1, D2, D3

П.2. Измервателни преобразуватели, използвани в експеримента

П.2.1.Електросъпротивителни тензорезистори (деформопреобразуватели)



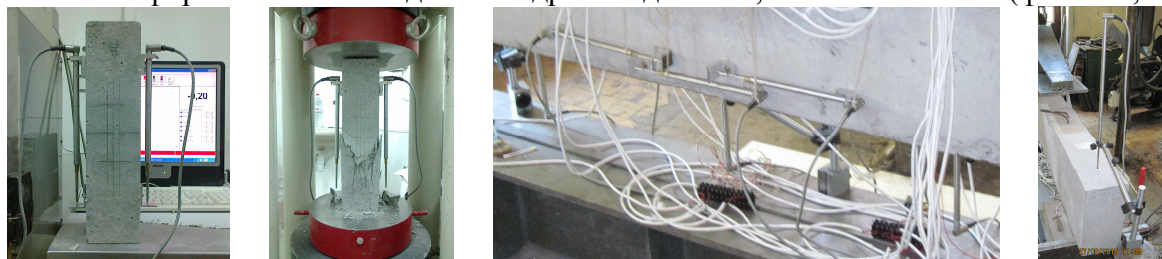
Фиг.П.16-18. Разполагане на работни и компенсаторни тензорезистори

За измерване на деформациите в част от епруветките от армировъчните пръти и за експериментални изследвания на деформациите в натисковата и опънната зона при

стоманобетонните греди са използвани електросъпротивителни тензорезистори BQ120-60AA(11)-BX на фирмата Zemic, LY4X на фирмата HBM и KФ5П1 на фирмата VEDA. Тензорезисторите са разположени в средните третини на стоманобетонните греди. За температурна компенсация са предвидени по 10 % от броя на работните тензорезистори (фиг. II.16-18). В използваната в експеримента апаратура всеки измервателен и компенсаторен тензорезистор се включва в четвърт Уитстонов мост в едно от рамената му.

II.2.2. Индуктивни датчици

За определяне на деформациите в опънната зона и провисванията на стоманобетонните греди, работната диаграма на бетона и армировъчната стомана са използвани индуктивни датчици за преместване на фирмата HBM с подвижно ядро с ход 20 mm, 50 mm и 100 mm (фиг. II.7, 20).



Фиг. II.7, 20. Разположение на индуктивните датчици върху пробни тела и стоманобетонни греди

II.2.3. Датчик за налягане

За измерване на налягането, действащо върху буталата на пресите, с които се извършва натоварването на стоманобетонните греди и епруветките от армировъчна стомана, е използван датчик за налягане PЗМА на фирмата HBM с параметри 500 Bar и 2 mV/V.

II.3. Използвани уреди и машини за изпитване

При експерименталните изследвания са използвани многоканални измервателни уреди UPM 100 и Spider 8 на фирмата HBM, машини за изпитване на материали Toni Technik с обхват до 3000 kN, Amsler с обхват до 100 kN и до 350 kN и машини за изпитване на елементи Amsler с обхват до 200 kN.

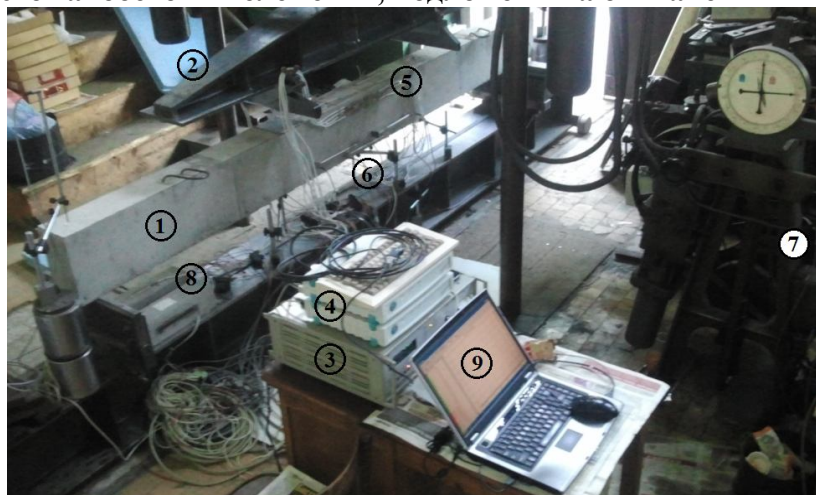
Пукнатините в бетона по цялата дължина на гредата са регистрирани при появата им и са следени широчината и дълбочината им в процеса на изпитване при всяка степен на натоварване. Този контрол е осъществяван с помощта на лупа Proseq и микроскоп Elcometer 900 с увеличение 8x или 100x, снабдени със скали с точност съответно 0,1 mm и 0,01 mm.

Бетонното покритие и разположението на армировъчните пръти в стоманобетонните греди е определено безразрушително с Profometer на фирмата Proseq.

II.4. Програмни продукти, използвани в експеримента и обработката на резултатите

Програмното обезпечаване в реално време за събиране, анализ, обработка и визуализация на резултатите от включените датчици към UPM 100 и Spider 8.0 е осъществено с продукта Catman Professional 5.0 на фирмата HBM. За обработка на резултатите е използван програмния продукт Matlab 7.11 на фирмата MathWorks, САЩ.

II.5. Експериментална информационна система за измерване и обработка на резултатите при изпитване на стоманобетонни елементи, подложени на огъване



Фиг. II.30. Експериментална информационна система

Реализираната информационна измервателна система (фиг.П.30) е комплекс от измервателни преобразуватели, измервателни уреди и машини за изпитване, които са синхронизирани и обединени от общ алгоритъм за функциониране и автоматизирано получаване на данни. Продължителността на експеримента за всяка една от гредите е около 9 часа, като са записвани по 33 резултата в секунда. Получени са по 31 000 резултата за всяка величина за цялото измерване, т.е. над 1 000 000 данни за всяка греда.

II.7.Обобщение и изводи

Създадената методика за експериментално изследване осигурява целесъобразно, ефективно и ритмично провеждане на изпитванията според нормативните документи, измерване по електрически път с помощта на измервателни преобразуватели и уреди, запис на получените резултати с програмни продукти и гарантира получаването на достоверни, обективни и коректни резултати.

Пробните тела са изготвени от материали, вложени в стоманобетонните греди и гарантират отчитането на местните фактори като вид на използваните материали (стомана и бетон), местните добавъчни материали, технологията на приготвяне и полагане на бетонната смес. Изготвените греди са с параметри, близки до натурните и са съобразени с възможностите на лабораторното оборудване. Те позволяват да се определят параметрите и характеристиките при изследване на пукнатини при стоманобетонни елементи, подложени на огъване, като се отчитат особеностите на всички изследвани величини и зависимости при различните етапи от експерименталното изследване.

Избраната методика осигурява условия за реално осъществяване на експеримента според поставените цел и задачи в дисертационния труд. Експерименталните изследвания в дисертацията са резултат от анализ, обобщение и систематизиране на теории, нормативни документи и опити от проведени предишни изследвания.

ГЛАВА III

Систематизиране, обработка и анализ на получените резултати от експерименталното изследване върху пукнатините при стоманобетонни елементи, подложени на огъване

III.1.Експериментално определяне на якостни, деформационни характеристики и работни диаграми на използваните в изследванията бетон и армировъчна стомана. Анализ на резултатите

III.1.1.Определяне на якостни, деформационни характеристики и работни диаграми на бетона

III.1.1.1.Цилиндрична и кубова якост на натиск

Определени са средноаритметичните стойности на цилиндричната якост на натиск на възраст 3-ти ден - $17,3 \text{ N/mm}^2$, 7-ми ден - $23,2 \text{ N/mm}^2$, 14-ти ден - $27,9 \text{ N/mm}^2$, 28-ми ден - $30,1 \text{ N/mm}^2$ и в дните на изпитване на сериите греди, а именно на 244-ти ден (Серия А) - $35,1 \text{ N/mm}^2$, 280-ти ден (Серия В) - $35,7 \text{ N/mm}^2$, 293-ти ден (Серия D) - $36,2 \text{ N/mm}^2$, 342-ри ден (Серия С) - 37 N/mm^2 . Средноаритметичната стойност на кубовата якост на натиск на възраст 3-ти ден е $16,7 \text{ N/mm}^2$, на 7-ми ден е $25,4 \text{ N/mm}^2$, на 14-ти ден е $29,3 \text{ N/mm}^2$, на 28-ми ден е $34,3 \text{ N/mm}^2$ и в дните на изпитване на греди от серия А е 39 N/mm^2 , В е $39,5 \text{ N/mm}^2$, D е $40,2 \text{ N/mm}^2$ и С е $40,8 \text{ N/mm}^2$. Резултатите от изпитването са използвани за определяне на степените на натоварване на различните серии греди и тяхната носеща способност.

III.1.1.2.Якост на опън при разцепване

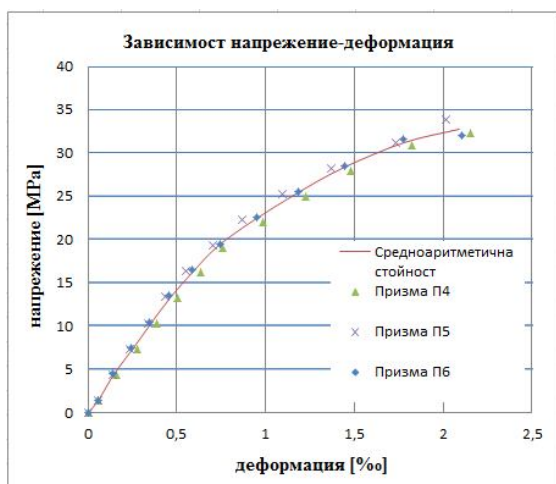
Определени са средноаритметичните стойности на възраст 3-ти ден - $1,38 \text{ N/mm}^2$, 7-ми ден - $1,7 \text{ N/mm}^2$, 14-ти ден - $1,9 \text{ N/mm}^2$, 28-ми ден - $3,1 \text{ N/mm}^2$ и в дните на изпитване на греди от серия А - $3,21 \text{ N/mm}^2$, В - $3,26 \text{ N/mm}^2$, D - $3,29 \text{ N/mm}^2$ и С - $3,33 \text{ N/mm}^2$. Резултатите от изпитването са използвани за определяне на очаквания при изпитването пукнатинообразуващ момент при различните серии греди.

III.1.1.3.Модул на еластичност

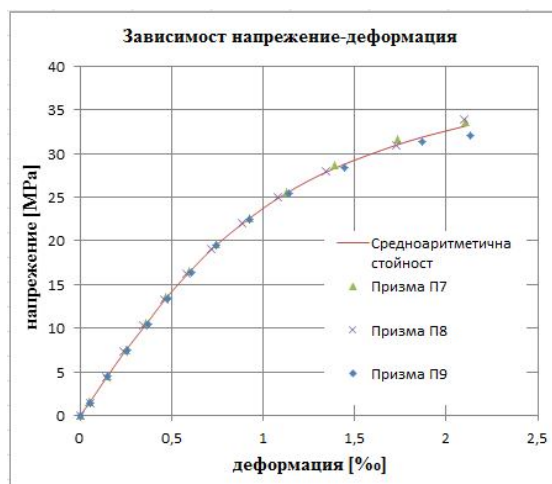
Средноаритметичната стойност на модула на еластичност на възраст 28-ми ден е $28033,3 \text{ N/mm}^2$. Тя е по-малка от проектната стойност според БДС EN 1992-1-1, която е

31000 N/mm^2 . Определени са и средноаритметичните стойности в дните на изпитване на греди серии А, В, D и С. Те са съответно $28809,1 \text{ N/mm}^2$, $28902,4 \text{ N/mm}^2$, $29022,5 \text{ N/mm}^2$ и $29160,4 \text{ N/mm}^2$. Резултатите от изпитването са използвани за определяне на очакваните провисвания при изпитването на различните серии греди.

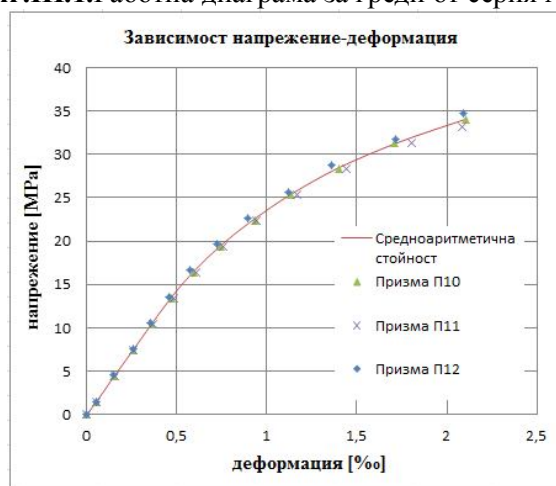
III.1.1.4.Работни диаграми (зависимост напрежение-деформация)



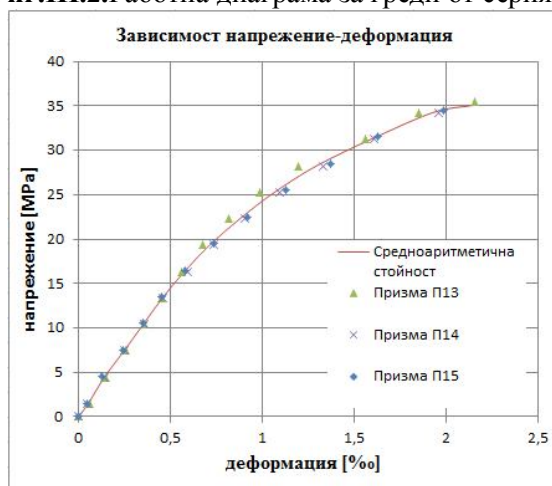
Фиг. III.1. Работна диаграма за греди от серия А



Фиг. III.2. Работна диаграма за греди от серия В



Фиг. III.3. Работна диаграма за греди от серия D

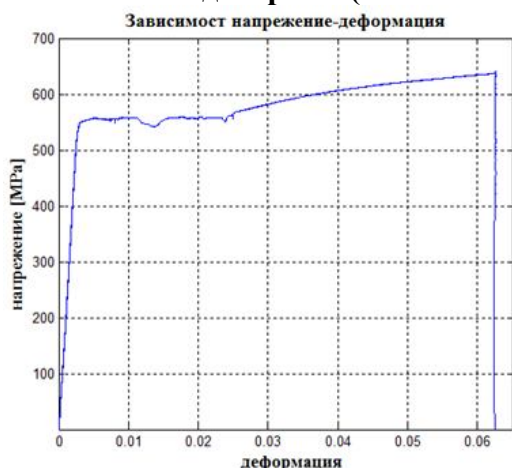


Фиг. III.4. Работна диаграма за греди от серия С

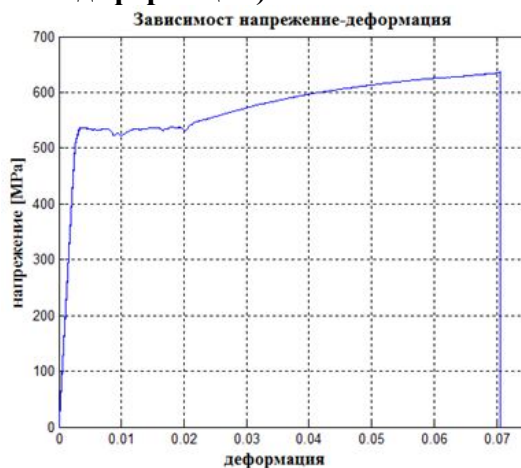
В зависимостите деформациите са дадени в ‰, а напреженията в МРa. Резултатите от изпитването на отделните призми са дадени като точки, а средноаритметичното от трите измервания е дадено с плътна линия.

III.1.2. Определяне на якостни, деформационни характеристики и работни диаграми на армировъчната стомана

III.1.2.1. Работни диаграми (зависимост напрежение-деформация)



Фиг. III.5. Работна диаграма - N12 (B500)

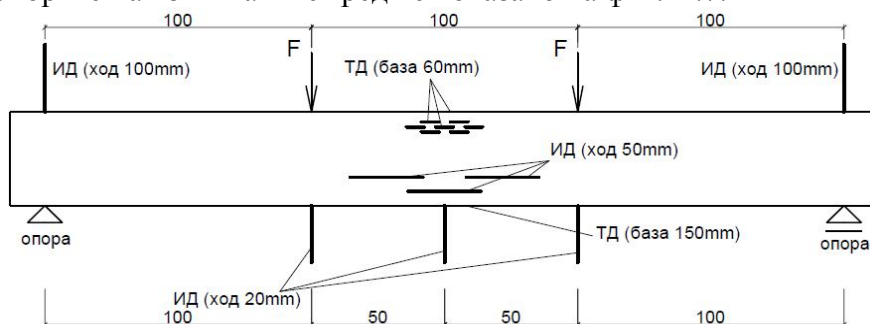


Фиг. III.6. Работна диаграма - N18 (B500)

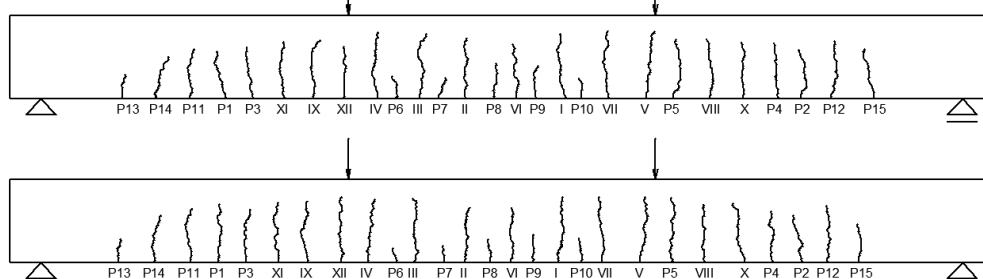
За армировъчни пръти с диаметър N12 и N18 (фиг.ІІІ.5,6) експериментално получената стойност на границата на провлачване е 535 МПа, а на модула на еластичност е 214 000 МПа.

ІІІ.2. Експериментални изследвания върху пукнатините при стоманобетонни елементи, подложени на огъване и анализ на резултатите

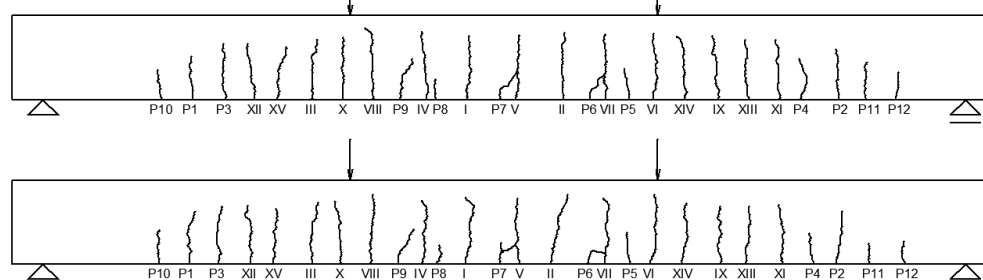
Разположението на различните измервателни преобразуватели, местоположението на натоварването и опорите на изпитваните греди е показано на фиг.ІІІ.7.



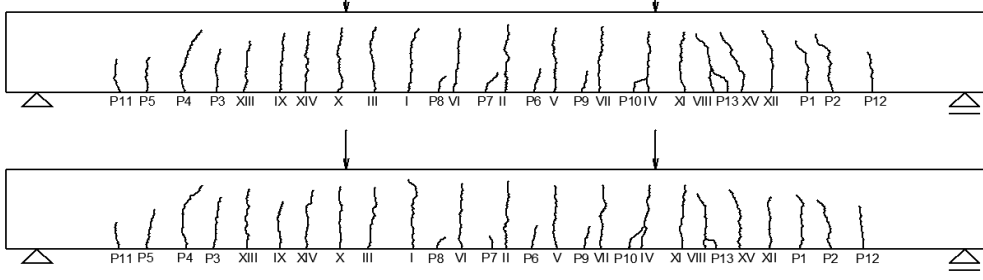
Фиг.ІІІ.7. Разположение на тензорезистори (ТД), индуктивни датчици (ИД) и натоварване на гредите



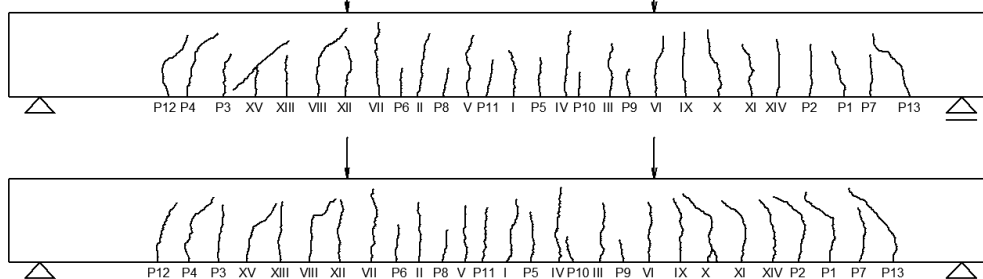
Фиг.ІІІ.8. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата A1



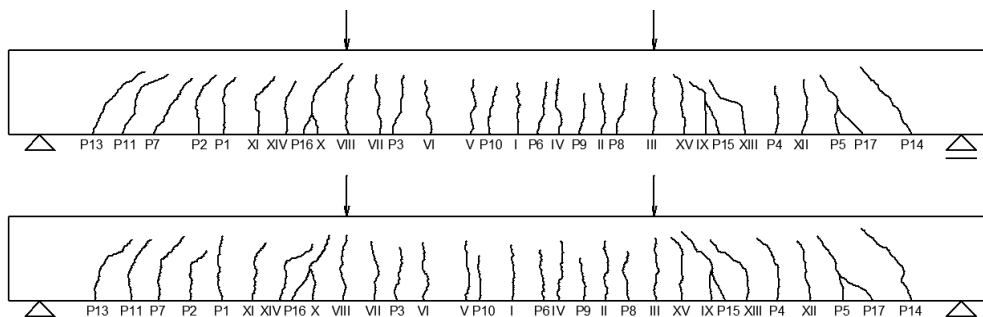
Фиг.ІІІ.9. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата A2



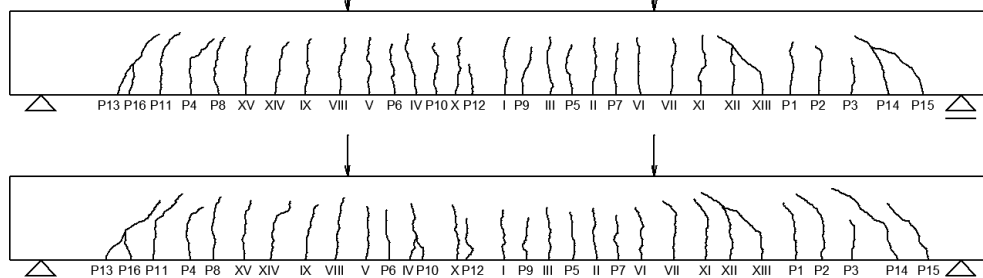
Фиг.ІІІ.10. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата A3



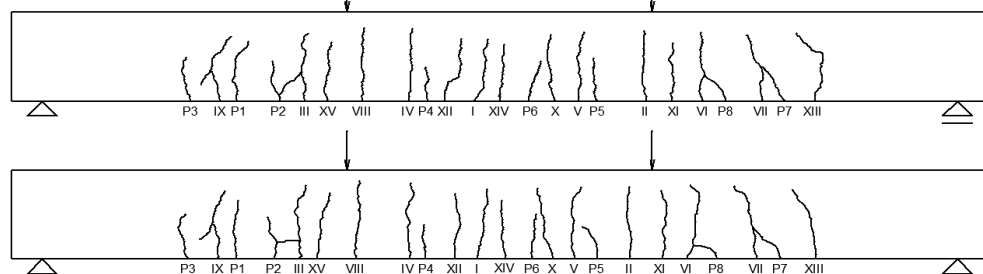
Фиг.ІІІ.11. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата B1



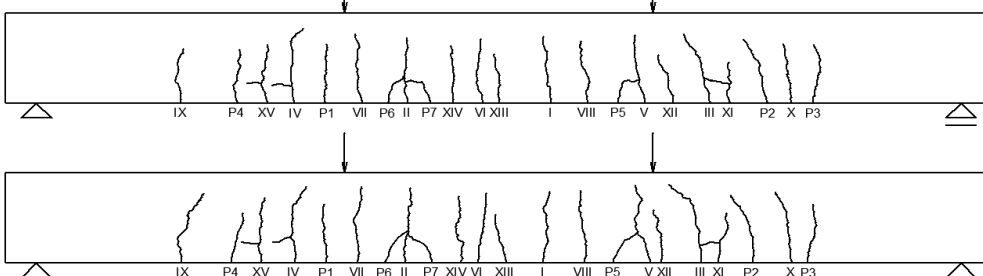
Фиг. III.12. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата B2



Фиг. III.13. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата B3

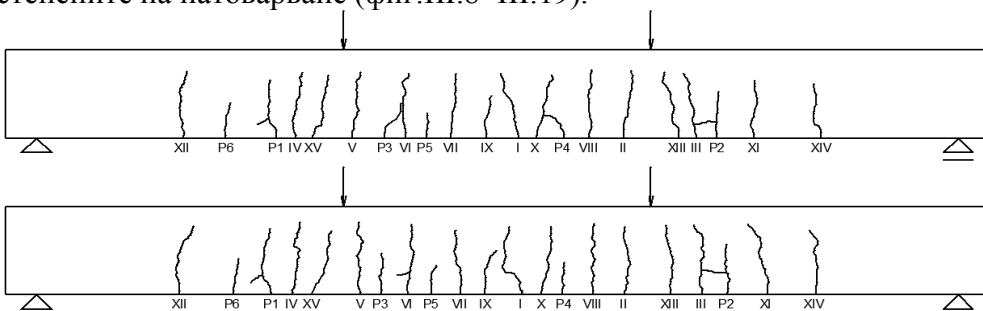


Фиг. III.14. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата C1

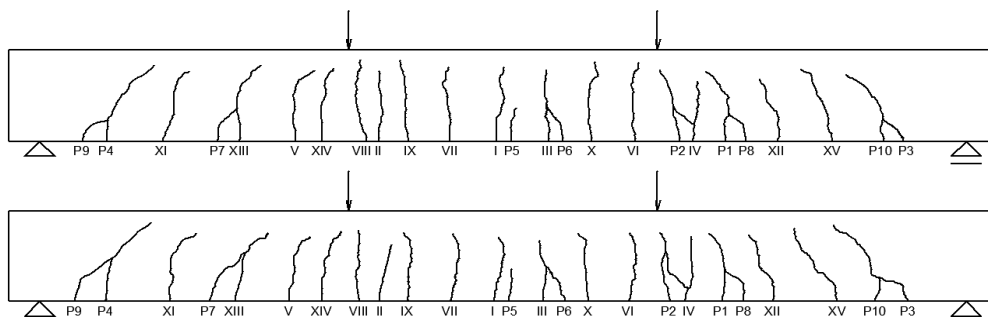


Фиг. III.15. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата C2

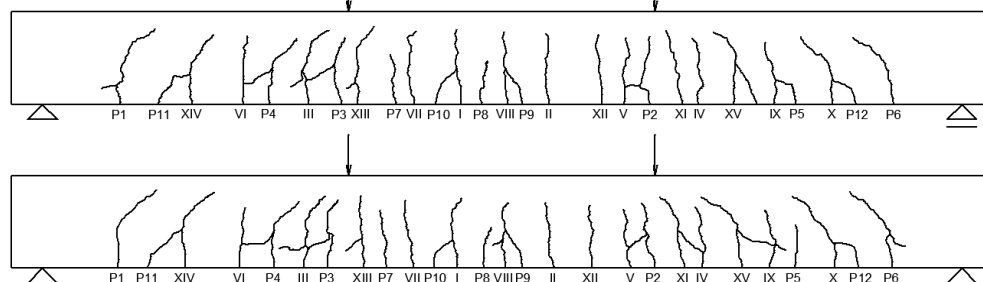
По време на експерименталните изследвания на двете странични повърхности на гредите са очертани получените пукнатини по реда на тяхното появяване и са отбелязани техните дълбочини при всяка от степените на натоварване (фиг. III.8÷III.19).



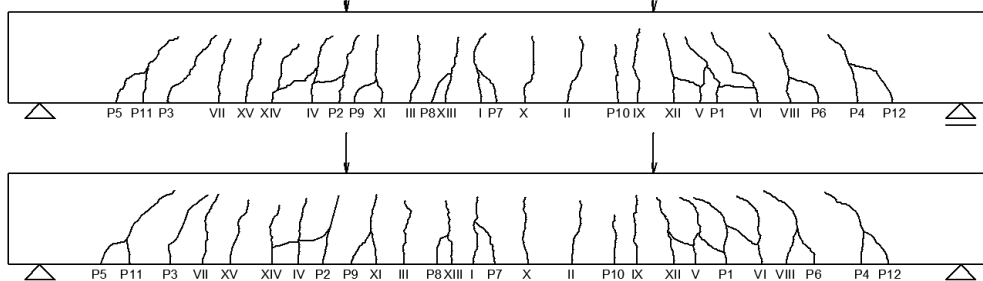
Фиг. III.16. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на гредата C3



Фиг. III.17. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на греда D1



Фиг. III.18. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на греда D2



Фиг. III.19. Разположение на пукнатините по двете странични повърхности на греда D3

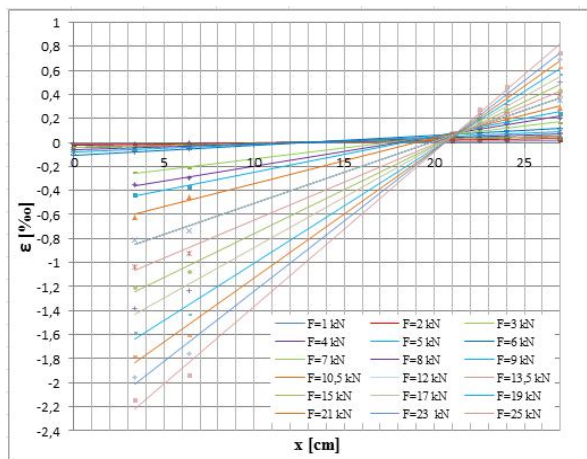
III.2.1. Деформирано състояние на напречното сечение

Определена е експериментално и теоретично височината на натисквата зона в участъка с постоянен огъващ момент (табл. III.10).

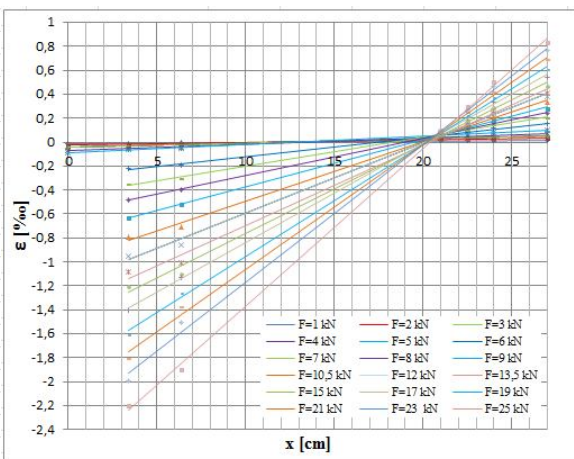
Табл. III.10. Височината на натисквата зона за различните греди.

Греда	Коефициент на армиране	Отношение ϕ / ρ_{eff}	Бетонно покритие	Преди образуване на първа пукнатина			След стабилизиране на пукнатинообразуването		
				Теоретична	Експериментална	Разлика	Теоретична	Експериментална	Разлика
-	-	[mm]	[mm]	[cm]	[cm]	[%]	[cm]	[cm]	[%]
A1	0,0064	554,3	28	13,8	13,8	0,00	6,1	6,2	1,64
A2	0,0064	554,3	28	13,8	13,9	0,72	6,1	6,4	4,92
A3	0,0064	554,3	28	13,8	13,8	0,00	6,1	6,4	4,92
B1	0,0145	329,5	28	14,1	14,2	0,71	8,4	8,8	4,76
B2	0,0145	329,5	28	14,1	14,2	0,71	8,4	8,6	2,38
B3	0,0145	329,5	28	14,1	14,2	0,71	8,4	8,6	2,38
C1	0,0064	634,6	58	15,2	15,2	0,00	6,1	7,1	16,39
C2	0,0064	634,6	58	15,2	15,3	0,66	6,1	7,2	18,03
C3	0,0064	634,6	58	15,2	15,1	0,66	6,1	7,0	14,75
D1	0,0145	382,6	58	15,5	15,5	0,00	8,4	9,5	13,10
D2	0,0145	382,6	58	15,5	15,5	0,00	8,4	9,8	16,67
D3	0,0145	382,6	58	15,5	15,4	0,65	8,4	9,2	9,52

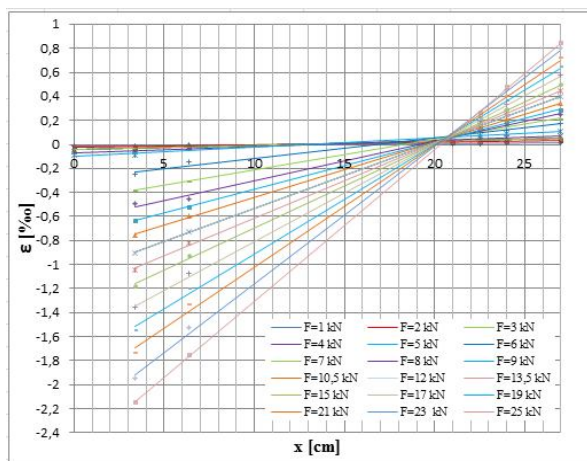
Графиките на деформираното състояние на напречното сечение за различните греди при различни степени на натоварване (фиг. III.20÷III.31) са построени от резултатите получени от тензорезисторите и индуктивните датчици.



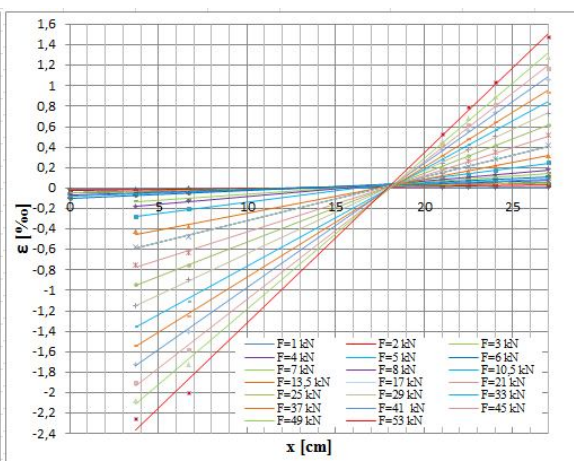
Фиг. III.20. Деформирано състояние за греда А1



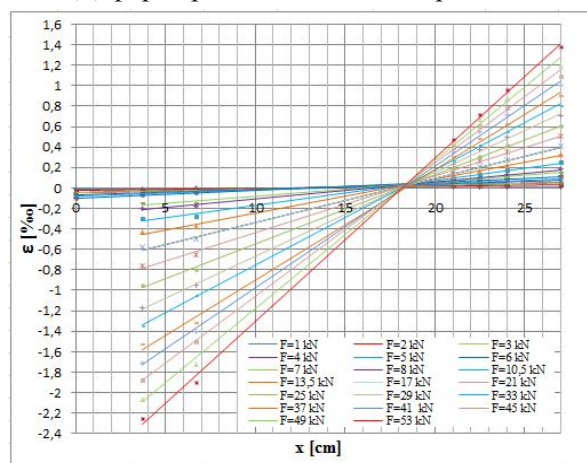
Фиг. III.21. Деформирано състояние за греда А2



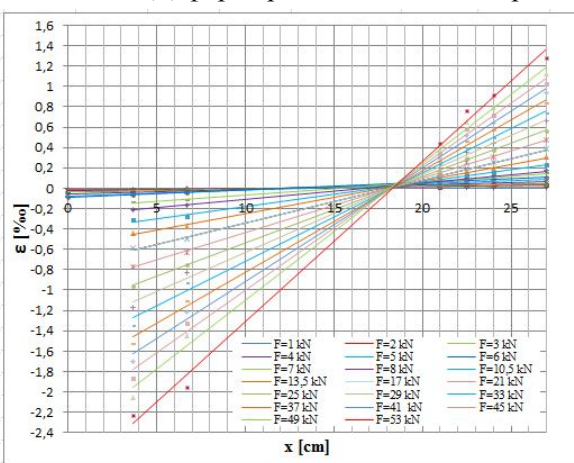
Фиг. III.22. Деформирано състояние за греда А3



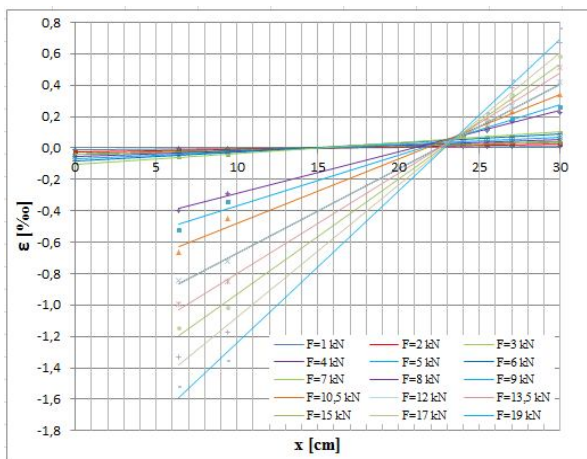
Фиг. III.23. Деформирано състояние за греда В1



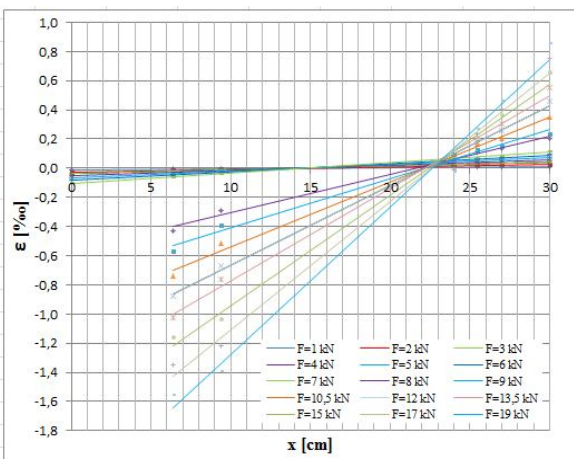
Фиг. III.24. Деформирано състояние за греда В2



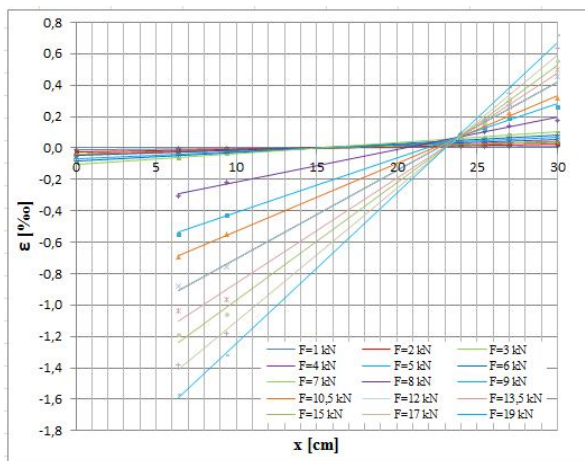
Фиг. III.25. Деформирано състояние за греда В3



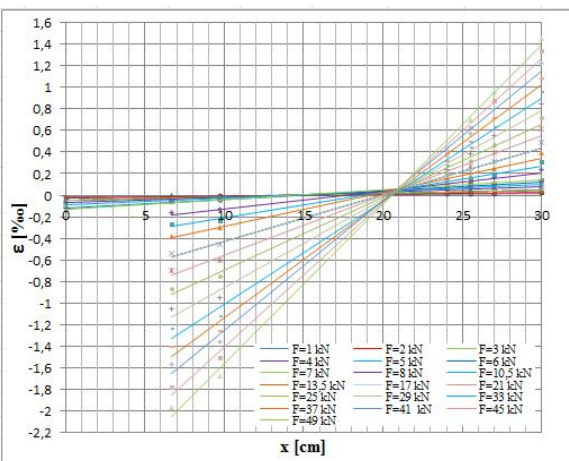
Фиг. III.26. Деформирано състояние за греда С1



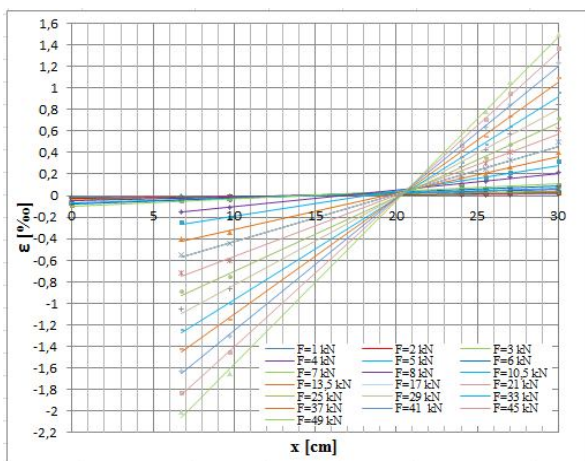
Фиг. III.27. Деформирано състояние за греда С2



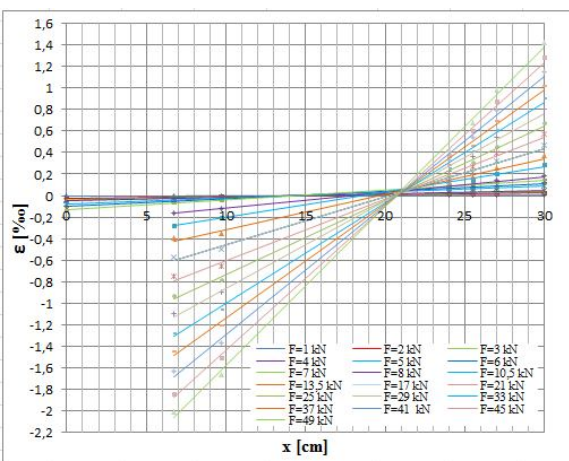
Фиг. III.28. Деформирано състояние за греда С3



Фиг. III.29. Деформирано състояние за греда D1



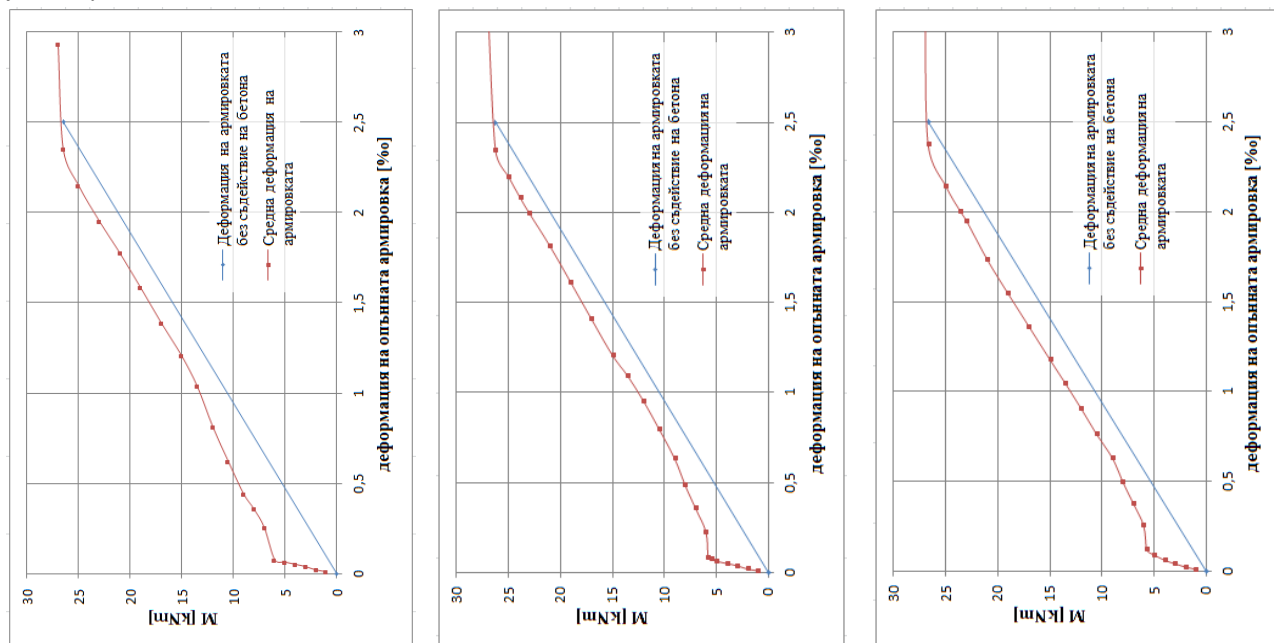
Фиг. III.30. Деформирано състояние за греда D2



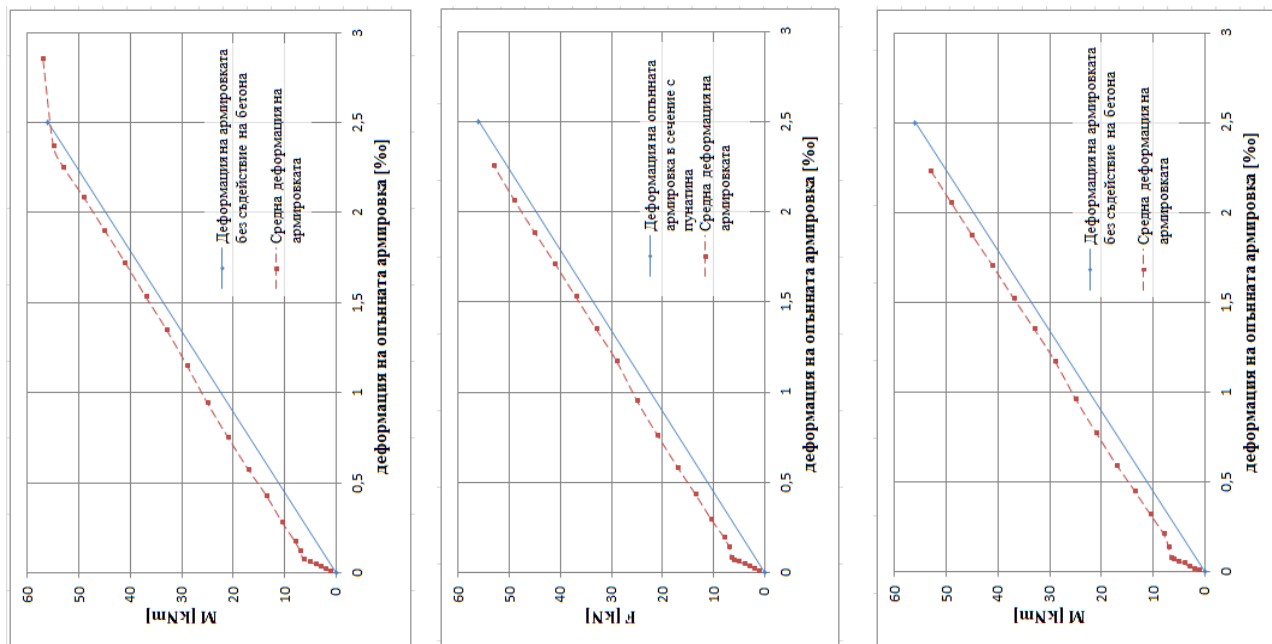
Фиг. III.31. Деформирано състояние за греда D3

III.2.2. Средна деформация на опънната армировка на ниво център на тежестта й. Определяне на пукнатинообразуващ момент

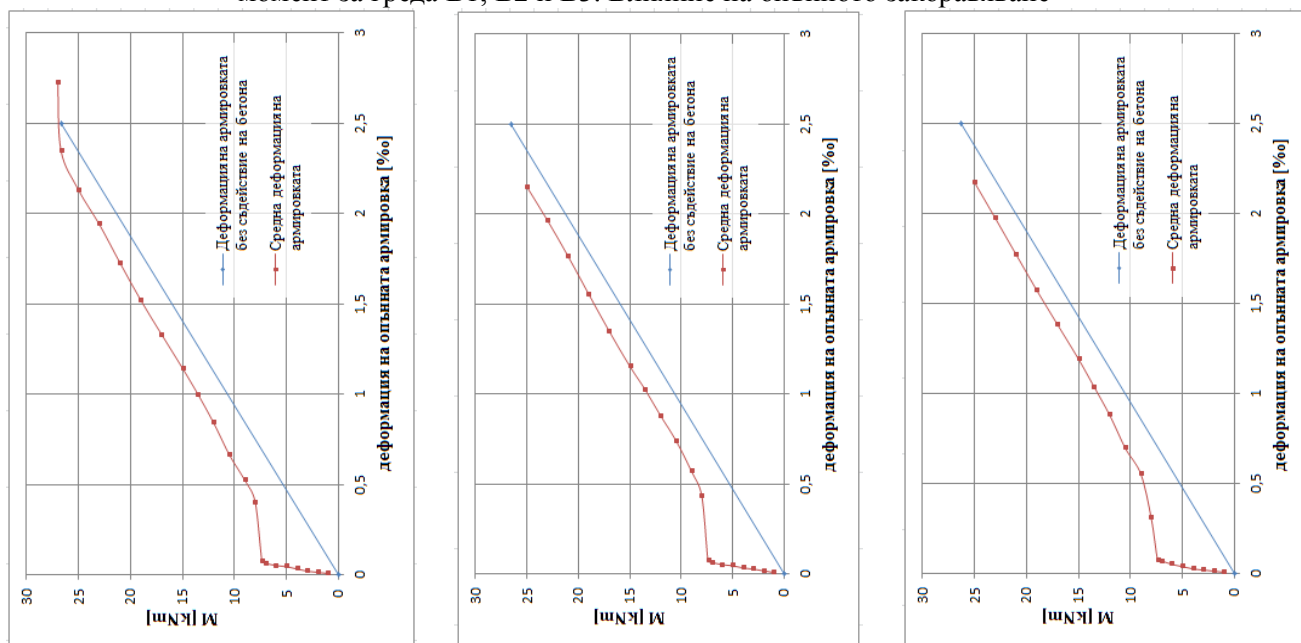
Експериментално получените зависимости на средната деформация на опънната армировка на ниво център на тежестта й в ‰ (mm/m) в участъка с постоянен огъващ момент във функция на огъващия момент (M) в kNm за серии греди А, В, С и D са показани на фиг. III.32, III.33, III.34 и III.35 с червен цвят. Деформацията на армировката без съдействие на бетона е показана със синя линия.



Фиг. III.32. Средна деформация на опънната армировка във функция на огъващия момент за греда A1, A2 и A3. Влияние на опънното закоравяване



Фиг. III.33. Средна деформация на опънната армировка във функция на огъващия момент за греди B1, B2 и B3. Влияние на опънното закоравяване



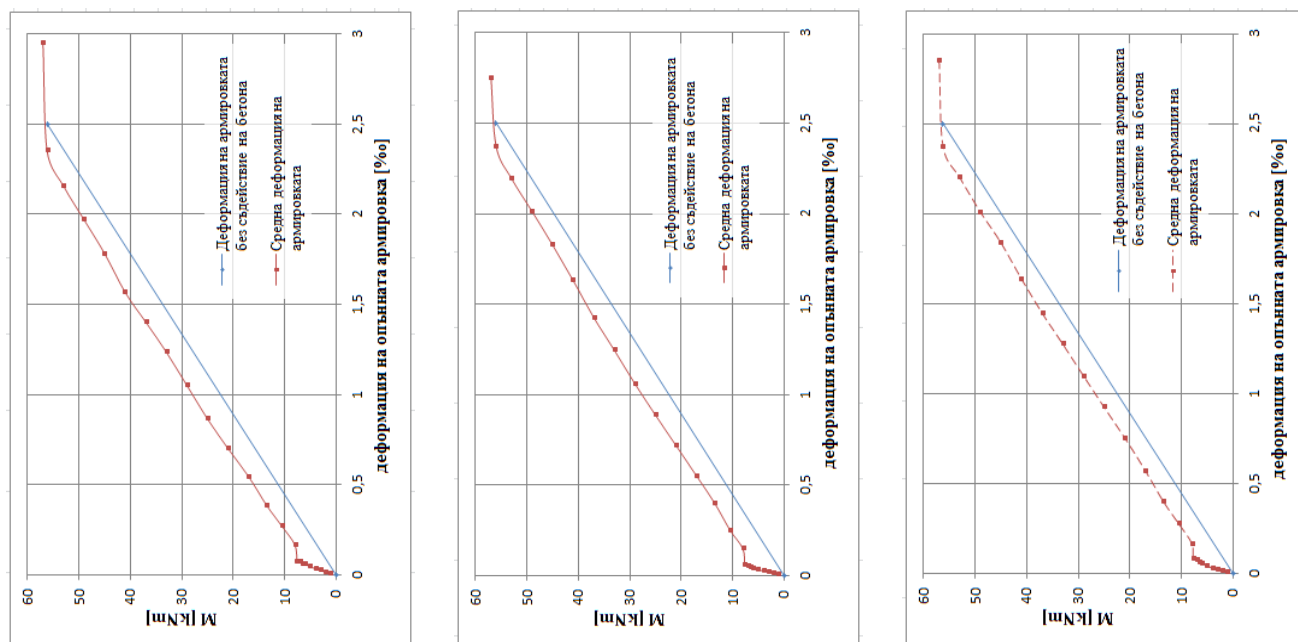
Фиг. III.34. Средна деформация на опънната армировка във функция на огъващия момент за греди C1, C2 и C3. Влияние на опънното закоравяване

От записа, получен от програмния продукт Catman Professional 5.0 за зависимостта на силата във времето, резултатите на тензорезисторите и индуктивните датчици експериментално са определени пукнатинообразуващите моменти за 12-те греди: A1 – 6,1 kNm, A2 – 5,8 kNm, A3 – 5,7 kNm, B1 – 6,35 kNm, B2 – 6,7 kNm, B3 – 6,6 kNm, C1 – 7,36 kNm, C2 – 7,39 kNm, C3 – 7,38 kNm, D1 – 7,55 kNm, D2 – 7,63 kNm, D3 – 7,7 kNm.

Стойностите на опънното закоравяване непосредствено преди образуване на първата пукнатина за различните греди са дадени в табл. III.11. С нарастване на отношението ϕ / ρ_{eff} нараства и стойността на опънното закоравяване. При греди с близки по стойност отношения ϕ / ρ_{eff} по-голяма стойност на опънното закоравяване имат тези с по-голямо бетонно покритие.

Табл. III.11. Експериментално определени стойности на опънното закоравяване преди образуване на първата пукнатина

Греда	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Опънно закоравяване [‰]	0,52	0,51	0,46	0,23	0,23	0,23	0,63	0,63	0,63	0,28	0,29	0,27



Фиг. III.35. Средна деформация на опънната армировка във функция на огъващия момент за греди D1, D2 и D3. Влияние на опънното закоравяване

III.2.3. Разстояние между пукнатините

За 12-те греди от различните серии А, В, С и D са определени експериментално максималното ($s_{r,max}$), средното ($s_{r,m}$) и минималното ($s_{r,min}$) разстояние между пукнатините в участъка с постоянен огъващ момент при различни стойности на огъващия момент (M).

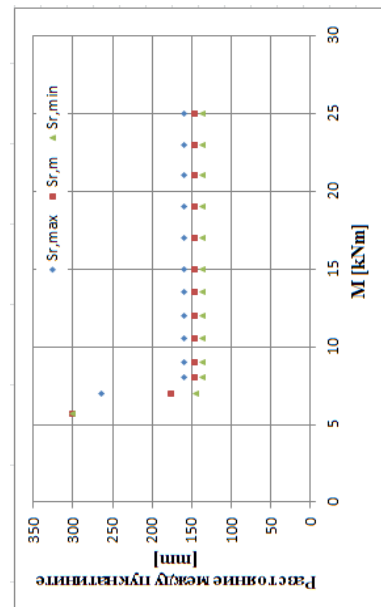
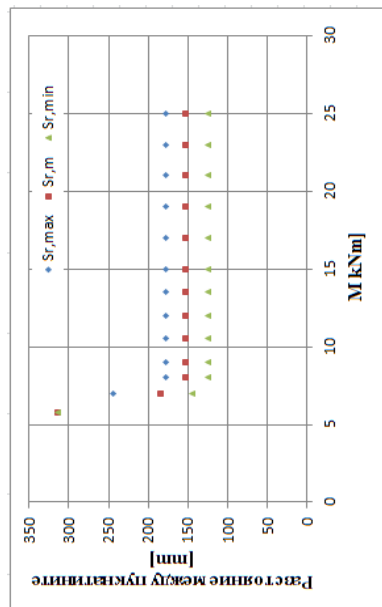
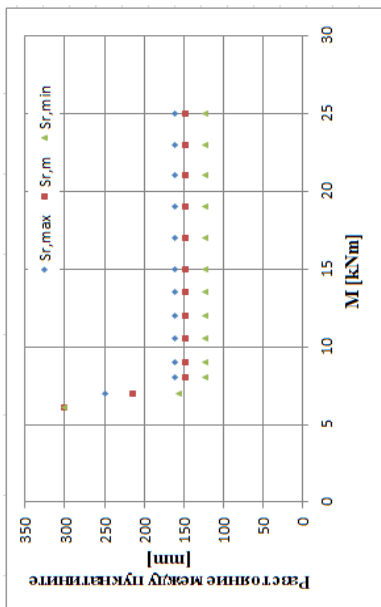
В табл. III.12 са показани експериментално получените $s_{r,max}$, $s_{r,m}$ и $s_{r,min}$ при стабилизирано пукнатинообразуване.

Табл. III.12. Експериментално определени $s_{r,max}$, $s_{r,m}$ и $s_{r,min}$

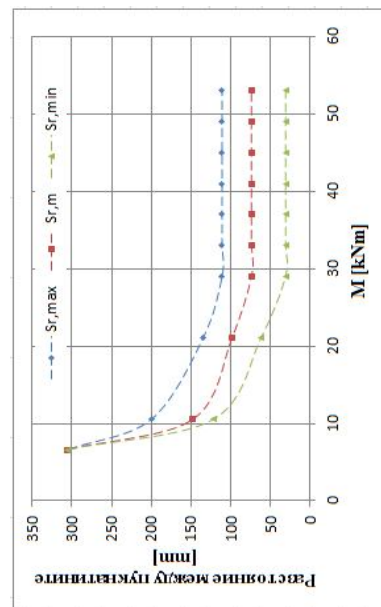
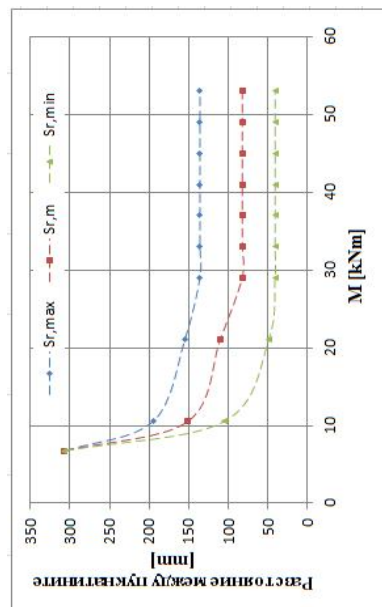
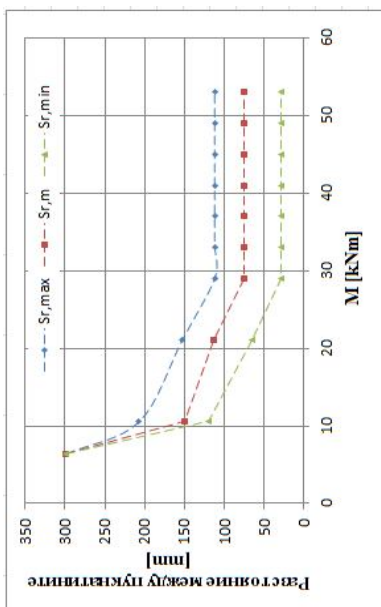
Греда	Коефициент на армиране	Отношение ϕ / ρ_{eff}	Бетонно покритие	Експериментално $s_{r,max}$	Експериментално $s_{r,m}$	Експериментално $s_{r,min}$	$s_{r,max} / s_{r,m}$
-	-	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	-
A1	0,0064	554,3	28	161	148,2	124	1,09
A2	0,0064	554,3	28	178	152,8	125	1,16
A3	0,0064	554,3	28	159	146,8	136	1,08
B1	0,0145	329,5	28	112	75,3	29	1,49
B2	0,0145	329,5	28	136	82,5	41	1,65
B3	0,0145	329,5	28	111	73,9	31	1,50
C1	0,0064	634,6	58	239	180,4	86	1,32
C2	0,0064	634,6	58	243	186,6	125	1,30
C3	0,0064	634,6	58	254	174,2	107	1,46
D1	0,0145	382,6	58	153	98,9	43	1,55
D2	0,0145	382,6	58	134	84,2	45	1,59
D3	0,0145	382,6	58	137	89,2	41	1,54

Експериментално определените $s_{r,max}$, $s_{r,m}$ и $s_{r,min}$ в участъка с постоянен огъващ момент при различни стойности на огъващия момент са показани на фиг. III.36-III.39.

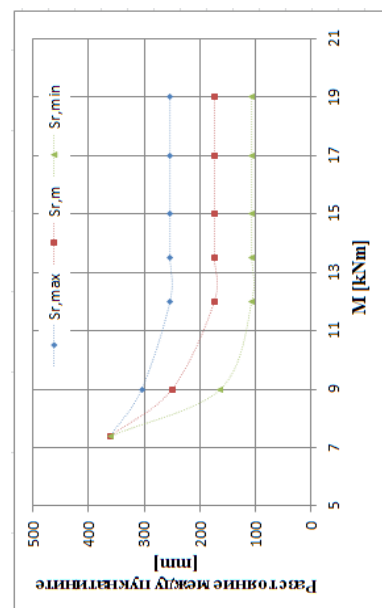
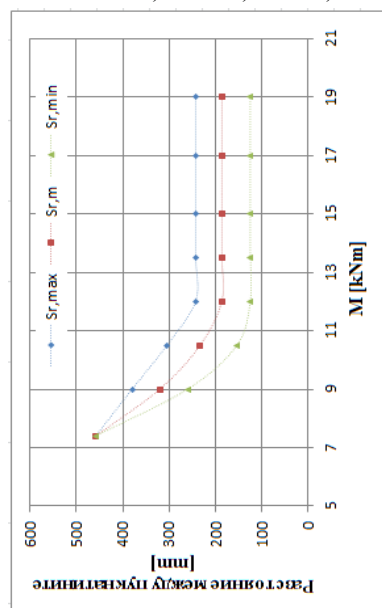
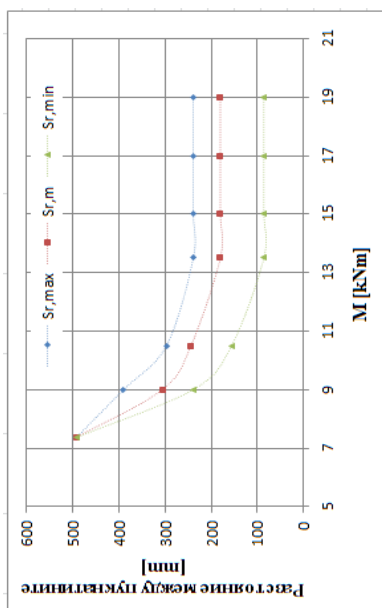
При греди с еднакъв коефициент на армиране, близки стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} и различно бетонно покритие с увеличаване на бетонното покритие се увеличават $s_{r,max}$ и $s_{r,m}$. При греди с еднакво бетонно покритие, различен коефициент на армиране и чувствително различаващи се стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} с увеличаване на ϕ / ρ_{eff} се увеличават $s_{r,max}$ и $s_{r,m}$. С увеличаване на отношението ϕ / ρ_{eff} (ϕ / ρ_{eff} серия C > ϕ / ρ_{eff} серия A > ϕ / ρ_{eff} серия D > ϕ / ρ_{eff} серия B) се увеличават $s_{r,max}$ и $s_{r,m}$. Отношението $s_{r,max} / s_{r,m}$ при различните греди варира от 1,08 до 1,65, т.е. потвърждава се, че $s_{r,max} \approx 1,7 s_{r,m}$, което се приема според EC2.



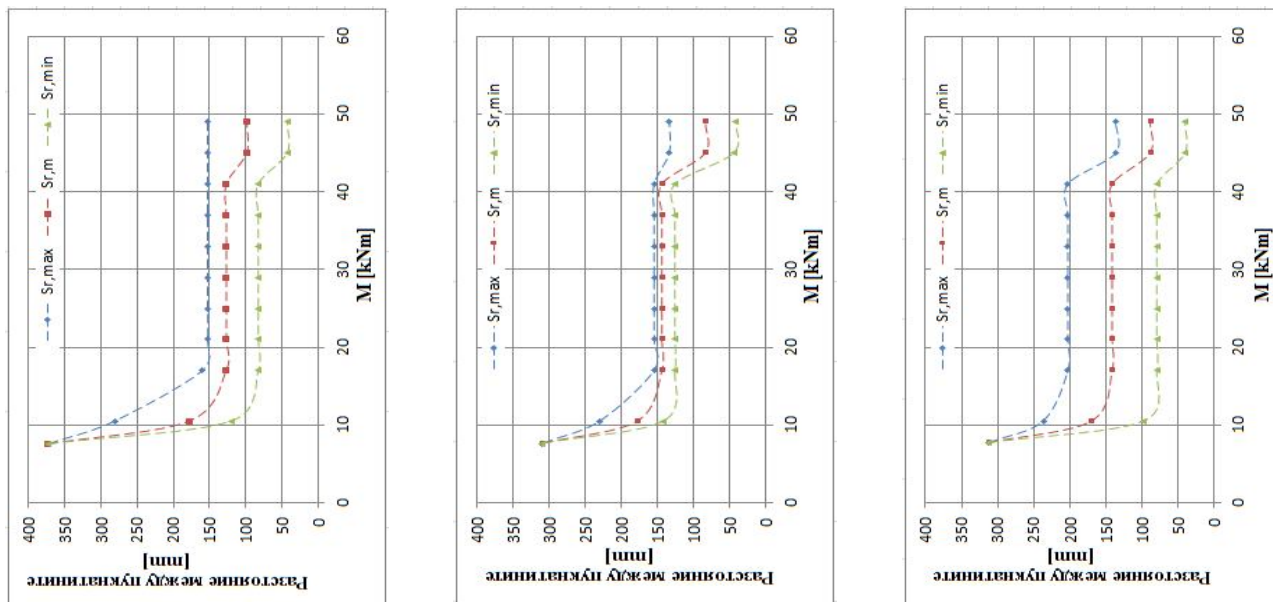
Фиг.ІІІ.36.Експериментално определени $s_{r,max}$, $s_{r,m}$ и $s_{r,min}$ при различни M за греди A1, A2 и A3



Фиг.ІІІ.37.Експериментално определени $s_{r,max}$, $s_{r,m}$ и $s_{r,min}$ при различни M за греди B1, B2 и B3



Фиг.ІІІ.38.Експериментално определени $s_{r,max}$, $s_{r,m}$ и $s_{r,min}$ при различни M за греди C1, C2 и C3



Фиг. III.39. Експериментално определени $s_{r,max}$, $s_{r,m}$ и $s_{r,min}$ при различни M за греди D1, D2 и D3

Стабилизирано пукнатинообразуване се достига при стойности на огъващия момент за греди от серия А - 8 kNm, за В - 29 kNm, за С - 12 kNm÷13,5 kNm и за D - 49 kNm.

III.2.4. Средна ширина на пукнатините

Средната ширина на пукнатините (w_m) в участъка с постоянен огъващ момент при различни стойности на огъващия момент е определена по два начина и са дадени в табл. III.13-III.16 в дисертацията. Първият е чрез експериментално измерване на широчините на пукнатините в този участък и определяне на тяхната средноаритметична стойност. Вторият е посредством изчисляване по формулата $w_m = s_{r,m}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$, където стойностите на параметрите в дясната страна на уравнението са експериментално определени.

Близките стойности на получените по двата начина резултати за 12-те греди доказват достоверността на направените експериментални измервания за широчината на пукнатините. Разликите се дължат на допустимите грешки при измерванията. Последната описана в таблиците стойност на огъващия момент е тази, при която се получава 0,3 mm широчина на максималната пукнатина (w_{max}).

III.2.5. Максимална ширина на пукнатините

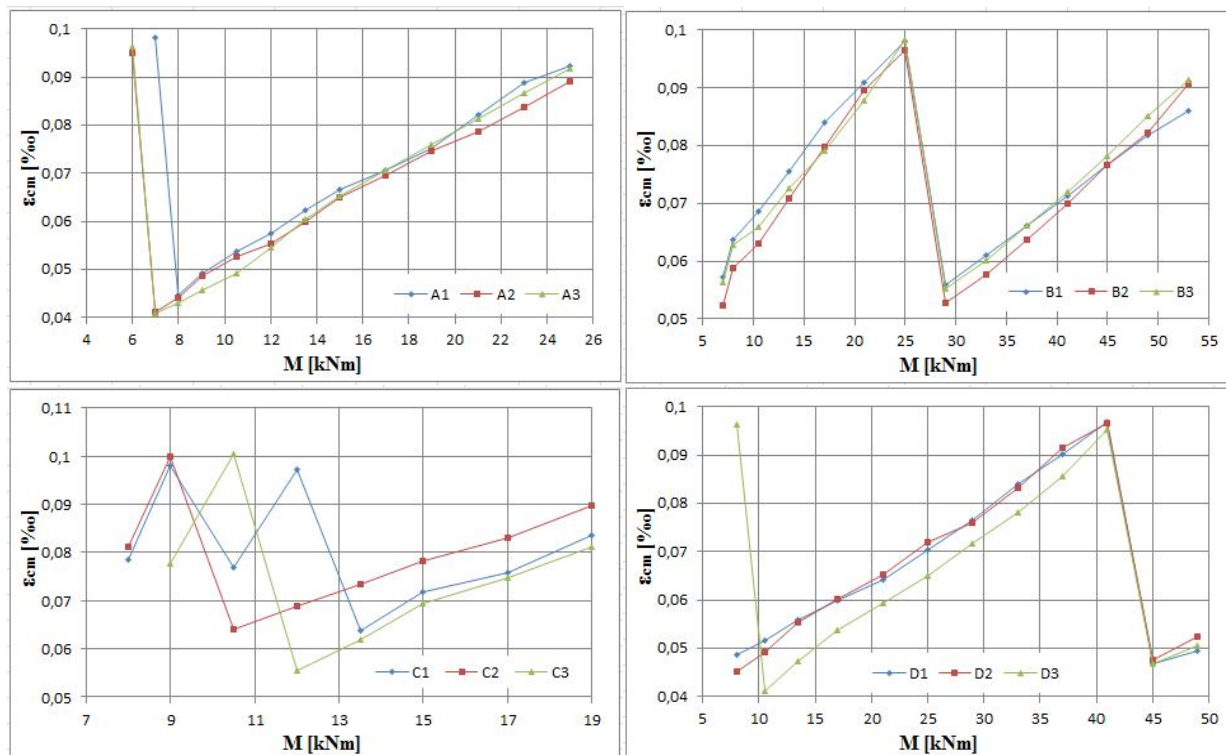
Експериментално получените широчини на всички пукнатини, средните w_m и максимални w_{max} широчини на пукнатините в участъка с постоянен огъващ момент при различни стойности на огъващия момент за всяка от 12-те греди са дадени в таблици III.17-III.28 в дисертацията. $w_{max} = 0,3$ mm се достига при стойност на огъващия момент 25 kNm за греди от серия А ($\sigma_s = 514,10$ MPa), 53 kNm за серия В ($\sigma_s = 509,20$ MPa), 19 kNm за серия С ($\sigma_s = 390,50$ MPa), 49 kNm за серия D ($\sigma_s = 470,80$ MPa).

При елементи с еднакъв коефициент на армиране, близки стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} и различно бетонно покритие $w_{max} = 0,3$ mm се достига при по-малка стойност на огъващия момент за греди с по-голямо бетонно покритие. При греди с еднакво бетонно покритие, различен коефициент на армиране и чувствително различаващи се стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} $w_{max} = 0,3$ mm се достига при по-малка стойност на огъващия момент за греди с по-голямо ϕ / ρ_{eff} . Отношението на w_{max} / w_m при различните степени на натоварване за греди от серия А варира от 1 до 1,40 и за серия С от 1 до 1,36, т.е. е по-малко от 1,7, което се приема според EC2. За серия В варира от 1 до 1,83 и за серия D от 1 до 1,79.

III.2.6. Средна деформация на бетона между две пукнатини на ниво център на тежестта на опънатата армировка. Средно напрежение на бетона между две пукнатини за опънатия ръб на сечението

Средната деформация на бетона на ниво център на тежестта на опънатата армировка за различни стойности на огъващия момент в участъка с постоянен огъващ момент (фиг. III.40÷III.43)

е определена между две съседни пукнатини, използвайки експериментално получените резултати за средната деформация на армировката между тях, измерените широчини и разстояние между пукнатините. За определяне на средната деформация на армировката между двете пукнатини на ниво центъра на тежестта ѝ са използвани резултатите от тензорезисторите, разположени в натисквата зона на сечението и хипотезата на Бернули.

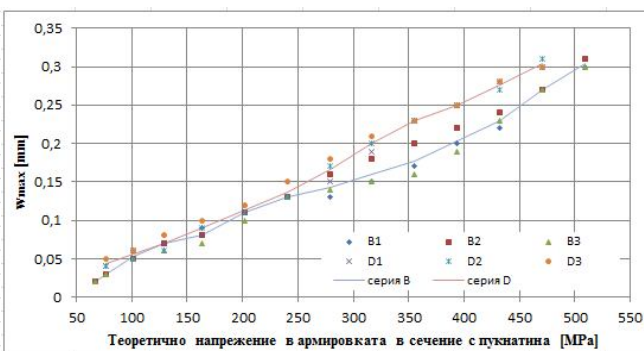
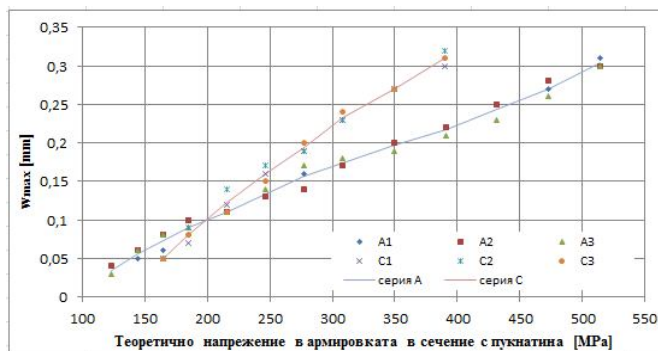


Фиг. III.40-43. Средната деформация на бетона между две съседни пукнатини при различни стойности на огъващия момент за различните серии греди

Определено е средното напрежение на бетона между две пукнатини за опънатия ръб на сечението σ_{ct} непосредствено преди появяването на нова пукнатина между тях за 12-те греди.

С нарастване на деформациите в опънатата зона новите пукнатини се образуват при по-ниски стойности на опънните напрежения в бетона. В зависимост от стойността на деформацията в опънатата зона, при която се образува нова пукнатина стойностите на напрежението в бетона преди образуването ѝ са с от 21,3% до 79,4% по-ниски от тези при образуване на първата пукнатина. Това е и причината експерименталните разстояния между пукнатините и техните широчини да са по-малки от изчислените според ЕС2, където се приема, че якостта на бетона на опън не се променя с нарастване на деформациите.

III.2.7. Влияние на бетонното покритие върху широчината на пукнатините и разстоянието между тях

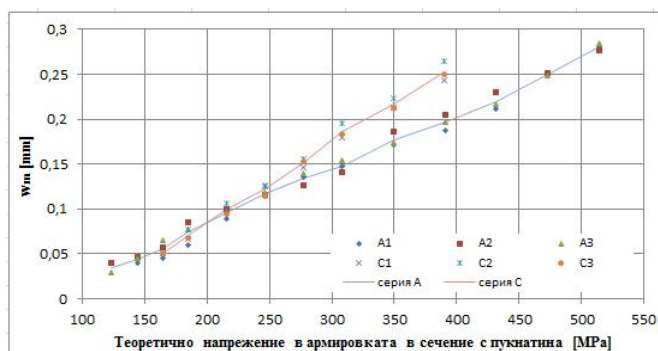


Фиг. III.44. Влияние на c_{nom} върху w_{max} – греди А и С

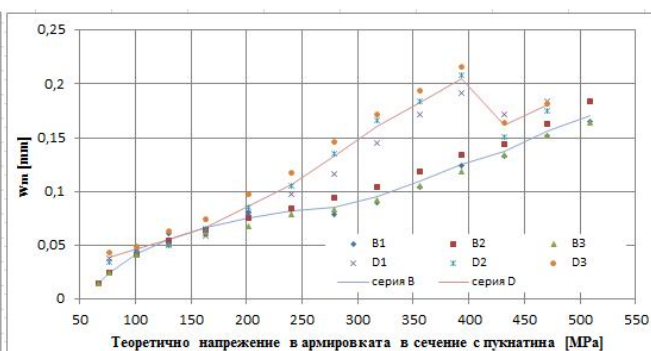
Фиг. III.45. Влияние на c_{nom} върху w_{max} – греди В и D

Влиянието на бетонното покритие (c_{nom}) върху широчина на пукнатините и разстоянието между тях в участъка с постоянен огъващ момент е определено отделно за греди серия А ($\phi / \rho_{eff} = 554,3mm$) и С ($\phi / \rho_{eff} = 634,6mm$) и греди серия В ($\phi / \rho_{eff} = 329,5mm$) и D

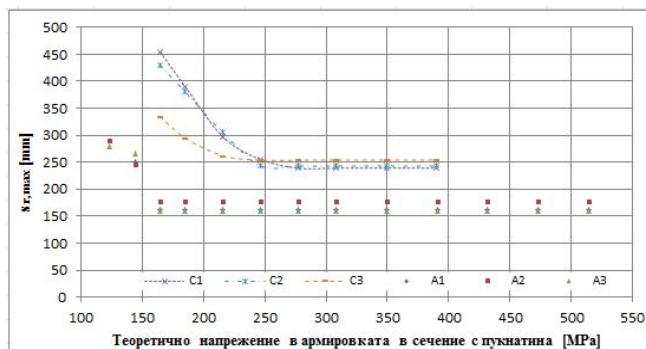
($\phi / \rho_{eff} = 382,6 \text{ mm}$). Причина за това са близките стойности на отношенията ϕ / ρ_{eff} . По този начин може по-точно да се оцени влиянието на бетонното покритие, като почти се пренебрегне влиянието на ϕ / ρ_{eff} върху параметрите на пукнатините. Експериментално определената ширина на пукнатините (фиг. III.44-III.47) е показана във функция на теоретично определеното напрежение в армировката в сечение с пукнатина (σ_s), което е изчислено за всяка от различните степени на натоварване. Експериментално определеното разстояние между пукнатините във функция на σ_s е показано на фиг. III.48-III.51. Разликите в w_{max} , w_m , $s_{r,max}$ и $s_{r,m}$ при едно и също σ_s показват влиянието на c_{nom} .



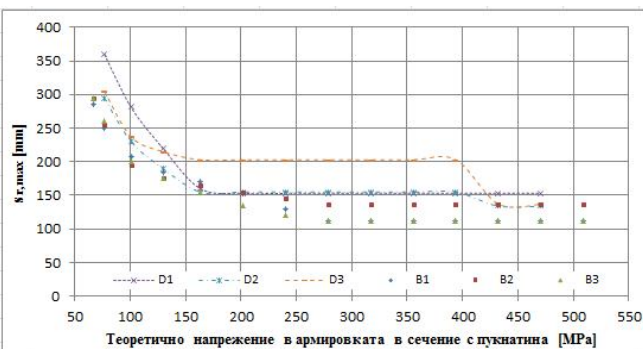
Фиг. III.46. Влияние на c_{nom} върху w_m – греди А и С



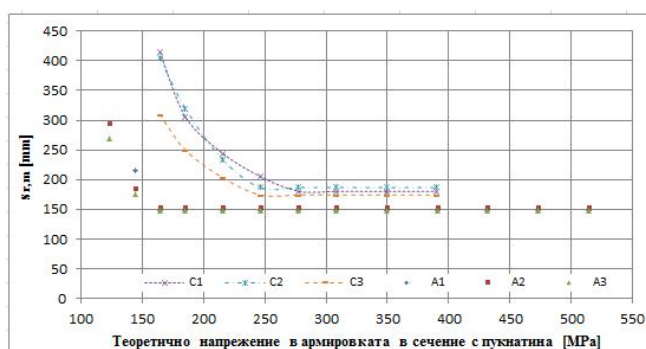
Фиг. III.47. Влияние на c_{nom} върху w_m – греди В и Д



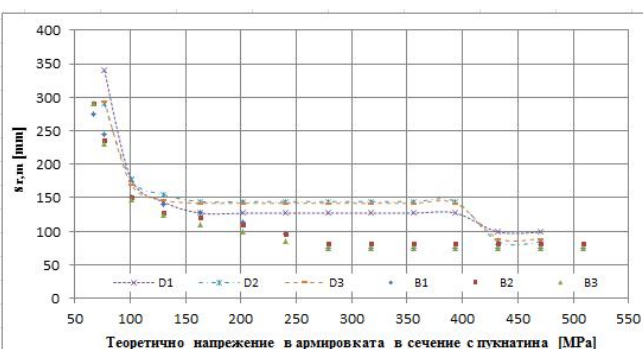
Фиг. III.48. Влияние на c_{nom} върху $s_{r,max}$ – греди А и С



Фиг. III.49. Влияние на c_{nom} върху $s_{r,max}$ – греди В и Д



Фиг. III.50. Влияние на c_{nom} върху $s_{r,m}$ – греди А и С



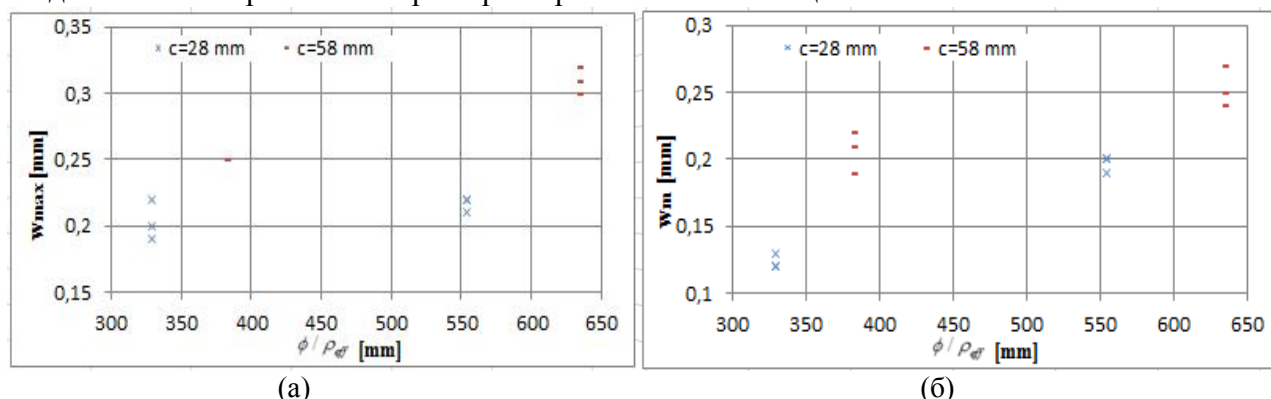
Фиг. III.51. Влияние на c_{nom} върху $s_{r,m}$ – греди В и Д

III.2.8. Влияние на отношението ϕ / ρ_{eff} върху широчината на пукнатините и разстоянието между тях

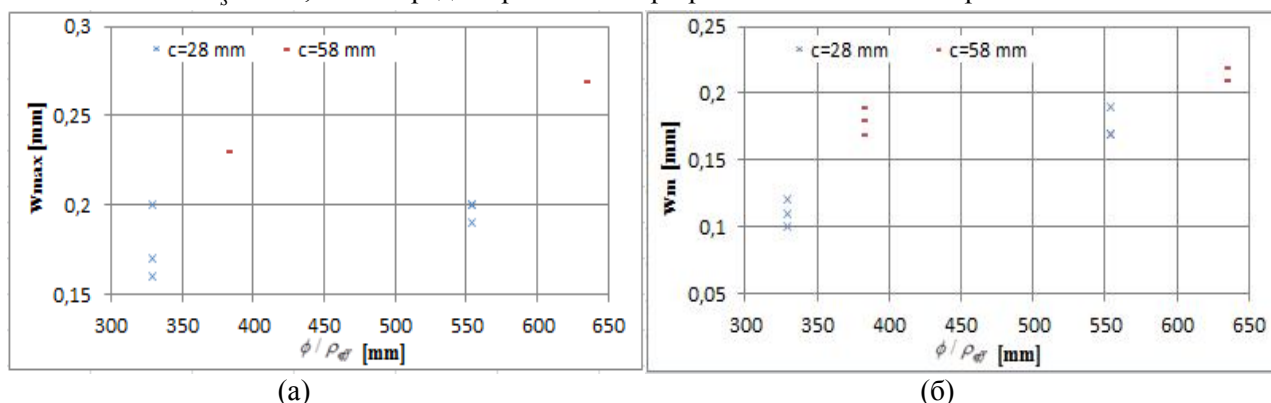
Експериментално е изследвано влиянието на отношението ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} , w_m (фиг. III.52÷III.54), $s_{r,max}$ (фиг. III.55) и $s_{r,m}$ (фиг. III.56) в участъка с постоянен огъващ момент при различни стойности на огъващия момент, като за тях теоретично е определено напрежението в опънната армировка в сечение с пукнатина. Изследванията са направени за бетонни покрития 28 mm и 58 mm.

На фиг. III.54 е показана зависимостта на максималната и средната ширина на пукнатините от отношението ϕ / ρ_{eff} за $\sigma_s = 215,8 \text{ MPa} / 246,8 \text{ MPa} / 277,5 \text{ MPa} / 308,5 \text{ MPa}$ за греди серии А и С и

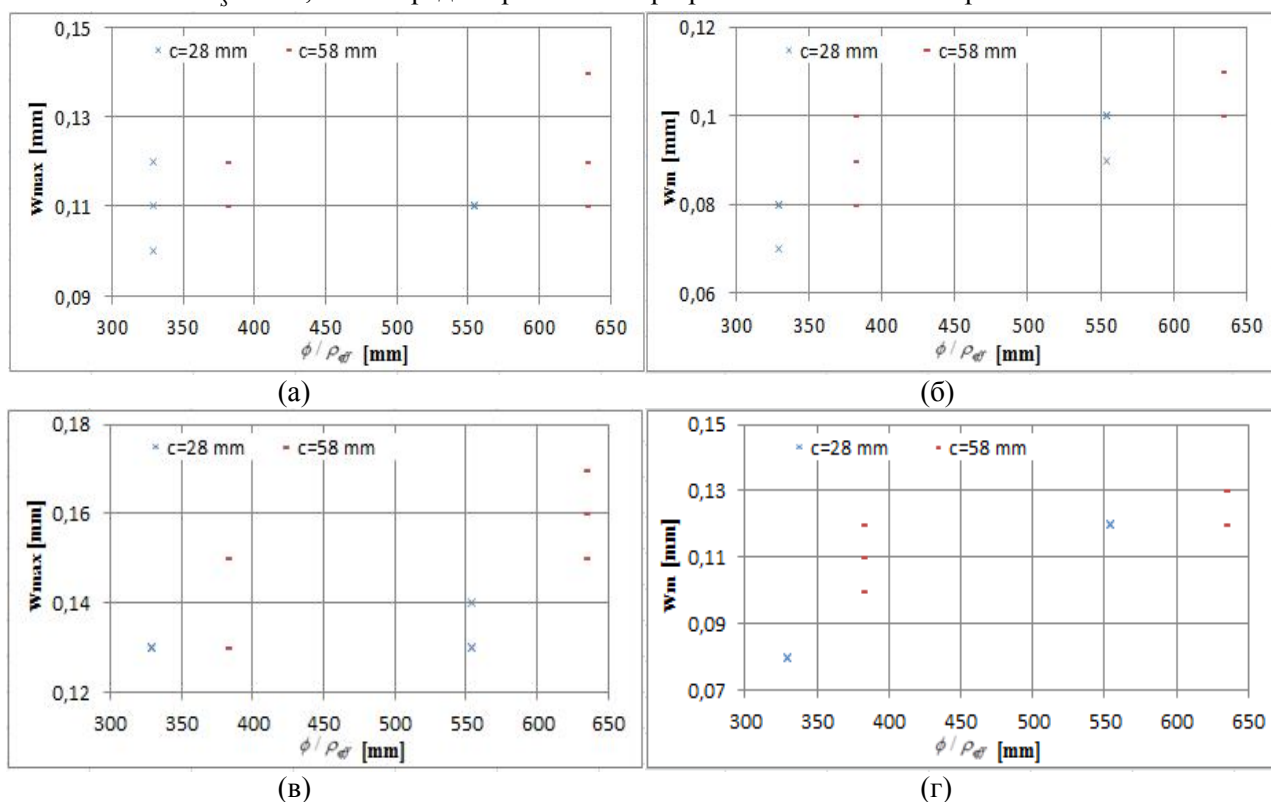
$\sigma_s = 201,8 \text{ MPa} / 240,2 \text{ MPa} / 278,6 \text{ MPa} / 317,1 \text{ MPa}$ за греди серии В и D при различни бетонни покрития. Тези напрежения съответстват на различни квазипостоянни комбинации на натоварванията, зависещи от категорията на помещенията в сградите и съоръженията и коефициентите на съчетание ψ_2 . Напреженията σ_s при тези квазипостоянни комбинации варират от 60 % до 90 % от напреженията при характеристична комбинация.

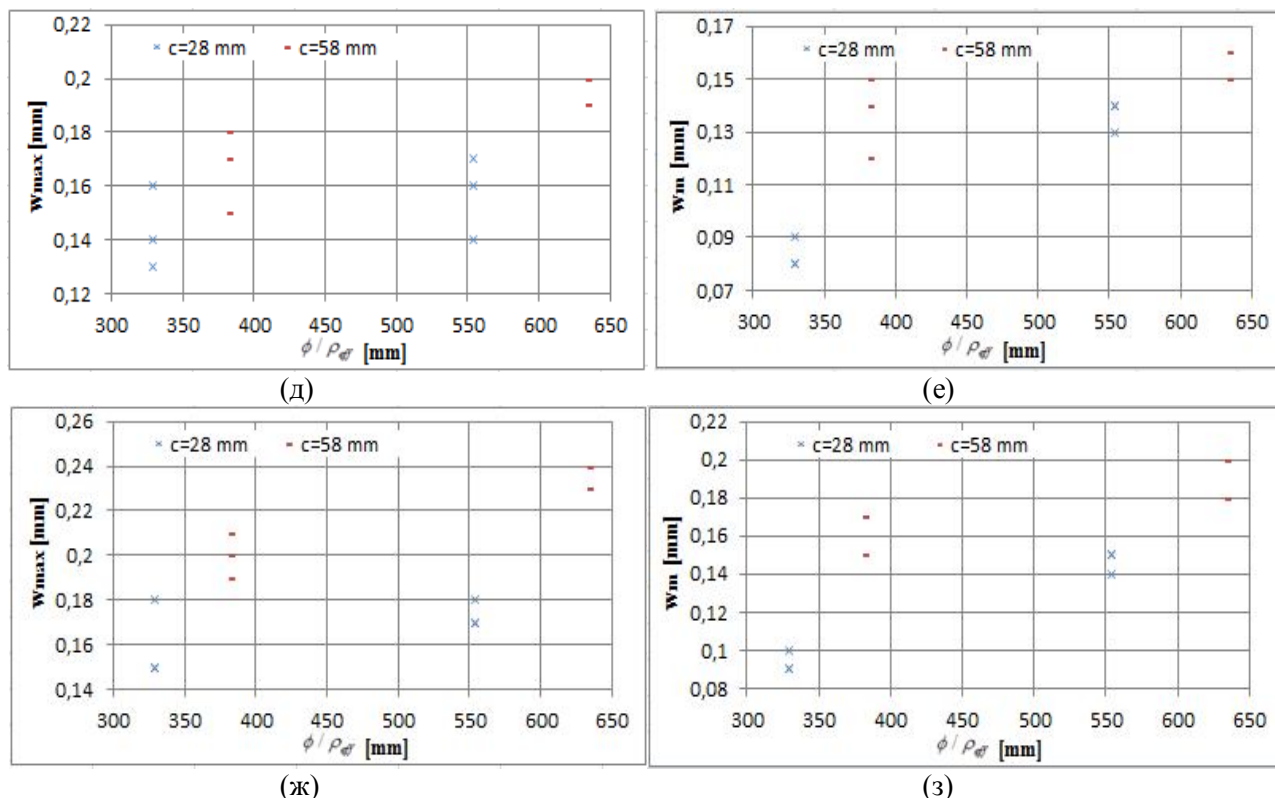


Фиг. III.52. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} (а) и w_m (б) при $\sigma_s = 390,5 \text{ MPa}$ за греди серии А и С и за $\sigma_s = 393,9 \text{ MPa}$ греди серии В и D при различни бетонни покрития



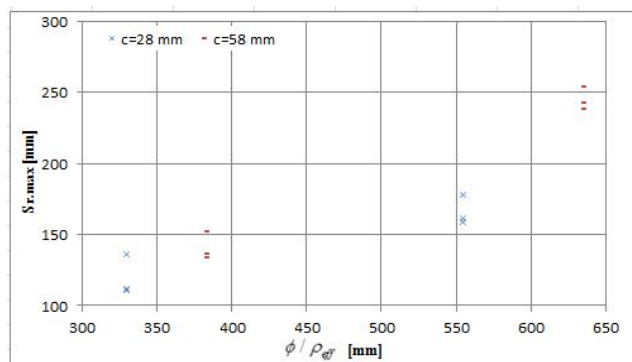
Фиг. III.53. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} (а) и w_m (б) при $\sigma_s = 349,6 \text{ MPa}$ за греди серии А и С и за $\sigma_s = 355,5 \text{ MPa}$ греди серии В и D при различни бетонни покрития



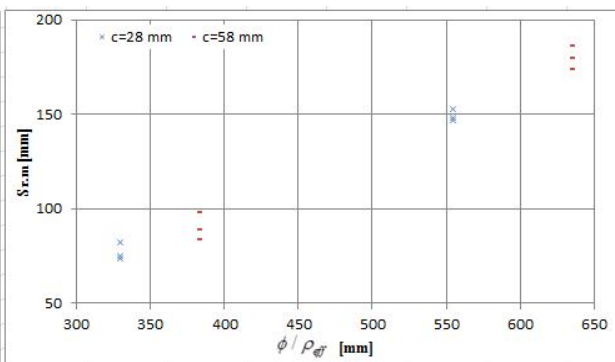


Фиг. III.54. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} и w_m при различни бетонни покрития за квазипостоянни комбинации на натоварванията в зависимост от функцията на сградата

На фиг. III.55 и фиг. III.56 са показани експериментално определените $s_{r,max}$ и $s_{r,m}$ при стабилизирано пукнатинообразуване в участъка с постоянен огъващ момент във функция на ϕ / ρ_{eff} при различни стойности на бетонното покритие.



Фиг. III.55. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху $s_{r,max}$



Фиг. III.56. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху $s_{r,m}$

III.3. Обобщение и изводи

Въз основа на проведените експериментални изследвания могат да се направят следните обобщения и изводи:

- с проведените съпътстващи изпитвания на бетона и армировъчната стомана са уточнени параметрите и характеристиките на вложените материали, които оказват важна роля и влияние при определяне на степените на натоварване и носещата способност, очакваният пукнатинообразуващ момент, очакваните провисвания в характерни точки на стоманобетонните греди;

- за всички изследвани греди на база на получените резултати от тензорезисторите, индуктивните датчици, датчика за налягане в пресата са построени зависимости за деформираното състояние на напречното сечение в участъка с постоянен огъващ момент при различни степени на натоварване. Получените диаграми на деформациите са линейни по височина на сечението и се наблюдават незначителни отклонения (до 2%), като е потвърдена валидността на хипотезата на Бернули;

- от записите за зависимостта на силата във времето, резултатите на тензорезисторите и индуктивните датчици са определени пукнатинообразуващите моменти в средния участък за всяка от гредите. Потвърдено е, че с увеличаване на коефициента на армиране и бетонното покритие се увеличава и стойността на пукнатинообразуващия момент;

- за всички изследвани образци е установено характерно начупване на зависимостта деформация-натоварване при появата на пукнатини. При последващо увеличаване на натоварването графиките стават линейни и това е пряко доказателство за завършване на процеса на пукнатинообразуване;

- с експериментално определената средна деформация и изчисленото средно напрежение на бетона между две пукнатини за опънатия ръб на сечението е доказано, че с нарастване на деформациите новите пукнатини се образуват при по-ниски стойности на опънните напрежения в бетона;

- потвърждава се целесъобразността за отчитане влиянието на бетонното покритие и отношението ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} , w_m , $s_{r,max}$ и $s_{r,m}$;

- проведените количествени оценки и регресионния анализ на данните от експеримента позволяват получаване на причинно-следствени връзки между повече променливи като независими и влиянието им върху една зависима величина-максимална и средна широчина на пукнатините, максимално и средно разстояние между пукнатините, пукнатинообразуващ момент и др. във функция на напрежението в опънатата армировка в сечение с пукнатина, бетонното покритие, отношението ϕ / ρ_{eff} , огъващия момент;

- проведените експериментални изследвания, извършените сравнения и анализ на получените резултати дават възможност да се направят обективни оценки, изводи и заключения за процесите на пукнатинообразуване в стоманобетонните греди, подложени на огъване и за прилагане на получените резултати в последващи експериментални изследвания и в строителната практика.

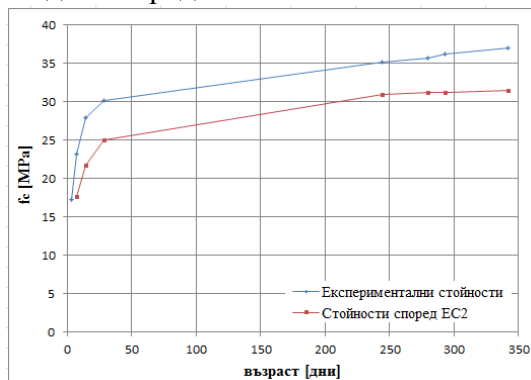
ГЛАВА IV

Сравнителен анализ на експериментално получените резултати с изчислените по различни нормативни документи

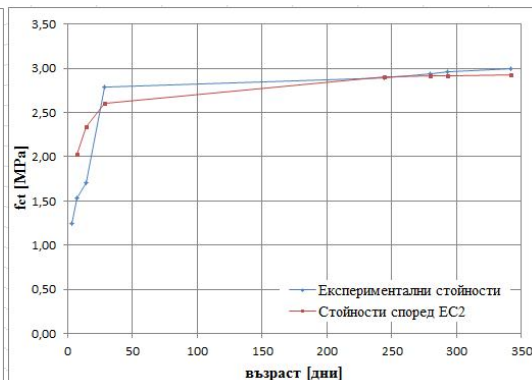
IV.1. Сравнение между експериментално определените якостни и деформационни характеристики на използваните в изследванията бетон и армировъчна стомана и определените по БДС EN 1992-1-1

IV.1.1. Якостни и деформационни характеристики на бетона

На фиг. IV.1 със синя линия са показани експериментално определените стойности на цилиндричната якост на натиск на възраст 3-ти, 7-ми, 14-ти, 28-ми, 244-ти, 280-ти, 293-ти и 342-ри ден. С червена линия са изчислените според EC2 [3] стойности на възраст 7-ми, 14-ти, 244-ти, 280-ти, 293-ти и 342-ри ден на бетона, които са получени на база цилиндричната якост на бетона на възраст 28-ми ден според EC2.



Фиг. IV.1. Цилиндрична якост на натиск

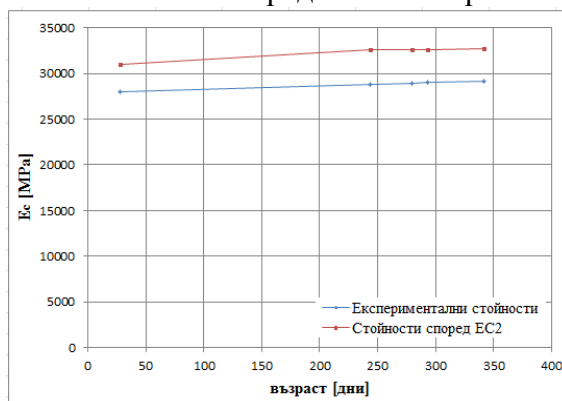


Фиг. IV.2. Якост на опън

От експериментално определената якост на опън при разцепване $f_{ct,sp}$ по формулата $f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp}$ е определена якостта на осов опън (фиг. IV.2) за възраст 3-ти, 7-ми, 14-ти, 28-ми, 244-ти, 280-ти, 293-ти и 342-ри ден на бетона. Теоретичната $f_{ctm}(t)$ на възраст на бетона 7-ми, 14-ти,

244-ти, 280-ти, 293-ти и 342-ри ден е изчислена според EC2, като е използвана якостта на осов опън на възраст 28-ми ден.

Модулът на еластичност (фиг.IV.3) е изследван на възраст на бетона 28-ми, 244-ти, 280-ти, 293-ти и 342-ри ден. Теоретично е изчислен според EC2 за възраст $t > 28$ дни.



Фиг.IV.3. Секущ модул на еластичност на бетона – експериментален и по EC2

IV.1.2. Якостни и деформационни характеристики на армировъчната стомана

Използваната в експеримента армировъчна стомана според EC2 има характеристична граница на провлачване $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$, модул на еластичност $200\,000 \text{ MPa}$, отношение $k = f_{tk} / f_{yk} \geq 1,08$ (f_{tk} - характеристична якост на опън). За армировъчни пръти с диаметри N12 и N18 експериментално получените (фиг.III.5 и фиг.III.6) граница на провлачване и модул на еластичност са 535 MPa и $214\,000 \text{ MPa}$. Експериментално определеното отношение k за N12 е 1,20 и за N18 е 1,19, т.е. те попадат в интервала, определен според EC2 за клас по дуктилност C ($1,15 \leq k < 1,35$).

IV.2. Сравнение между резултатите от експерименталните изследвания върху пукнатините при стоманобетонни елементи, подложени на огъване и получените по различни нормативни документи

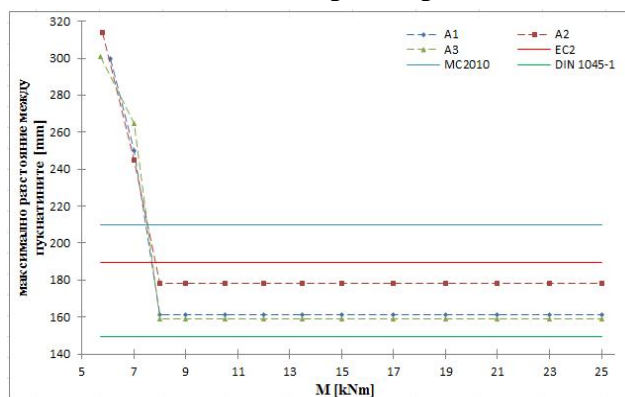
IV.2.1. Пукнатинообразуващ момент

Изчислените и експериментално получените пукнатинообразуващи моменти и разликата в % между тях са дадени в табл.IV.1.

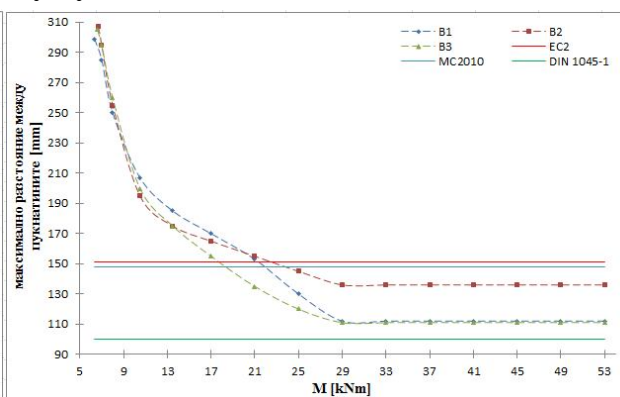
Табл.IV.1. Пукнатинообразуващ момент – определен експериментално и по EC2.

Греда	-	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Експериментално M_{cr}	[kNm]	6,10	5,80	5,70	6,35	6,70	6,60	7,36	7,39	7,38	7,55	7,63	7,70
EC2 M_{cr}	[kNm]	5,85	5,85	5,85	6,58	6,58	6,58	7,20	7,20	7,20	7,58	7,58	7,58
Разлика	[%]	4,27	0,85	2,56	3,50	1,82	0,30	2,22	2,64	2,50	0,40	0,66	1,58

IV.2.2. Максимално и средно разстояние между пукнатините

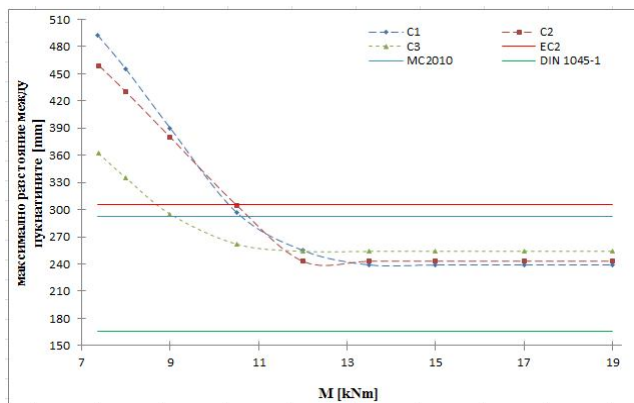


Фиг.IV.4. $s_{r,max}$ за греди А

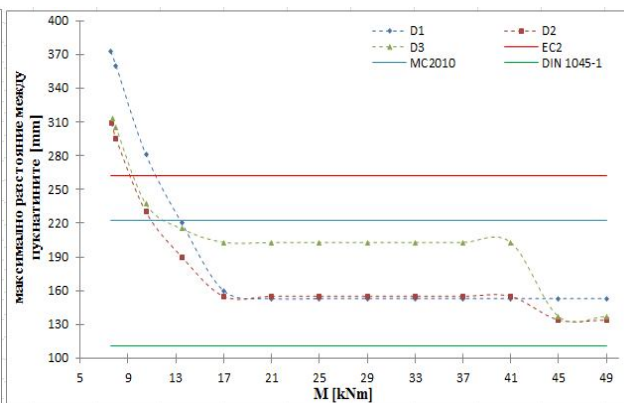


Фиг.IV.5. $s_{r,max}$ за греди В

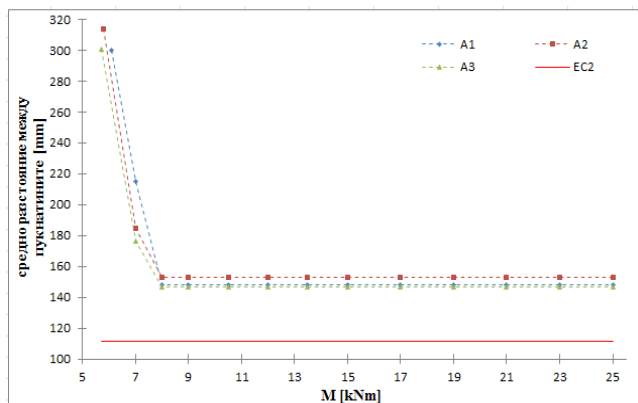
Експериментално получените стойности за $s_{r,max}$ и тези според EC2, MC2010 и DIN 1045-1 в участъка с постоянен огъващ момент във функция на M за различните серии греди са дадени на фиг.IV.4÷IV.7. Експериментално получените стойности за $s_{r,m}$ и тези според EC2 във функция на огъващия момент за различните серии греди са дадени на фиг.IV.8÷IV.11.



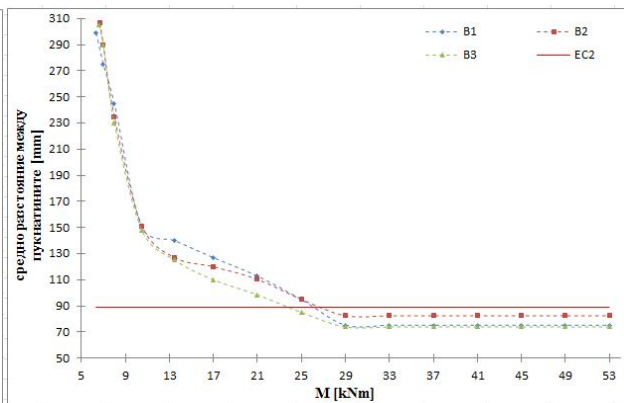
Фиг.IV.6. $s_{r,max}$ за греди C



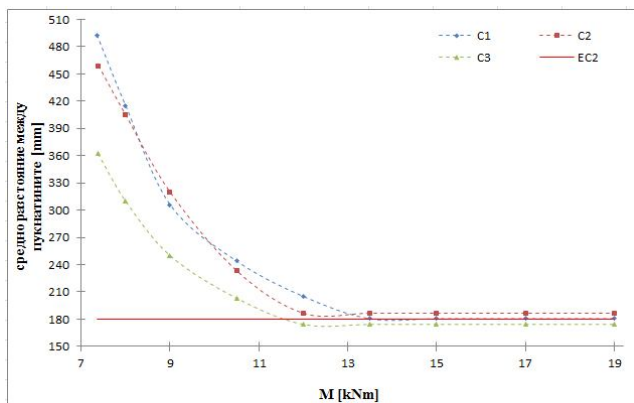
Фиг.IV.7. $s_{r,max}$ за греди D



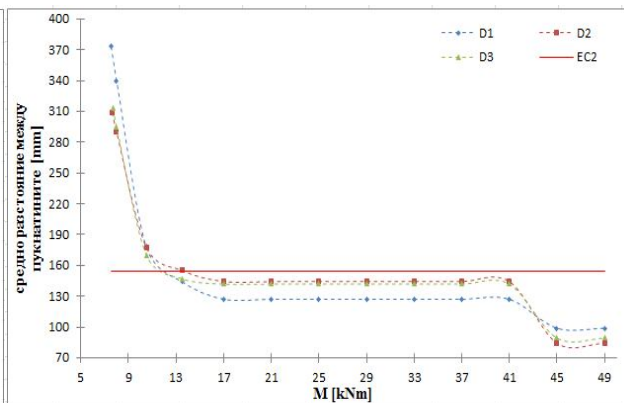
Фиг.IV.8. $s_{r,m}$ за греди от серия A



Фиг.IV.9. $s_{r,m}$ за греди от серия B



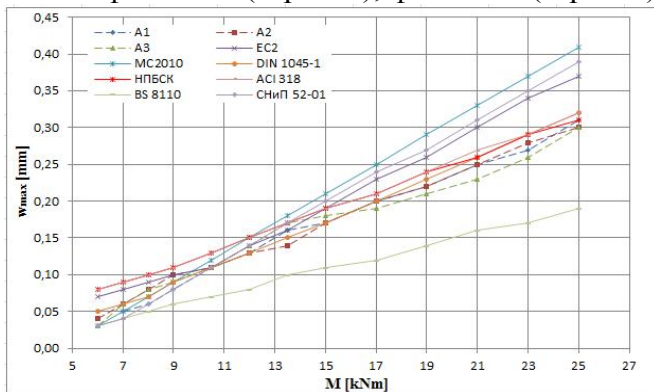
Фиг.IV.10. $s_{r,m}$ за греди от серия C



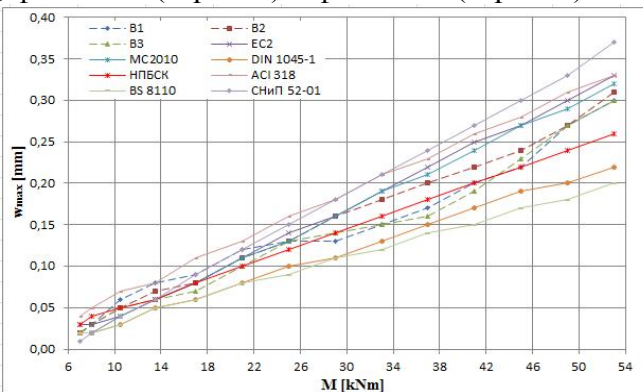
Фиг.IV.11. $s_{r,m}$ за греди от серия D

IV.2.3. Максимална и средна широчина на пукнатините

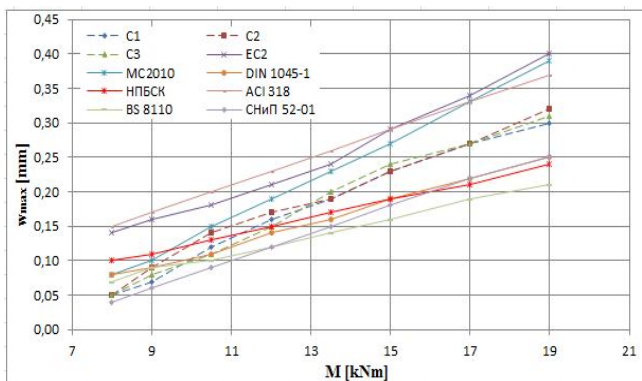
w_{max} в участъка с постоянен огъващ момент при различни стойности на огъващия момент са дадени на фиг.IV.12 (серия A), фиг.IV.13 (серия B), фиг.IV.14 (серия C) и фиг.IV.15 (серия D).



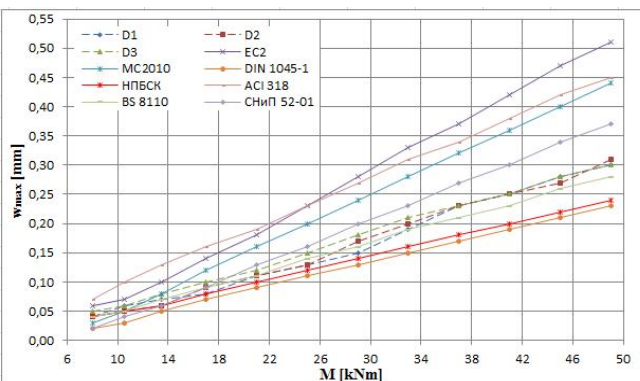
Фиг.IV.12. w_{max} за греди от серия A



Фиг.IV.13. w_{max} за греди от серия B



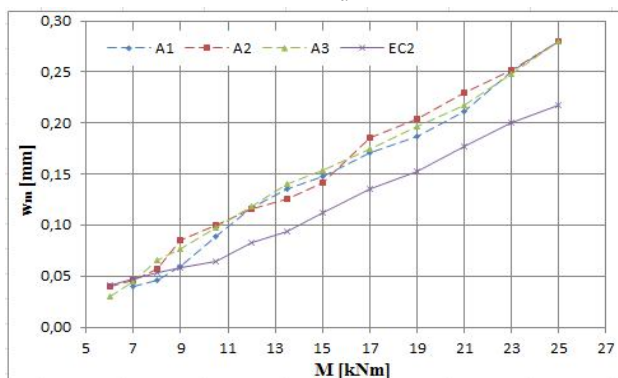
Фиг. IV.14. $w_{\max}$ за греди от серия С



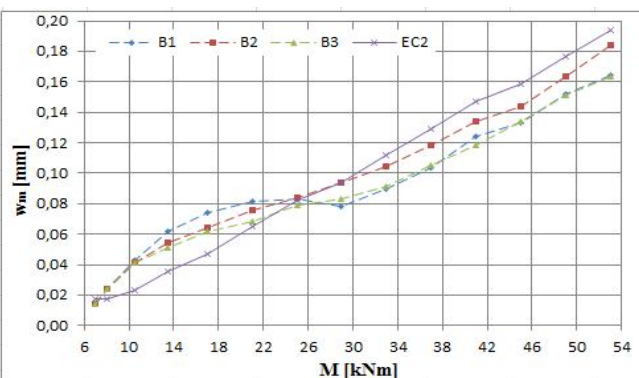
Фиг. IV.15. $w_{\max}$ за греди от серия D

По различните нормативни документи $w_{\max}$ са получени с отчитане на експерименталните якостни и деформационни характеристики на армировъчната стомана и бетона в деня на изпитването. $w_{\max}$ са определени за различни стойности на огъващия момент до стойност, при която експерименталните максимални широчини достигат 0,3 mm.

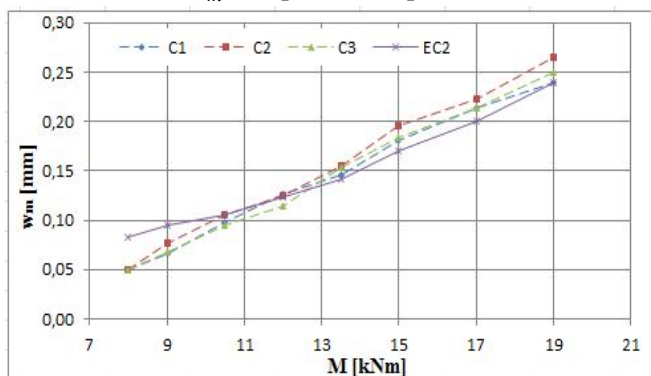
w_m в участъка с постоянен огъващ момент при различни стойности на огъващия момент са дадени на фиг. IV.16 (серия А), фиг. IV.17 (серия В), фиг. IV.18 (серия С) и фиг. IV.19 (серия D). w_m по EC2 са получени като $w_{\max}$ са разделени на 1,7.



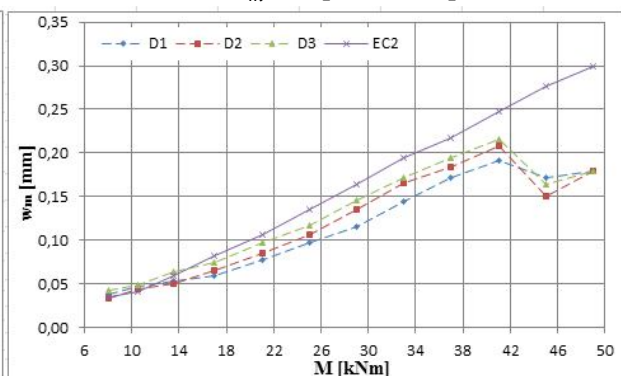
Фиг. IV.16. w_m за греди от серия А



Фиг. IV.17. w_m за греди от серия В



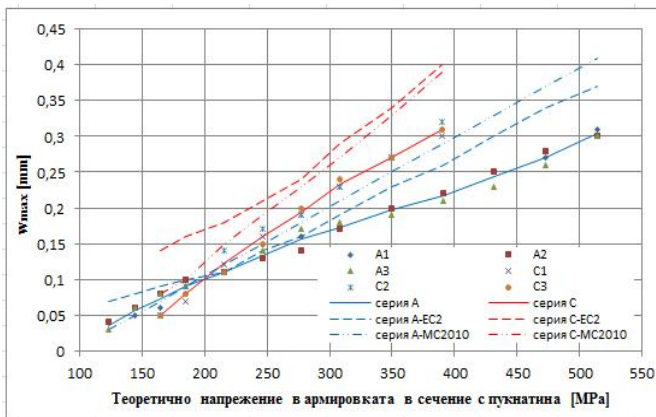
Фиг. IV.18. w_m за греди от серия С



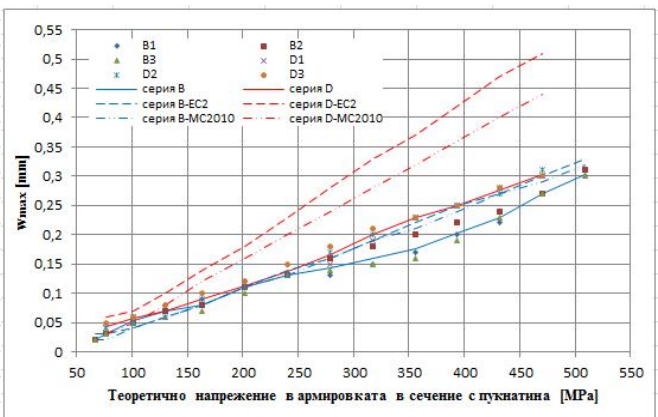
Фиг. IV.19. w_m за греди от серия D

IV.2.4. Влияние на бетонното покритие върху широчината на пукнатините и разстоянието между тях

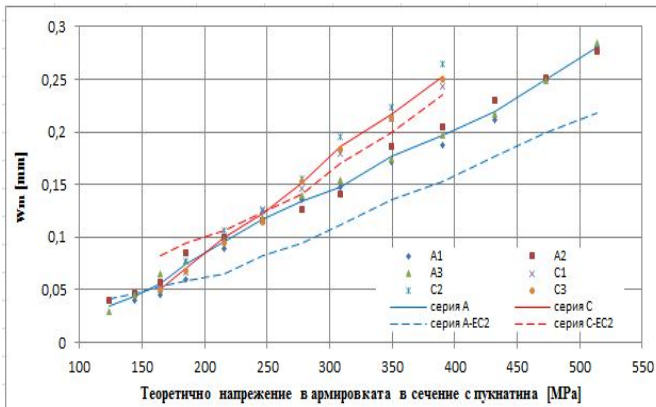
На фиг. IV.20 и фиг. IV.21 са показани експерименталните и определените по EC2 и MC2010 $w_{\max}$ при различни стойности на σ_s за греди А, С и за греди В, D. На фиг. IV.22 и фиг. IV.23 са показани експерименталните и определените по EC2 w_m при различни стойности на σ_s за греди А, С и за греди В, D. На фиг. IV.24 и фиг. IV.25 са показани експериментално получените и определените по EC2 и MC2010 $s_{r,\max}$ при различни стойности на σ_s за греди А, С и за греди В, D. На фиг. IV.26 и фиг. IV.27 са показани експериментално получените и определените по EC2 $s_{r,m}$ при различни стойности на σ_s за греди А, С и за греди В, D. Експерименталните разлики и тези, изчислени по нормативните документи, за $w_{\max}$, w_m , $s_{r,\max}$ и $s_{r,m}$ при едно и също σ_s показват влиянието на c_{nom} .



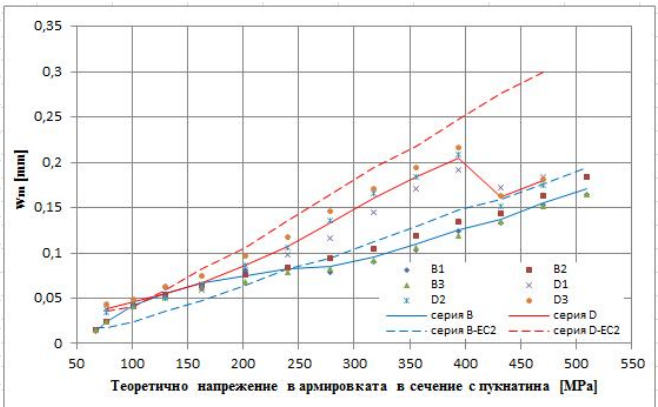
Фиг.IV.20.Влияние на σ_{nom} върху w_{max} за греди А, С



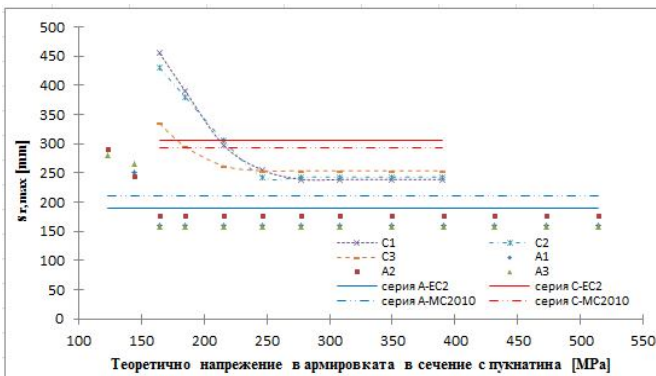
Фиг.IV.21.Влияние на σ_{nom} върху w_{max} за греди В, D



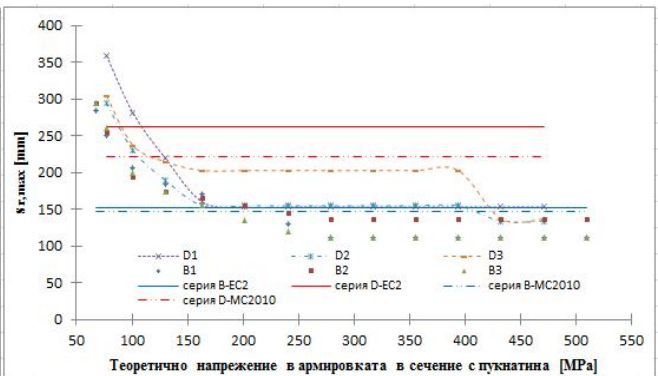
Фиг.IV.22.Влияние на σ_{nom} върху w_m за греди А, С



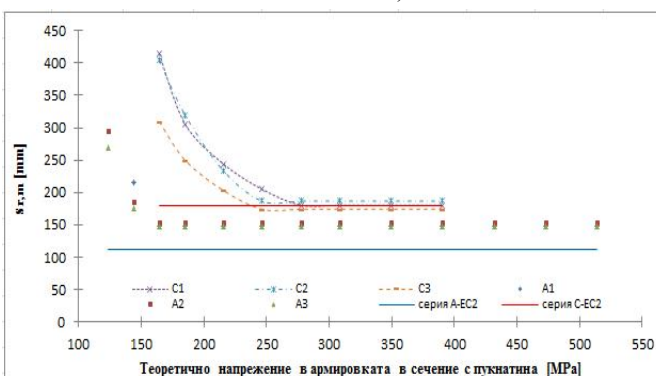
Фиг.IV.23.Влияние на σ_{nom} върху w_m за греди В, D



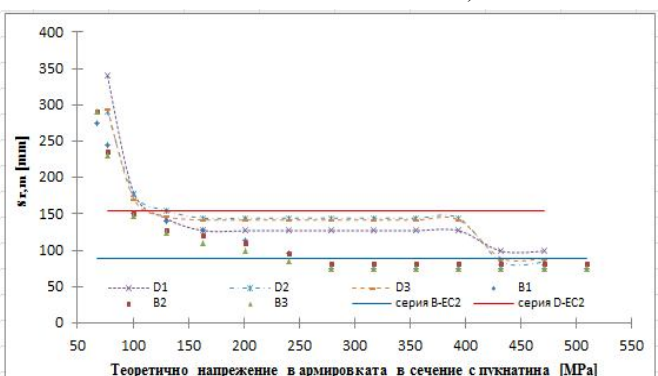
Фиг.IV.24.Влияние на σ_{nom} върху $s_{r,max}$ за греди А, С



Фиг.IV.25.Влияние на σ_{nom} върху $s_{r,max}$ за греди В, D



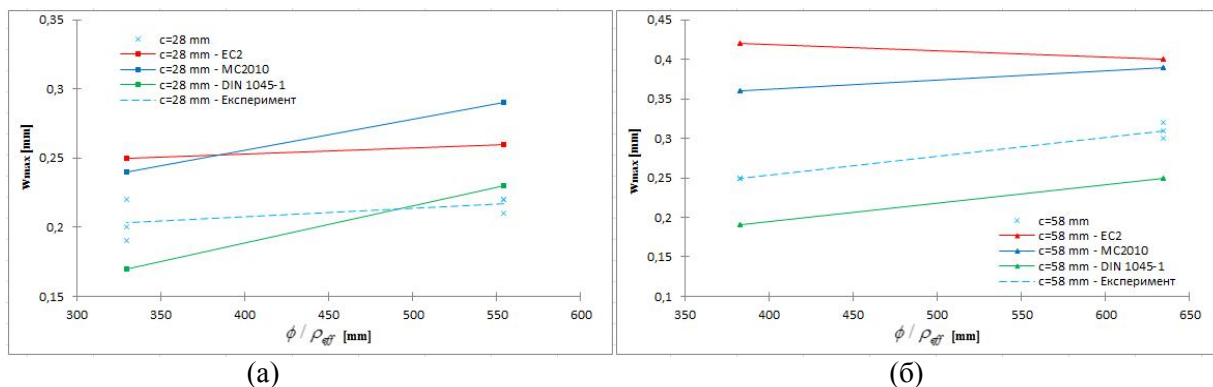
Фиг.IV.26.Влияние на σ_{nom} върху $s_{r,m}$ за греди А, С



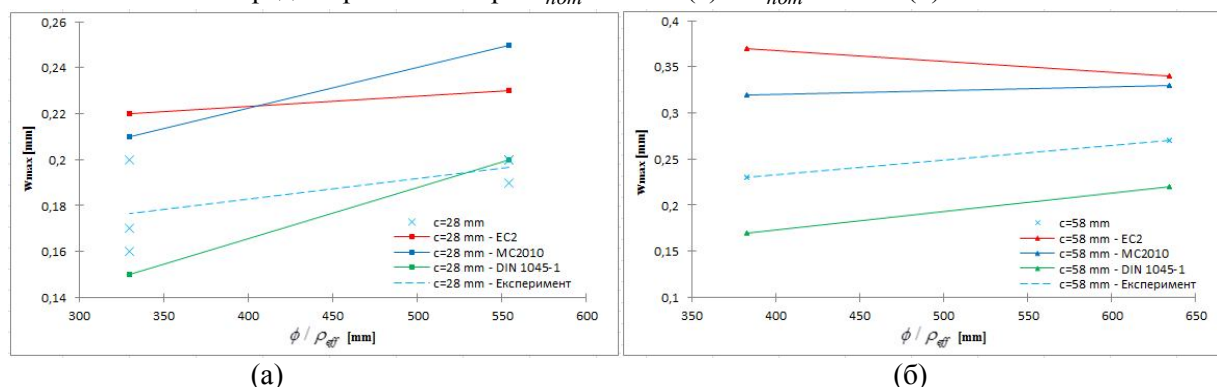
Фиг.IV.27.Влияние на σ_{nom} върху $s_{r,m}$ за греди В, D

IV.2.5.Влияние на отношението ϕ / ρ_{eff} върху широчината на пукнатините и разстоянието между тях

На фиг.IV.28÷IV.30 е показано влиянието на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} при различни стойности на σ_s в случаи на еднакво бетонно покритие според EC2, MC2010, DIN 1045-1 и експериментът.

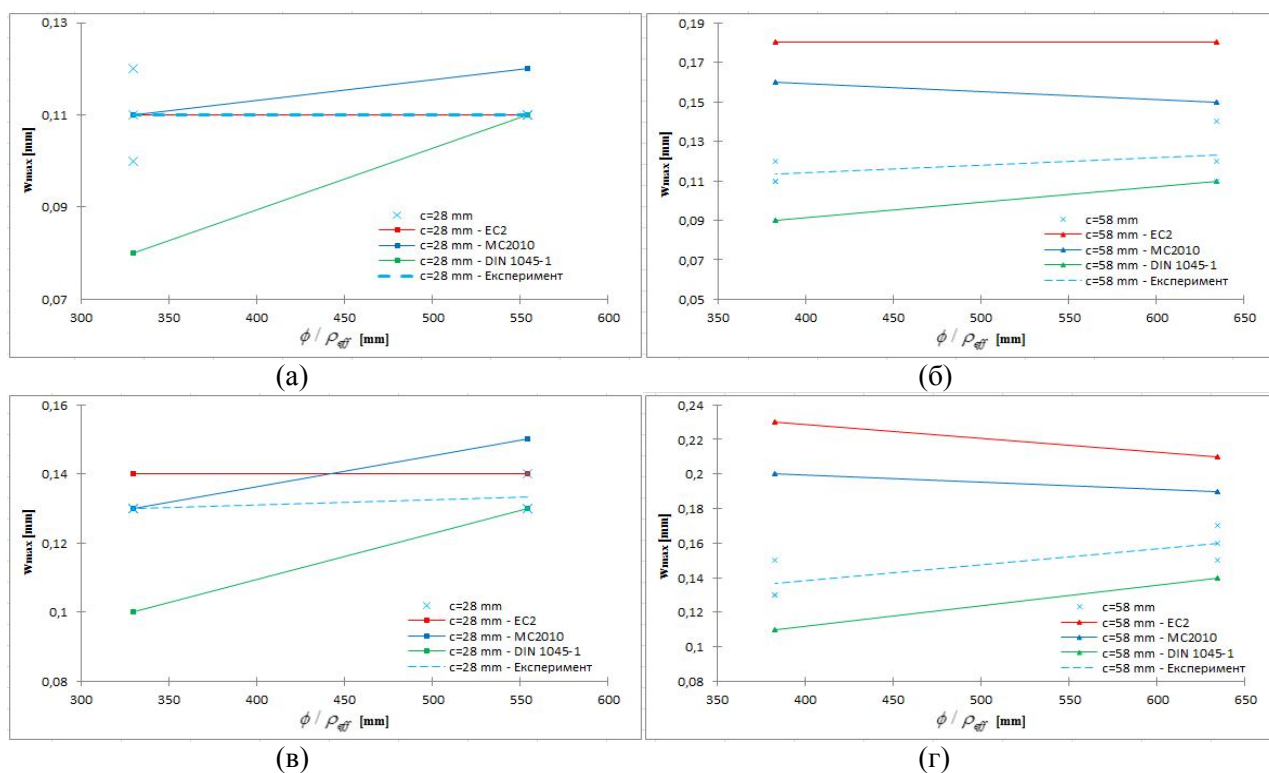


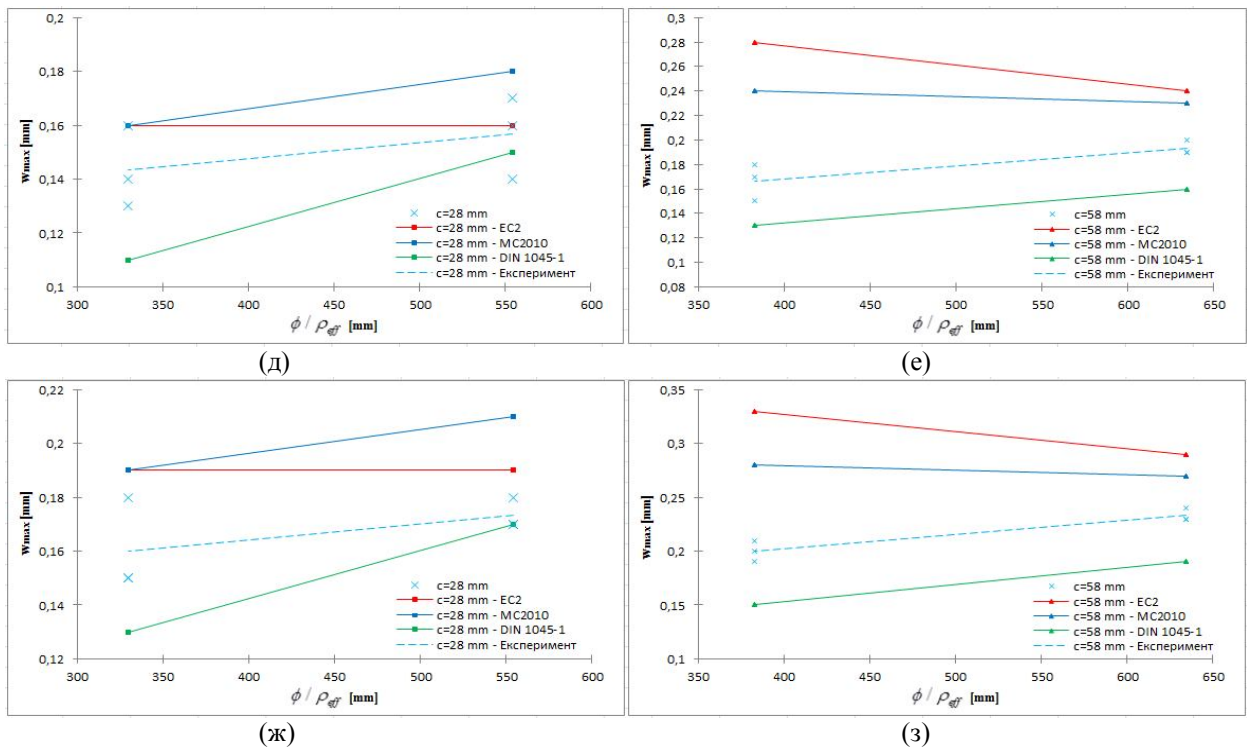
Фиг.IV.28. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} при $\sigma_s = 390,5$ MPa за греди серии А и С и за $\sigma_s = 393,9$ MPa за греди серии В и D при $c_{nom} = 28$ mm (а) и $c_{nom} = 58$ mm (б)



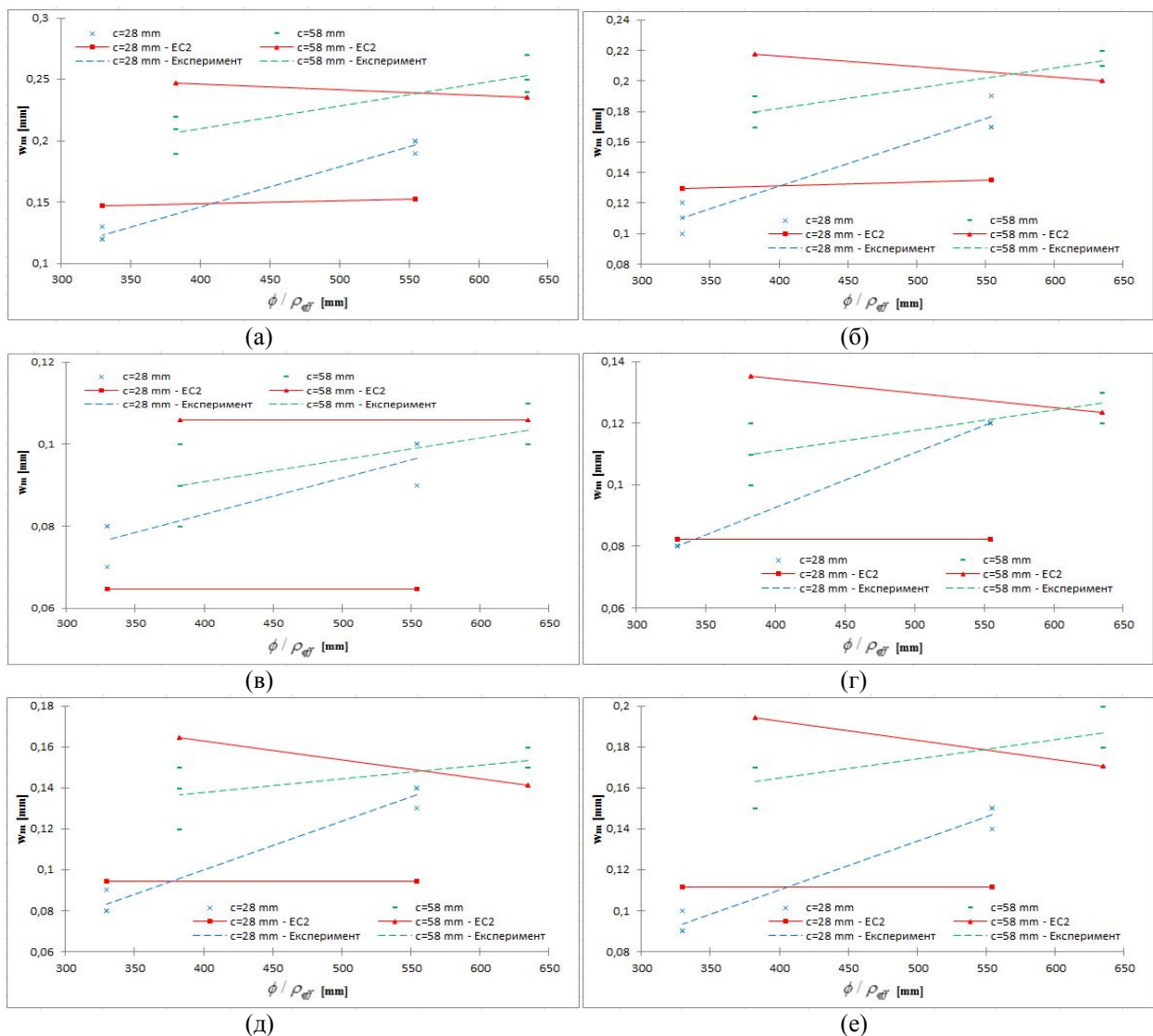
Фиг.IV.29. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} при $\sigma_s = 349,6$ MPa за греди серии А и С и за $\sigma_s = 355,5$ MPa за греди серии В и D при $c_{nom} = 28$ mm (а) и $c_{nom} = 58$ mm (б)

За близки по стойност σ_s ($\sigma_s = 215,8$ MPa / 246,8 MPa / 277,5 MPa / 308,5 MPa за греди серии А и С и $\sigma_s = 201,8$ MPa / 240,2 MPa / 278,6 MPa / 317,1 MPa за греди серии В и D) влиянието на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} според различни нормативни документи и експеримента е показано на фиг. IV.30-а,в,д,ж (при $c_{nom} = 28$ mm) и на фиг. IV.30-б,г,е,з (при $c_{nom} = 58$ mm).





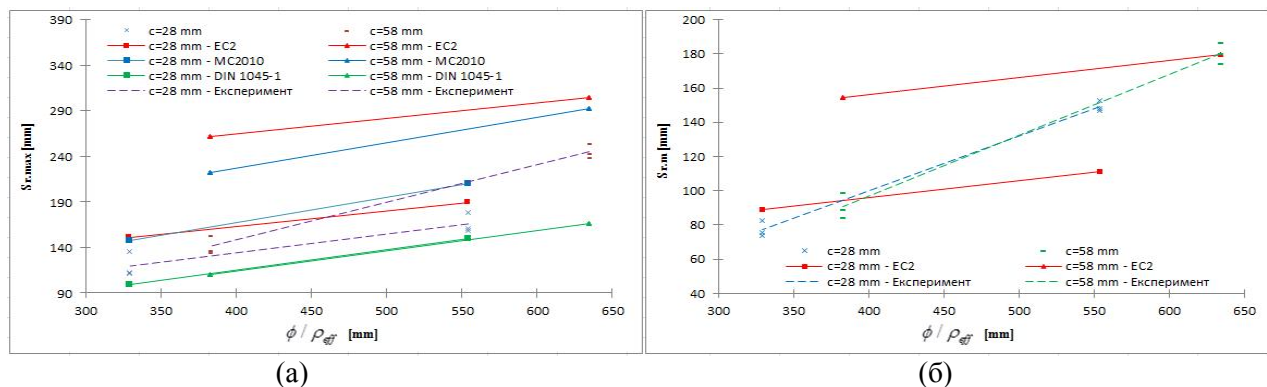
Фиг.IV.30. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху w_{max} при $c_{nom}=28\text{mm}$ и $c_{nom}=58\text{mm}$ за квазипостоянни комбинации на натоварванията в зависимост от функцията на сградата според EC2, MC2010, DIN 11045-1 и експеримент



Фиг.IV.31. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху w_m при $c_{nom}=28\text{mm}$ и $c_{nom}=58\text{mm}$ за различни стойности на σ_s

На фиг.IV.31 е показано влиянието на ϕ / ρ_{eff} върху w_m при различни стойности на σ_s в случаи на еднакво бетонно покритие според EC2 и направения експеримент. Разгледани са случаите за стойности на σ_s ($\sigma_s = 390,5 \text{ MPa} / 349,6 \text{ MPa} / 215,8 \text{ MPa} / 246,8 \text{ MPa} / 277,5 \text{ MPa} / 308,5 \text{ MPa}$ за греди серии А и С и $\sigma_s = 393,9 \text{ MPa} / 355,5 \text{ MPa} / 201,8 \text{ MPa} / 240,2 \text{ MPa} / 278,6 \text{ MPa} / 317,1 \text{ MPa}$ за греди серии В и D), които са показани съответно на фиг.IV.31-а,б,в,г,д,е.

На фиг.IV.32 е показано влиянието на ϕ / ρ_{eff} върху експериментално определените и изчислените $s_{r,max}$ и $s_{r,m}$ при стабилизирано пукнатинообразуване в участъка с постоянен огъващ момент при $c_{nom}=28\text{mm}$ и $c_{nom}=58\text{mm}$.



Фиг.IV.32. Влияние на ϕ / ρ_{eff} върху $s_{r,max}$ (а) и $s_{r,m}$ (б) при $c_{nom}=28\text{mm}$ и $c_{nom}=58\text{mm}$

IV.3. Анализ на получените резултати

Въз основа на направените сравнения между експерименталните резултати и изчисленията по различни нормативни документи могат да се направят следните обобщения и изводи:

- експериментално определената цилиндрична якост на натиск е по-голяма от изчислената според EC2 за всеки от дните на изследване. Експерименталната якост на осов опън за възраст $t < 28$ дни е чувствително по-малка от изчислената по EC2, за $t = 28$ дни е по-голяма, докато при $t > 28$ дни те са с много близки стойности. Експерименталният модул на еластичност на бетона за възраст $t \geq 28$ дни е по-малък от изчисления. Експериментално определената и изчислената деформация на натиснат бетон при максимално напрежение за възраст $t > 28$ дни почти съвпадат;

- експериментално определените характеристична граница на провлачване f_{yk} , модул на еластичност и отношение $k = f_{tk} / f_{yk}$ са по-големи от проектните според EC2 за армировъчната стомана клас B500B;

- експериментално определените и изчисленията по EC2 (на база якостни и деформационни характеристики на използваните материали, геометрични характеристики на гредите, полезна височина, количество надлъжна опънна армировка) пукнатинообразуващи моменти са с разлики от 0,3% до 4,27%;

- за всички греди получените експериментални резултати за максималното разстояние между пукнатините ($s_{r,max}$) след стабилизиране на пукнатинообразуването попадат в областта ограничена от стойностите, изчислени по EC2, MC2010 и DIN 1045-1, като са винаги по-малки от тези изчислени по EC2 и MC2010 и по-големи от тези по DIN 1045-1. Най-малка процентна разлика между експерименталните и изчисленията според EC2 $s_{r,max}$ се получава за греди от серия А (6% до 16,1%), които са с по-малкия коефициент на армиране ($\rho = 0,0064$) и по-малкото бетонно покритие (28 mm), докато най-голямата процентна разлика се получава за греди от серия D (41,7% до 48,9%), които са с по-големия коефициент на армиране ($\rho = 0,0145$) и по-голямото бетонно покритие (58 mm). С увеличаване на бетонното покритие и коефициентът на армиране се увеличава и процентната разлика между експериментално определеното и изчисленото според EC2 $s_{r,max}$;

- експериментално определеното средно разстояние между пукнатините ($s_{r,m}$) е чувствително по-голямо от изчисленото по EC2 за греди от серия А (31,8% до 37,2%), които са с

по-малкия коефициент на армиране ($\rho = 0,0064$) и по-малкото бетонно покритие (28 mm), много по-малко за греди от серия D (35,9% до 45,4%), които са с по-големия коефициент на армиране ($\rho = 0,0145$) и по-голямото бетонно покритие (58 mm), по-малко за греди от серия В (7,3% до 17%), които са с по-големия коефициент на армиране ($\rho = 0,0145$) и по-малкото бетонно покритие (28 mm). Експерименталните и изчислените според EC2 стойности на $s_{r,m}$ са близки за греди от серия С (0,5% до 4%), които са с по-малкия коефициент на армиране ($\rho = 0,0064$) и по-голямото бетонно покритие (58 mm);

- за всички греди получените експериментални резултати за максималната широчина на пукнатините ($w_{\max}$), при различни стойности на огъващия момент в участъка с постоянен огъващ момент, попадат в областта ограничена от стойностите, изчислени по различните нормативни документи. За огъващ момент, отговарящ на експериментално получена $w_{\max} = 0,3\text{ mm}$, изчислените по EC2, MC2010 и ACI 318-11 максимални широчини на пукнатините за всяка от гредите са по-големи от експерименталните, а изчислените по BS 8110 винаги са по-малки. Най-големи разлики между експериментални и изчислени по EC2 $w_{\max}$ се получават за греди от серия D (39,2% до 41,2%), които са с по-големия коефициент на армиране ($\rho = 0,0145$) и по-голямото бетонно покритие (58 mm), докато най-малки са при греди от серия В (6,1% до 9,1%), които са с по-големия коефициент на армиране ($\rho = 0,0145$) и по-малкото бетонно покритие (28 mm);

- експериментално определената средна широчина на пукнатините е чувствително по-голяма от изчислената по EC2 за греди от серия А (27,3%), които са с $\rho = 0,0064$ и $c_{\text{nom}} = 28\text{ mm}$, много по-малка за греди от серия D (40%), които са $\rho = 0,0145$ и $c_{\text{nom}} = 58\text{ mm}$, по-малка за греди от серия В (5,3% до 15,8%), които са с $\rho = 0,0145$ и $c_{\text{nom}} = 28\text{ mm}$, по-голяма или равна за греди от серия С (0% до 12,5%), които са с $\rho = 0,0064$ и $c_{\text{nom}} = 58\text{ mm}$;

- при греди с еднакъв коефициент на армиране, близки стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} , различно бетонно покритие при различни стойности на σ_s влиянието на c_{nom} върху максималната широчина на пукнатините ($w_{\max}$) според EC2 е по-голямо отколкото експериментално определеното с от 35,7% до 85,7% за $\rho = 0,0064$ и от 66,7% до 88,9% за $\rho = 0,0145$. Влиянието на c_{nom} върху $w_{\max}$ според MC2010 е по-голямо от експерименталното от 0% до 66,7% за $\rho = 0,0064$ и от 54,5% до 85,7% за $\rho = 0,0145$;

- при греди с еднакъв коефициент на армиране, близки стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} , различно бетонно покритие при различни стойности на σ_s влиянието на c_{nom} върху средната широчина на пукнатините (w_m) според EC2 е по-голямо от експериментално определеното от 33,3% до 60% за $\rho = 0,0064$ и от 20% до 60% за $\rho = 0,0145$;

- при греди с еднакъв коефициент на армиране, близки стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} и различно c_{nom} , влиянието на c_{nom} върху максималното разстояние между пукнатините ($s_{r,\max}$) при стабилизирано пукнатинообразуване според EC2 е по-голямо отколкото експериментално определеното с 36,1% за $\rho = 0,0064$ и с 80,5% за $\rho = 0,0145$. При MC2010 това влияние е по-голямо отколкото експерименталното с 10% за $\rho = 0,0064$ и с 71% за $\rho = 0,0145$;

- при греди с еднакъв коефициент на армиране, близки стойности на отношението ϕ / ρ_{eff} , различно бетонно покритие влиянието на c_{nom} върху средното разстояние между пукнатините ($s_{r,m}$) според EC2 е по-голямо от експериментално определеното с 54,3% за $\rho = 0,0064$ и с 79,3% за $\rho = 0,0145$;

- в случай на $c_{\text{nom}} = 28\text{ mm}$ влиянието на ϕ / ρ_{eff} върху максималната широчина на пукнатините според EC2 и MC2010 е по-близко до експериментално определеното, а според DIN 1045-1 е по-голямо. При $c_{\text{nom}} = 58\text{ mm}$ според DIN 1045-1 то е много близко до експерименталното, докато според EC2 и MC2010 малко нараства или намалява.

- в случаи на $c_{nom}=28\text{mm}$ и $c_{nom}=58\text{mm}$ влиянието на ϕ/ρ_{eff} върху средната широчина на пукнатините при различни стойности на σ_s според експеримента е чувствително, докато това според EC2 нараства малко или намалява.

- в случай на $c_{nom}=28\text{mm}$ влиянието на ϕ/ρ_{eff} върху максималното разстояние между пукнатините при стабилизирано пукнатинообразуване според експеримента е много близко до това според EC2, а според MC2010 и DIN 1045-1 е по-силно изразено. При $c_{nom}=58\text{mm}$ експериментално определеното влиянието на ϕ/ρ_{eff} върху $s_{r,max}$ е най-близко до изчисленото според MC2010, докато според EC2 и DIN 1045-1 е по-слабо изразено.

- в случаи на $c_{nom}=28\text{mm}$ и $c_{nom}=58\text{mm}$ влиянието на ϕ/ρ_{eff} върху средното разстояние между пукнатините при стабилизирано пукнатинообразуване според експеримента е по-силно изразено отколкото определеното по EC2.

- формулите според EC2 за определяне на максималната широчина и максималното разстояние между пукнатините не оценяват точно влиянието на отношението ϕ/ρ_{eff} и бетонното покритие. Необходима е промяна.

Претенции за научно - приложни и приложни приноси:

1. Направен е преглед и анализ на по-важните съвременни теории, нормативни документи и изследвания за определяне на параметрите на пукнатините при стоманобетонни елементи, подложени на огъване.

2. Създадена е методика за експериментално изследване на стоманобетонни елементи, включваща избор по вид и брой на пробни тела, конструктивни параметри и схема на изпитване на гредите, стандарти за изпитвания, измервателна техника и програмни продукти. Създадената информационно - измервателна система позволява измерване, запис, обработка и анализ на получените резултати с цел определяне параметри и характеристики на пукнатините, отчитайки особеностите на всички изследвани величини и зависимости при различни етапи от експерименталното изследване.

3. Проведени са експериментални изследвания на стоманобетонни греди, подложени на огъване (четири точков тест), различаващи се по коефициент на армиране, отношение ϕ/ρ_{eff} и бетонно покритие.

4. Потвърдена е валидността на хипотезата на Бернули на база на експериментално получените линейни диаграми на деформирано състояние на напречното сечение в участъка с постоянен огъващ момент при различни степени на натоварване.

5. Експериментално е потвърдено, че с увеличаване на коефициента на армиране и бетонното покритие се увеличава стойността на пукнатинообразуващия момент и е потвърдена валидността на предложената в EC2 формула за изчисляването му.

6. С експериментално определената средна деформация и съответното средно напрежение на бетона между две пукнатини за опънатия ръб на сечението е доказано, че с нарастване на деформациите новите пукнатини се образуват при напрежения със стойности, по-ниски от опънатата якост на бетона.

7. Експериментално е потвърдена необходимостта за отчитане влиянието на бетонното покритие и отношението ϕ/ρ_{eff} върху максималната и средната широчина на пукнатините и максималното и средното разстояние между тях, но формулите в различните нормативни документи не дават точни резултати.

8. Проведените количествени оценки и регресионния анализ на данните от експеримента позволяват получаване на причинно - следствени връзки между повече променливи като независими и влиянието им върху една зависима величина - максимална и средна широчина на пукнатините, максимално и средно разстояние между пукнатините, пукнатинообразуващ момент и др. във функция на напрежението в опънатата армировка в сечение с пукнатина, бетонното покритие, отношението ϕ/ρ_{eff} , огъващия момент.

9. Сравнени и анализирани са експерименталните и определените по различни нормативни документи параметри на пукнатините при различни стойности на огъващия момент. Установено е,

че всички експериментални резултати попадат в областта, ограничена от стойностите, изчислени по различни нормативни документи.

10. Сравнени и анализирани са експерименталните и изчислените резултати за влиянието на бетонното покритие и отношението ϕ / ρ_{eff} при различните стойности на напрежението в опънната армировка в сечение с пукнатина върху максималната и средната широчина, максималното и средното разстояние между пукнатините в участъка с постоянен огъващ момент.

Перспективи за бъдещи изследвания:

1. Експериментално изследване на пукнатините и факторите, влияещи върху тях при дълготрайно действие на натоварването;
2. Експериментално изследване на влиянието на пукнатините върху кривината (коравината) на стоманобетонните елементи;
3. Експериментално изследване на влиянието на диаметъра и разстоянието между напречната армировка върху параметрите на пукнатините;
4. Експериментално изследване на факторите, влияещи върху широчината на пукнатините при елементи, изготвени от бетон с дисперсна армировка.
5. Определяне на ефективната опънна зона на базата на експеримент и сравняването ѝ с изчислената по различни нормативни документи.

Публикации по темата на дисертационния труд:

1. Ivanchev I., Research on cracks in reinforced concrete elements by taking into account the experimentally determined concrete and reinforcing steel mechanical properties, Indian Journal of Applied Research (IJAR), Volume 5, ISSN - 2249-555X, pp. 13-15, 2015, Impact Factor 3,6241.
2. Иванчев И., Изследване на пукнатини в стоманобетонни елементи, подложени на огъване, XIII Младежка национална научно-практическа конференция ФНТС'2015, София, 53-58.
3. Ivanchev I., Experimental determination of maximum, mean and minimum crack spacing in reinforced concrete elements, subjected to bending, 16th International Scientific Conference VSU'2016, Sofia, 157-162.
4. Ivanchev I., Comparison of the experimentally determined maximum crack spacing in reinforced concrete elements, subjected to bending and maximum crack spacing obtained according to different regulations, 16th International Scientific Conference VSU'2016, Sofia, 163-168.
5. Ivanchev I., Experimental determination of the mean tensile strain of the reinforcement, tension stiffening and bending cracking moment for reinforced concrete elements, Symposium 2016 of the Association of Structural Engineers of Serbia, Zlatibor, Serbia, 2016, 153-162.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.БДС EN 1990:2003, *Основи на проектиране на строителни конструкции.*
- 2.БДС EN 1991-1-1:2004, *ЕВРОКОД 1: Въздействия върху строителните конструкции, Част 1-1: Основни въздействия. Плътности, собствени тегла и полезни натоварвания в сгради.*
- 3.БДС EN 1992-1-1:2005, *ЕВРОКОД 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции, Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.*
- 4.БДС EN 1992-2:2006, *ЕВРОКОД 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции, Част 2: Стоманобетонни мостове. Правила за проектиране и конструиране.*
- 5.БДС EN 12350-1:2009, *Изпитване на бетонна смес. Част 1: Вземане на проби.*
- 6.БДС EN 12390-1:2012, *Изпитване на втвърден бетон. Част 1: Форма, размери и други изисквания за пробни тела и кофразжни форми.*
- 7.БДС EN 12390-2:2009, *Изпитване на втвърден бетон, Част 2: Приготвяне и отлежаване на пробни тела за изпитване на натиск.*
- 8.БДС EN 12390-3:2009, *Изпитване на втвърден бетон, Част 3: Якост на натиск на пробни тела.*
- 9.БДС EN 12390-4:2001, *Изпитване на втвърден бетон. Част 4: Якост на натиск. Спецификация на машините за изпитване.*
- 10.БДС EN 12390-6:2009, *Изпитване на втвърден бетон, Част 6: Якост на опън при разцепване на пробни тела.*
- 11.БДС EN 12390-13:2013, *Изпитване на втвърден бетон. Част 13: Определяне на модула на еластичност при натиск в бетонно сечение.*
- 12.БДС EN 12504-2:2012, *Изпитване на бетон в конструкции. Част 2: Изпитване без разрушаване. Определяне на големината на отскока.*
- 13.БДС EN ISO 6892-1:2009, *Метални материали. Изпитвания на опън. Част 1: Метод за изпитване при стайна температура.*
- 14.БДС EN 10080:2005, *Стомани за армиране на бетон. Заваряема армировъчна стомана. Общи положения.*

- 15.БДС 9252:2007, *Стомана за армиране на стоманобетонни конструкции. Заваряема армировъчна стомана B500.*
- 16.Безгодов И.М., *О соотношениях прочностных и деформационных характеристик бетона, при сжатии, растяжении и растяжении при изгибе*, Бетон и железобетон, 2, 2012.
- 17.Гочев Г. и колектив, *Ръководство по Стоманобетон*, Техника, София, 2009.
- 18.Гуглев Р. и колектив, *Ръководство за изчисляване на бетонни и стоманобетонни конструкции от обикновен бетон без предварително налягане на армировката в съответствие с БДС EN 1992-1-1, НИСИ, София, 2014.*
- 19.Даалов Т. и колектив, *Ръководство за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции от обикновен бетон, второ издание, МСА-НИСИ, София, 1983.*
- 20.Даалов Т., *Изследвания върху напрегнатото и деформирано състояние на безгредови стоманобетонни плочи, реабилитационен труд за професор, ВСУ „Любен Каравелов”, София, 2004.*
- 21.Даалов Т., *Ръководство за проектиране на безгредови подови конструкции*, ВСУ „Любен Каравелов”, София, 2004.
- 22.Даалов Т., Б. Даалов, *Ръководство за проектиране на стоманобетонни конструкции по Еврокод 2, ВСУ „Л. Каравелов”, София, 2010.*
- 23.Димов Д., *Изследвания на пукнатиноустойчивостта и разтварянето на пукнатини в огънати стоманобетонни елементи с частично предварително налягане*, Автореферат, София, 1987.
- 24.Димов Д., Т. Марков, *Развитие трещин в частично предварительно напряженных железобетонных балках, IV-ая Общегосударственная конференция по бетону, Бърно, ЧССР, 1987.*
- 25.Захариева – Георгиева Б., *Теоретично и експериментално изследване на стоманобетонни елементи от високоякостен бетон, натоварени на натиск и огъване. Автореферат на дисертация, София, 1991.*
- 26.Иванчев Ил., Р. Ганчева, А. Георгиев, Й. Милев, В. Неделчев, Б. Димитров, *Проектиране на стоманобетонни конструкции според Европейските норми (Еврокод 2), УАСГ, София, 2001.*
- 27.Иванчев Ил., *Проектиране на стоманобетонни мостове според Еврокод 2, АВС Техника, София, 2010.*
- 31.Карпенко Н. И., *Теория деформирования железобетона с трещинами*, Москва, 1976.
- 32.Кисов Д., *Ръководство за подготовка на курсов проект по стоманобетонни мостове*, ВСУ, 2011.
- 33.Маноилов Л., *Стоманобетон*, издателство „Техника”, София, 2011.
- 34.Милев Й., *Сейсмично проектиране на стоманобетонни конструкции по Еврокод 8, КИИП, София, 2012.*
- 35.Мурашев В. И., *Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона*, Москва, 1950.
- 36.*Норми за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции*, 1987.
- 37.Оксанович Л., *EC2. Втора група гранични състояния, АВС Техника, София, 2010.*
- 38.Памукчиев С., *Стоманобетонни конструкции – част 1, Техника, София, 1998.*
- 39.Ростовски И., *Упражнения по „Строителни материали”, Модул на еластичност на бетона при натиск. БДС EN 12390-13, УАСГ, София.*
- 40.Русев К., *Стоманобетон НПБСК-EC2*, София, 2008.
- 41.Русев К. и колектив, *Ръководство по стоманобетон. Еврокод 2, КИИП, София, 2011.*
- 42.Славчев В., *Проектиране на мостови пътни плочи. Ръководство за проектиране*, ВСУ „Л. Каравелов”, София, 2014.
- 43.СП 63.13330.2012, *Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.*
- 44.Янчев, Вл., *Пукнатини от кратковременни натоварвания в стоманобетонни елементи, подложени на огъване, Автореферат на дисертация за присъждане на образователна и научна степен “Доктор”, София, 2009.*
- 45.ACI 318-11, *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute.
- 46.Alam S., T. Lenormand, A. Loukili, J. P. Regoin, *Measuring crack width and spacing in reinforced concrete members*, 7th ICFMCCS, Korea, 2010.
- 47.Alam S., M. Shoukry, G. Rashad, A. Hassan, *Crack width evaluation for flexural RC members*, Alexandria Engineering Journal, 2012.
- 48.Base G., B. Read, A. Beeby, H. Taylor, *An investigation of the crack control characteristics of various types of bar in reinforced concrete*, Cement and Concrete Association, 1966.
- 49.Bazant Z., F. Asce, B. Oh, *Spacing of cracks in reinforced concrete*, Journal of Structural Engineering, Vol. 109, 1983.
- 50.Beeby, A. W., *An investigation of cracking on the side faces of beams*, Technical Report 42.466, Cement and Concrete Association, Slough, England, 1971.
- 51.Beeby, A. W., *A study of cracking in reinforced concrete members subjected to pure tension*, Technical Report 42.468, Cement and Concrete Association, London, 1972.
- 53.Beeby, A. W., *The influence of the parameter ϕ / ρ_{eff} on crack width*, FIB Structural Journal, vol. 5, 2004.
- 54.Beeby A., R. Scott, *Cracking and deformation of axially reinforced members subjected to pure tension*, Magazine of Concrete Research, 2005.
- 56.Borosnyoi A., L. Balazs, *Models for Flexural Cracking in Concrete: The State of the Art*, Structural Concrete, vol.6,2,2005.
- 57.Borosnyoi A., I. Snobli, *Crack width variation within the concrete cover of reinforced concrete members*, Journal of the Hungarian Scientific Society of the Silicate Industry, Vol. 62, 3, 2010.
- 59.Broms, B.B., *Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members*, Journal of the American Concrete Institute, vol. 62/10,1965.
- 60.BS 8110-1:1997, *Structural use of concrete. Code of practice for design and construction.*
- 61.Cairns, J., *Performance of epoxy coated reinforcement at the serviceability limit state*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 104, 1994.

63. Carmo R., J. Valenca, D. Silva, D. Dias-da-Costa, *Assessing steel strains on reinforced concrete members from surface cracking patterns*, *Construction and Building Materials*, 2015.
64. Chan S.H.C., *Bond and cracking of reinforced concrete*, PhD Thesis, Cardiff University, Wales, 2012.
66. Commentary Eurocode 2, *European Concrete Platform ASBL*, 2008.
68. DIN 1045-1:2008, *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*.
69. Eckfeldt L., *Crack control for bridges – analysis of currently discussed European models in comparison to research results*, *Proceedings of 6th German – Japanese Bridge Symposium*, Berlin, 2005.
70. Eligehausen, R., G. Rehm, *Rissverhalten von Stahlbetonkörpern bei Zugbeanspruchung*, 1976.
72. Fantilli A., B. Chiaia, *Golden ratio in the crack pattern of reinforced concrete structures*, *Journal of Engineering Mechanics*, 2013.
73. Federation Internationale du Beton, *FIB Model Code 1990*, 1993.
74. Federation Internationale du Beton, *FIB Model Code 2010 - Final Draft*, 2011.
75. Ferry-Borges J., J. Lima, *Crack and deformation similitude in reinforced concrete*, *RILEM Bulletin*, 7, Paris, 1960.
77. Gilbert R., S. Nejadi, *An experimental study of flexural cracking in reinforced concrete members under sustained loads*, *The University of New South Wales, Australia*, 2004.
78. Goto, Y., *Crack formed in concrete around deformed tension bars*, *Journal American Concrete Institute, Proc. Vol. 68, 4*, 1971.
80. Han D., M. Keuser, X. Zhao, B. Langer, *Influence of transverse reinforcing bar spacing on flexural crack spacing on reinforced concrete*, *The Twelfth EAP Conference on SEC*, 2011.
81. Hartl G., *Die Arbeitslinie eingebetteter Stähle bei Erst und Kurzzeitbelastung*, *Dissertation*, 1977.
83. Hong S., W. Ko, S. Park, *New analytical approach of flexural crack width estimation for reinforced concrete beams*, *Advances in Structural Engineering*, Vol.16, 10, 2013.
84. Hussain S., P. Ferguson, *Flexural crack width at the bars in reinforced concrete beams*, *Research report 102-1 F, Center for Highway Research, Texas*, 1968.
85. Jason L., A. Torre-Casanova, L. Davenne, X. Pinelli, *Cracking behaviour of reinforced concrete beams: experiment and simulations on the numerical influence of the steel-concrete bond*, *Springer*, 2013.
86. Kelpsa S., M. Augonis, M. Dauksys, A. Augonis, *Analysis of crack width calculation of steel fibre and ordinary reinforced concrete flexural members*, *JSACE*, 2014.
87. Lam J., P. Ng, A. Kwan, *Tension stiffening in concrete beams, Part 2: member analysis*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Volume 164, Issue SB6*, 2011.
88. Leonhardt, F., *Crack control in concrete structures*, *IABSE Surveys, S-4/77, IABSE Periodica 3/1977*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, 1977.
90. Lin Y., *Tension stiffening model for reinforced concrete based on bond stress slip relation*, *The Pennsylvania State University, USA*, 2010.
91. MacGregor J., S. Rizkalla, S. Simmonds, *Cracking of reinforced and prestressed concrete wall segments*, *University of Alberta, Canada*, 1980.
92. Makhlouf M., F. Malhas, *The effect of thick concrete cover on the maximum flexural crack width under service load*, *ACI Structural Journal* 93, 3, 1996.
94. Narayanan R., A. Beeby, *Designers' guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. Eurocode 2 Design of Concrete Structures. General rules and rules for buildings and structural fire design*, *Thomas Telford*, 2005.
95. Ng P., J. Lam, A. Kwan, *Effects of concrete to reinforcement bond and loading conditions of tension stiffening*, *Procedia Engineering, Elsevier*, 2011.
96. Ng P., J. Lam, A. Kwan, *Tension stiffening in concrete beams, Part I: FE analysis*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Volume 164, Issue SB6*, 2011.
98. Perez A., *Estudio de Fisuración en Muros Pantalla- Informe Final*. CDTI, 2010.
99. Perez A., H. Peiretti, J. Iribarren, A. Soto, *Cracking of RC members revisited. Influence of cover, ϕ / ρ_{eff} and stirrup spacing. An experimental and theoretical study*, *Structural Concrete*, 2013.
100. Rehm G., H. Rüschi, *Versuche mit Betonformstählen Teil I-III*, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 140*, 1964.
103. Saliger R., *High grade steel in reinforced concrete*, *Preliminary Publication, 2nd Congress, IABSE, Berlin- Munich*, 1936.
105. Sokolov A., G. Kaklauskas, S. Idnurm, V. Gribniak, D. Bacinskas, *Tension-stiffening model based on test data of RC beams*, *Modern Building Materials, Structures And Techniques*, Vilnius, Lithuania, 2010.
107. Tamm K., S. Thelandersson, *Crack behaviour near reinforcing bars in concrete structures*, *ACI Structural Journal*, 2009.
108. Vandewalle L., *Cracking behavior of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers*, *Materials and Structures*, vol. 33, 2000.
109. Wahalathntri B., *Damage assessment in reinforced concrete flexural members using modal strain energy based method*, *PhD thesis, Queensland University of Technology, Australia*, 2012.
110. Welch G., M. Janjua, *Width and spacing of tensile cracks in reinforced concrete*, *Uniciv Report R76, School of Civil Engineering, University of New South Wales, Kensington, Australia*, 1971.
111. Wu H., R. Gilbert, *An experimental study of tension stiffening in reinforced concrete tension members under short-term and long-term service loads*, *The University of New South Wales, Sydney, Australia*, 2008.
124. http://www.zemic.com.cn/e/lianxi_show.asp?num=64
125. <http://www.hbm.com/>
126. <http://veda.com.ua/en>