



Минно-Геоложки Университет “Св. Иван Рилски”

Миннотехнологичен факултет

Катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини”

ул. „Проф. Боян Каменов”, 1700 София, България

маг. инж. Теодора Костова Тинкова

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен „Доктор”

Шифър и наименование на научната специалност:

02.08.09 „Обогатяване на полезни изкопаеми”

ОПТИМИЗИРАНЕ НА МОДЕЛНИЯ СЪСТАВ НА СТРОИТЕЛНИ МАТЕРИАЛИ НА ОСНОВАТА НА $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ С НИСКО СЪДЪРЖАНИЕ НА СВЪРЗВАЩО ВЕЩЕСТВО И ПОЛОЖИТЕЛЕН ЕКОЛОГИЧЕН БАЛАНС

Научен ръководител: доц. дтн инж. Ирена Григорова

Научен консултант: д-р инж. Георги Парасков

София, 2016

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини”, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ – София.

Пълният обем на дисертацията е 140 страници в 7 части, 22 таблици и 51 фигури. Използваната литература обхваща 160 заглавия на кирилица и латиница. Дисертацията се състои от въведение, десет глави обхващащи: литературен обзор, актуалност, цели и задачи на дисертационния труд, експериментална част, общи изводи и заключения, научно-приложни приноси, бъдещи насоки, списък на таблици, фигури и литературни източници, списък с публикациите по темата на дисертацията и едно приложение с включени 12 фигури и 160 литературни източника.

Фигурите и таблиците в текста на автореферата следват оригиналната номерация от текста на дисертацията.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред Научно жури, назначено от Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски” на 25.04.2016 г. от 15:00 часа в зала № 138 “Каолин”, Миннотехнологичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски”, гр. София на заседание на научното жури в състав:

1. Доц. д-р инж. Ирена Любенова Григорова - МГУ, катедра „ОРС“
2. Доц. д-р инж. Димитър Янков Мочев - МГУ, катедра „ОРС“
3. Проф. д-р инж. Методи Стоянов Методиев – експерт, външен член
4. Проф. д-р инж. Георги Стоянов Клисуранов - експерт, външен член
5. Доц. д-р инж. Георги Петров Меразчиев - експерт, външен член

Резервни членове:

1. Проф. д-р инж. Иван Михайлов Нишков – МГУ, катедра „ОРС“
2. Проф. д-р инж. Щилияна Димитрова Джендова – експерт, външен член

Автор: маг. инж. Теодора Костова Тинкова

Заглавие: Оптимизиране на моделния състав на строителни материали на основата на $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с ниско съдържание на свързващо вещество и положителен екологичен баланс

Научен ръководител: доц. д-р инж. Ирена Григорова

Научен консултант: д-р инж. Георги Парасков

Материалите във връзка с предстоящата защита са на разположение на заинтересованите лица в сектор „Следдипломна квалификация”.

Печат: Издателска къща „Св. Иван Рилски” – НИС – МГУ.

Съдържание на автореферата на дисертационния труд:	Стр.
I. Въведение и обща характеристика на дисертационния труд	5
II. Анализ на състоянието на проблема. Изводи от литературния обзор	6
III. Актуалност на разработката	7
IV. Обект и предмет на дисертационния труд	7
V. Цел и задачи на дисертационния труд	8
VI. Методология на изследването	8
VII. Експериментална част. Лабораторни изследвания за оптимизиране на състава на гипсови композити	9
VII.1. Охарактеризиране на материалите	9
VII.2. Изследване поведението на гипсовата суспензия съставена от полухидрат и добавките доломит, фелдшпат и мраморно брашно	10
VII.2.1. Изучаване на физико-механичните свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на доломит, фелдшпат и мраморно брашно	11
VII.3. Изучаване влиянието на строителни отпадъци	13
VII.3.1. Изучаване на физико-механичните свойства на оптимизирани гипсови състави със съдържание на строителни отпадъци	14
VII.4. Изследване на влиянието на пепелина от изгарянето на въглища	16
VII.4.1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на пепелина	16
VII.4.2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на пепелина в състава	17
VII.5. Лабораторни изследвания за изучаване на влиянието на каолин и шамот	19
VII.5. 1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на каолин и шамот	19
VII.5.2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на каолин и шамот	20
VII.6. Лабораторни изследвания за изучаване на влиянието на кварцов пясък	22
VII.6.1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на кварцов пясък	22
VII.6.2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на кварцов пясък	23
VII.7. Изследване на влиянието на десулфогипс	24
VII.7.1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на десулфогипс	24
VII.7.2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на десулфогипс	25
VII.8. Изводи от проведените лабораторни тестове	27
VIII. Оптимизиране на промишлени технологии	30
VIII.1. Производство на гипсови строителни плоскости	30
VIII.2. Подготовка на суровината	31
VIII.3. Инсталация за подготовка и дозиране на десулфодихидрат	32
VIII.4. Производствени тестове	33
VIII.5. Изводи от промишлените внедрявания	35
IX. Охарактеризиране на производствения и екологичен потенциал на оптимизирани моделни състави на гипсови композитни материали с ниско съдържание на свързващо вещество	36
IX.1. Цикъл на живот на продуктите	36

IX.2. Потенциал на технологията за производство на гипсови композити с намалено съдържание на свързващо вещество	36
X. Общи изводи	38
XI. Научно-приложни приноси	40
XII. Бъдещи насоки	40
XIII. Публикации по дисертационния труд	41
XIV. Литература, използвана в автореферата	41

I. Въведение и обща характеристика на дисертационния труд

Строителната индустрия оказва съществено влияние върху околната среда във всеки етап - от добива на минерални суровини през производствените процеси, включително генерирането на отпадъци и транспорта в цикъла на живот на всеки продукт. Моделът на екологична ефективност приспособен в съвременните промишлени технологии е насочен към усъвършенстване на всички нива и компетентен контрол на замърсяването, чрез повторна употреба, рециклиране и изграждане на симбиоза между строителната и други индустрии.

От една страна е необходимо използването на алтернативни суровини, чието приложение в производството на строителни материали би отговорило на потребностите на пазара. От друга страна, тези суровини трябва да притежават капацитета да редуцират интензивната консумация на енергия и вода, и да ограничат генерирането на въглеродни емисии, което би повишило ефективността на производствените процеси.

Гипсът ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) е сред най-широко употребяваните индустриални минерали в производството на строителни материали, поради неговите отличителни химични свойства и екологичен характер. Намира приложение като основна суровина за направата на гипсови мазилки, плоскости, подови елементи, гипсови блокове, лепила, както и като компонент в производството на цимент. Съвременните аспекти в развитието на строителната индустрия в световен мащаб са насочени към устойчиво развитие, което насърчава производството на „зелени“ материали.

Устойчивите строителни материали в контекста на зелените материали, изискват ефективно използване на ресурсите. Нещо повече, породено от бързия прогрес през последните години, развитието на световните пазари на гипсови композити, изисква заместване на природните минерални форми на гипса с негови синтетични еквиваленти като фосфогипс, борогипс, десулфогипс и флуорогипс. Тези вторични продукти са получени като резултат от различни технологични операции, включващи процесите на неутрализация в производството на киселини, обогатяването на цинкови и титанови руди и десулфуризацията на димни газове.

Целта на този концептуален подход е възпрепятстване на изтощаването на природните минерални ресурси и превенция на генерирането на индустриални отпадъци. За да ограничи високата консумация на енергия, вода и да се намали количеството въглеродни емисии, глобалната политика за устойчиво производство на строителни материали е ориентирана към въвеждане на нови подходи за заместване на основните изходни суровини от отпадни продукти, или необработени неорганични добавки, като метод за оползотворяването им.

Фокусът на дисертационния труд е насочен към изследване на възможностите за оптимизиране на моделните състави на строителни материали на основата на гипсови свързващи вещества, чрез въвеждане в матрицата на неорганични минерални компоненти. Същността на настоящата разработка се заключава в проучване на индустриалния синергизъм способен да затвори цикъла на устойчиво потребление на материалите, предлагайки нов живот на всеки продукт, преди да бъде разгледан като крайна форма и да бъде депониран или върнат обратно в природата.

Намалено е количеството свързващо вещество, което има за цел да бъде повишена екологичната ефективност на производствените процеси. Въз основа на проведените лабораторни и индустриални тестове са проектирани нови модели строителни материали и са намерени нови начини за оползотворяване на отпадни строителни и индустриални материали. В крайния етап от изследването е охарактеризиран производствения и екологичен потенциал на оптимизираните моделни състави на гипсови композитни материали с ниско съдържание на свързващо вещество.

В *първа част (Глава I)* е направен литературен обзор, включващ общи сведения за гипса, форми, свойства, синтетични еквиваленти, чистота, приложение на $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в строителството и характеристика на строителните материали на основата на гипс. Разгледани са и иновациите до момента в съвременните гипсови композити, а в заключение са

направени изводи от проведения литературен обзор.

Втора част (Глава II) на дисертацията конкретизира целите и задачите, които трябва да се решат в настоящата работа, както и актуалността на проблема.

Третата част (Глава III) посочва методологията на изследването и прилаганите съобразно стандартите изпитвания.

Четвърта част (Глава IV) на дисертационната работа обхваща експерименталната част на проекта, като основният фокус е върху проведените лабораторни изследвания. В края на тази част са направени общи изводи от интерпретираните експериментални данни.

В пета част (Глава V) на дисертацията са представени промишлените тестове и внедрявания на нови технологии в завод за производство на гипсови строителни плоскости (гипсокартон). В края на тази част са поместени общи изводи за оптимизираните системи и рецепти.

Шеста част (Глава VI) на дисертацията включва охарактеризиране на производствения и екологичен потенциал на оптимизираните моделни състави на гипсови композитни материали с ниско съдържание на свързващо вещество, като разглежда цикъла на живот на продуктите.

Общите изводи, заключения, научно-приложни приноси, литературни източници, публикации по дисертационния труд и Приложение I са описани в заключителната *седма част* на труда.

Получените резултати са публикувани в четири статии, от които две в международно научно списание, една в сборник на международен конгрес в чужбина и една в сборник на международна конференция в България.

II. Анализ на състоянието на проблема. Изводи от литературния обзор

Поради специфичните свойства, обусловени от фазовите преходи и образуването на нови форми, гипсът е сред най-широко прилаганите минерални суровини за производство на строителни продукти. В някои случаи природната минерална форма се добива с високо съдържание на анхидрит, което го прави нестабилен и трудно приложим като добавка в портланд-цимента, тъй като се разтваря твърде бавно във вода. В тези случаи, успешно се прилагат синтетичните форми на гипса.

Композитните материали на основата на гипс притежават отлични свойства като ниска топлопроводност, в резултат на което мазилките, плоскостите и панелите имат добри топлоизолационни показатели. Създаването на гипсови свързващи вещества с управляеми свойства се постига чрез добавяне най-често на химични модификатори. В производството на гипсови строителни плоскости за интериорно приложение се прилагат суперпластификатори, восъчни емулсии, нишесте, пенообразуващи агенти, борна киселина и декстроза. Чрез тях се контролират свойства като водоустойчивост, обработваемост на гипсовата смес и се постига ниско тегло на крайните продукти.

Както за природните минерални форми на гипса, така и за синтетичните му еквиваленти степента на чистота на изходната суровина е от съществено значение. Колкото по-висока е чистотата на материала, толкова по-малка е вероятността от вредни ефекти на примесите върху качеството на получените междинни и крайни продукти, както и за поведението на калциевия сулфат в процеса на хидратация. Видът и количеството на примесите може да варира според условията на образуване. За синтетичните десулфогипсове, например, има значение типа и качеството на изгаряните въглища.

Въз основа на изследванията през 30^{-те} и 40^{-те} години на миналия век са патентовани множество гипсови строителни материали, които все още намират приложение в модерното строителство: гипсови мазилки съдържащи анхидрит, варовик, калиев или алуминиев сулфат (Lefebure, 1932); леки гипсови мазилки (Best, Marsh, 1936); мазилки на основата на доломитна вар и гипс; вароциментова мазилка на основата на гипс, доломитна вар, алуминиев сулфат и пясък (King, 1935); пожароустойчиви мазилки с контролирано водопоглъщане, съдържащи калциев сулфат и фин експандиран вермикулит (Denning, 1937);

гипсова мазилка на основата на калциев сулфат и калциева сол-цитрат, малат и сукцинат (Himsworth, Dunn, 1938); композити на основата на калциев сулфат, доменна шлака и портланд-цимент (или варно мляко) с висока якост (Wallace, Lefebure, 1941) и др.

При съвременното ниво и мащаби на материално потребление, значението на фактора „*пълноценно използване на ресурсите*” придобива първостепенно значение.

Съвременните авангардни подходи в производството на строителни материали са базирани на възможностите за приложение на техногенни отпадъци чрез инкорпориране в матрицата на композитите. Добавянето на инертни материали в рецептата ще резултира във влошаване на якостните показатели и редица други свойства на крайните продукти. Поради тази причина, от съществено значение е от една страна да бъдат подбрани подходящи модификатори, а от друга да бъде избран неорганичен добавъчен материал чийто състав и зърнометрия осигуряват максимална компактност на матрицата. От съществено значение за развитието на строителния сектор е не само създаването на нови композити, но също така и подобряването на параметрите на съществуващите чрез оптимизиране на основните им свойства. Един от най-проучваните проблеми в този сектор е намаляването на плътността на крайните продукти. Леките композити представляват интерес поради възможността за намаляване на количеството суровини, добавки, енергия, вода и всички останали ресурси, използвани в производствата. В същото време материалите са много по-лесни за монтаж, обработка и транспорт. Това балансирано решение превръща тази изследователска ниша в една от най-перспективните в сектора на строителната индустрия. Новите строителни материали са проектирани да отговорят на политиката за устойчиво развитие в аспекта на целия цикъл на живот на продуктите, в по-широк аспект включително ефективната употреба на природни минерални суровини. Това е предпоставка за повишаване на енергийната ефективност, което от своя страна води до намаляване на промишлени въздействия върху околната среда.

В заключение, базирайки се на проучената обширна библиография би могло да се твърди, че постигането на устойчив характер на производството на гипсови строителни материали е възможно с понижаване на количеството свързващо вещество в рецептата.

III. Актуалност на разработката

Придобиването на устойчив характер в глобалната употреба на полезни изкопаеми, изисква съкращаване на приложението на природни суровини и замаяната им със синтетични еквиваленти. Един от най-перспективните индустриални минерали, използвани в производство на зелени строителни материали е калциевият сулфат дихидрат. От суровина до най-висок клас композит, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ преминава през редица енергоемки процеси, които притежават свой собствен отпечатък върху околната среда.

Актуалността на тематиката на дисертационния труд се съдържа в разработването на нови модели за оползотворяване на техногенни суровини и методи за повишаване на устойчивостта на промишлените производства, в контекста на рационалната употреба на полезни изкопаеми.

Практическата значимост на дисертационния труд се заключава в създаването на подходящ метод за утилизация на строителни отпадъци и повишаване на енергийната и водна ефективност в производствата на гипсови композитни материали.

IV. Обект и предмет на дисертационния труд

Обект на изследване в настоящия дисертационен труд са девет вида инертни материали, прибавяни в различно процентно съотношение към β -полухидрат, с цел създаване на нови модели гипсови строителни композити.

Предметът на изследване в разработката е създаването на нова технология за производство на гипсови строителни материали с ниско съдържание на свързващо вещество.

V. Цел и задачи на дисертационния труд

Основната цел на дисертационния труд е насочена към разработването на нова технология за производство на гипсови строителни материали с ниско съдържание на свързващо вещество. С оглед изпълнението на формулираната цел и създаването на нови композитни материали с приложимост в практиката, чрез промяна на рецептурните параметри е необходимо да се решат следните задачи:

1. Да бъде извършен задълбочен литературен преглед на съществуващите до момента производствени технологии и продукти на основата на $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
2. Да се разработят нови строителни елементи с ниско съдържание на свързващо вещество и различно обемно съдържание на инертни материали.
3. Да се проведат лабораторни експерименти за изучаване и избор на най-подходящи инертни материали за провеждане на промишлени тестове.
4. Да се реализират промишлени експерименти, въз основа на които да се изучи потенциала на приложимост на новите композитни структури.
5. Да се реализира нова технология за производство на гипсови строителни материали с ниско съдържание на свързващо вещество.
6. Да се охарактеризира производствения и екологичен потенциал на оптимизираните моделни състави на гипсови композитни материали с ниско съдържание на свързващо вещество.

VI. Методология на изследването

Въз основа на направения литературен обзор, бяха избрани девет вида инертни материали, прибавяни в различно процентно съотношение към β -полухидрат, с цел създаване на нови модели гипсови строителни композити. Експериментите са проведени със следните добавки, а именно: шамот; доломит; фелдшпат; мраморно брашно; пепелина; каолин; кварцов пясък; десулфодихидрат; мултикомпонентна смес от строителни отпадъци, прибавени към β -полухидрата.

В съответствие със стандарт EN 13279 съдържанието на калциев сулфат трябва да бъде не по-малко от 50 %, за да се разглежда като гипсово свързващо вещество. Ето защо, избрахме количеството на добавяните материали да започне от 5 %, през стъпка от 10 %, като най-високото съдържание на добавяния материал в обема на матрицата е 45 %. Обхвата на изследването включва тестове, съответстващи на стандартите прилагани в производството на гипсови строителни материали (EN 13279; EN 15283; EN 520), но за да бъде получена по-добра представа за полезността на заместващите компоненти и ефективността на оптимизираната матрица, за част от експериментите са използвани адаптирани методики.

Първата група експерименти бяха проведени в лабораторни условия и въз основа на резултатите от предварителните тестове бяха подбрани най-подходящите добавки, някои от които в по-късен етап бяха имплементирани в реални производствени условия.

За да бъдат оценени рецептурно-технологичните параметри на изпитваните прототипи, като референтна проба бе използван опростен гипсов състав от β -полухидрат и вода. Избрахме да фиксираме водо-гипсовото отношение – 0.70, а да варираме с обемното съдържание на инертен материал, за да бъде адекватно характеризирането при равни условия.

Изследвани са гипсови смеси и тела приготвени с вариращо съотношение $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ – добавка, със стандартно водо-гипсово отношение – 0.70, като фактор влияещ върху техните свойства. Изследвани са десулфодихидрат, кварцов пясък и строителни отпадъци в съдържание 5÷45 % от обема на композитните смеси. Поради спецификата на резултатите от предварителните тестове изследвахме пепелината с максимално съдържание до 35 %. Останалите инертни материали бяха добавяни в количество до 25 % от състава на пробните тела и смеси.

За да отговарят на стандартите за строителни материали на основата на гипс и за да бъдат обективни оценките за ефективността на оптимизираните състави, изготвените смеси и пробни тела бяха изследвани на: водо-гипсово отношение, определяне на консистенция на гипсова смес, време на свързване, плътност на пробни тела, якост на опън при огъване и модул на еластичност, якост на натиск, кохезия на ядрото, определяне на обща абсорбция на вода, свиваемост, образуване на пукнатини и степен на залепване на гипсовата матрица към картон преди сушене.

VII. Експериментална част. Лабораторни изследвания за оптимизиране на състава на гипсови композити

За по-пълно характеризиране на механизма на действие на изследваните инертни материали, експериментите са разделени на три цикъла:

- ❖ Охарактеризиране на материалите;
- ❖ Изследване поведението на гипсовата суспензия съставена от полухидрат и добавки;
- ❖ Изследване на физико-механичните свойства на оптимизираните гипсови тела.

VII.1. Охарактеризиране на материалите

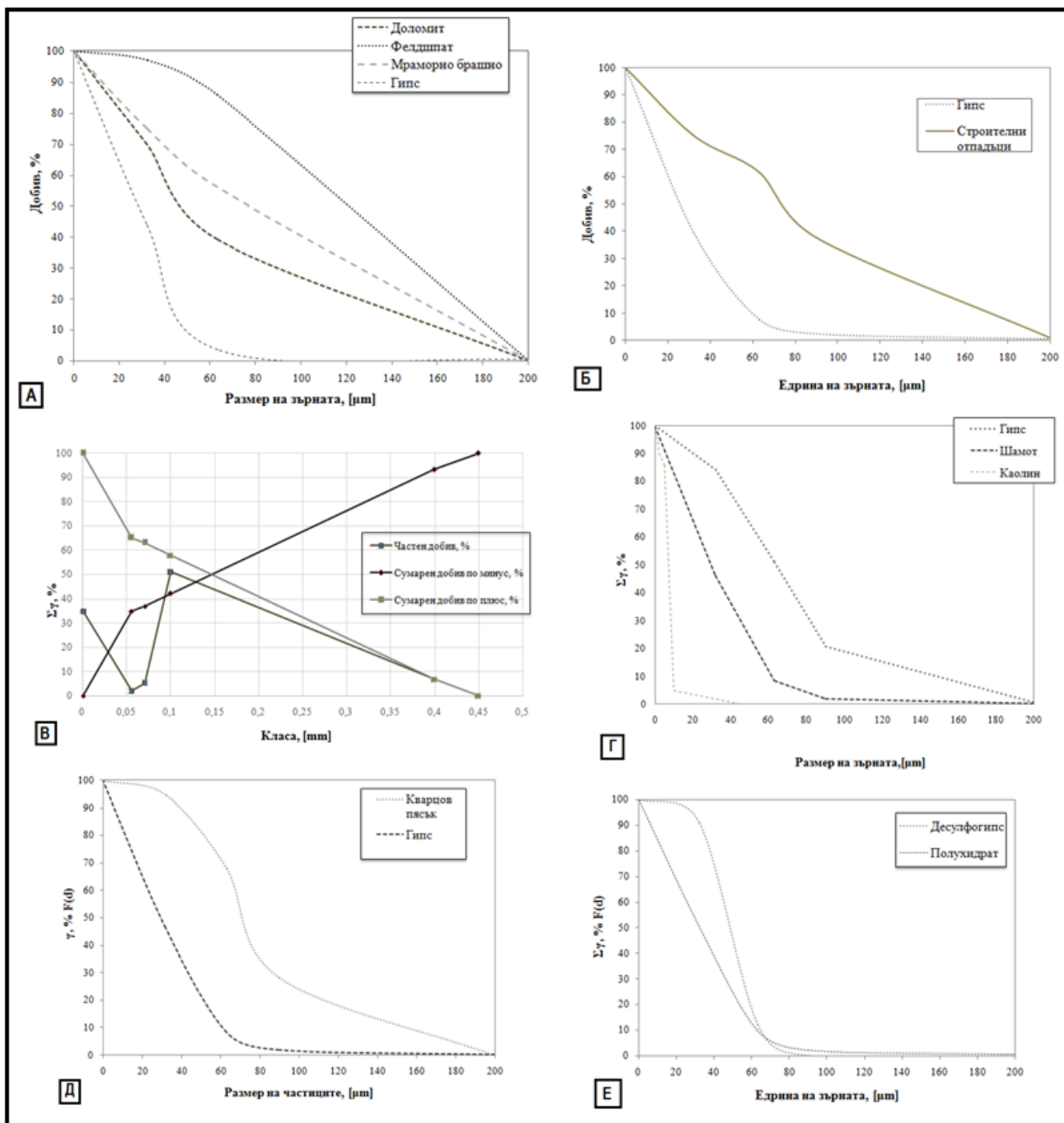
С цел по-подробно изучаване и охарактеризиране на изследваните добавки е установен техния химичен, зърнометричен състав и физични характеристики. Наред с предоставените от някои производители спецификации, използваните за изследването добавъчни материали бяха характеризирани с измерване на рН, фазов състав, определяне на специфична повърхност по Блейн, обемна плътност в насипно и уплътнено (стръскано) състояние.

На фигура 1 са представени зърнометричните характеристики на изследваните добавки.

Производството на гипсови строителни материали, най-вече тяхната зърнометрична подготовка и калцинация са енергоемки процеси. Ето защо избрахме да изследваме потенциала на строителните отпадъци като заместващ свързващото вещество материал. Заместващият компонент е средна проба от строителни отпадъци, получени като ситнеж от мобилна трошачно-сортировъчна инсталация. Материалът представлява мултикомпонентна смес от тухли, керемиди, бетон, плочки и други строителни материали получени от разрушителните дейности на строителни обекти.

За целите на експерименталната работа е използвана и проба от депото за пепелина на ТЕЦ „Марица Изток 3”.

Десулфогипсът е вторичен продукт, получен в резултат на реакция между CaCO_3/CaO и $\text{SO}_2\uparrow$, протичаща в процеса на почистване на вторични газове образувани при изгарянето на въглища. Ето защо неговите качества, като форма, размер на кристалите и зърнометричен състав се определят изцяло от параметрите на електроцентралата и генезиса на използваните горива. Близко 76% от генерирания десулфогипс намира приложение в строителната промишленост (Feuerborn, 2013). Поради еквивалентните свойства, състав и структура, този вид синтетичен гипс успешно замества природната минерална форма, и също като него трябва да премине през процеси на смилане, сушене и калцинация, за да се получи целевото свързващо вещество.



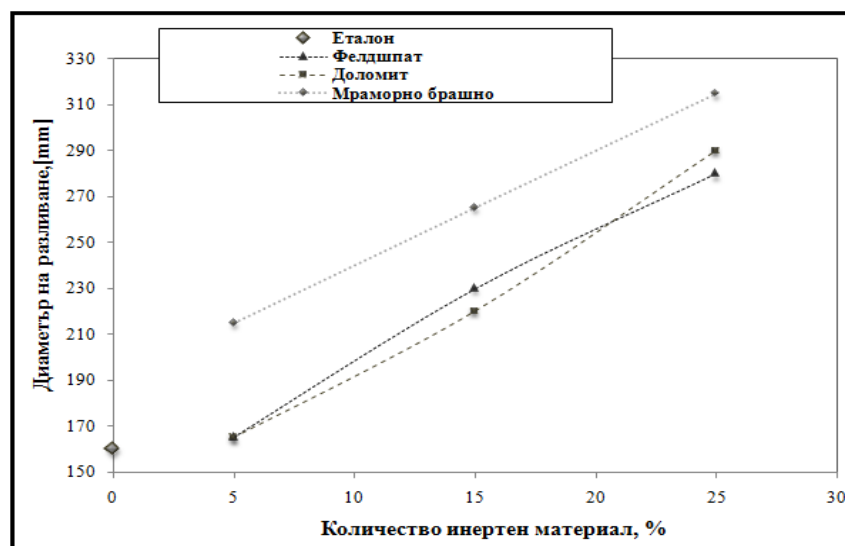
Фиг. 1. Зърнометрична характеристика на суровините

Легенда: А: доломит, фелдшпат, мраморно брашно и гипс; Б - гипс и строителни отпадъци; В – пепелина; Г - гипс, шамот и каолин; Е - десулфогипс и полухидрат.

VII.2. Изследване поведението на гипсовата суспензия съставена от полухидрат и добавките доломит, фелдшпат и мраморно брашно

Бяха определени стандартна консистенция и време на свързване на проектираните смеси. Трите минерални добавки са прибавяни към полухидрата в три стъпки през 10 %. Проби от β-полухидрат и вода (еталон) бяха изготвени за да бъдат сравними резултатите получени от изпитването. Данните от измерванията на времената на свързване (начало/край) са представени в Таблица 3, а разливността на гипсовата суспензия е илюстрирана на Фигура IV.2.

Представените на Фигура IV.2 резултати показват, че течливостта на сместа се увеличава с нарастване на количеството добавъчен материал.



Фигура IV.2. Зависимост между диаметъра на разливане на гипсовата суспензия и количеството фелдшпат, доломит и мраморно брашно

Както би могло да се наблюдава от резултатите представени в Таблица 3, времето на свързване на гипсовата суспензия нараства пропорционално с нарастване на количеството добавен инертен материал. Най-добри резултати бяха постигнати след прибавяне на 25% мраморно брашно.

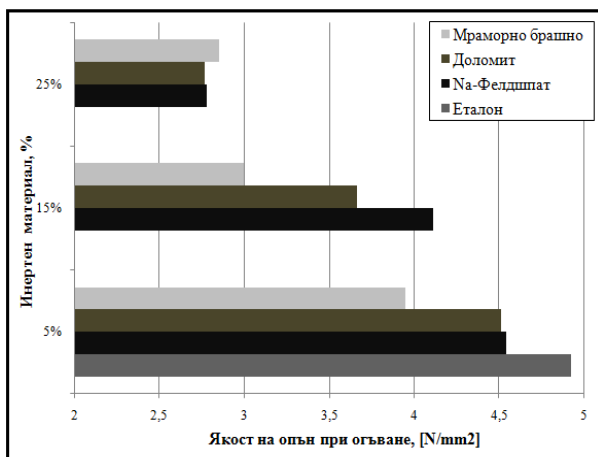
Таблица 3. Време на свързване на гипсовата смес със съдържание на доломит, фелдшпат и мраморно брашно, (min:s)

Еталон		Заместващ материал	Фелдшпат		Доломит		Мраморно брашно	
Начало	Край		Начало	Край	Начало	Край	Начало	Край
01:40	04:10	5%	01:50	04:10	02:00	04:25	01:50	04:15
		15%	02:00	04:20	02:05	04:20	02:00	05:05
		25%	02:10	05:20	02:10	05:20	02:10	05:50

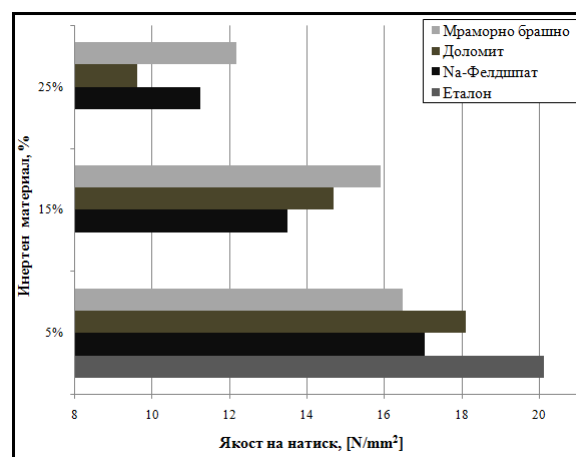
Нарастването на разливността и удължаването на времето на свързване са предпоставки за редуциране на количеството пластификатори в производството на композитни материали или за намаляване на водо-гипсовото отношение. То от своя страна ще доведе до по-малък излишък от вода и до понижаване на разходите за изсушаване на крайните продукти.

VII.2.1. Изучаване на физико-механичните свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на доломит, фелдшпат и мраморно брашно

Бяха изследвани якостно-деформационните характеристики на призматични гипсови тела съставени от полухидрат и различен процент добавъчен материал, предварително изсушени до постоянно тегло и кондиционирани в ексикатор. Резултатите представени на Фигура IV.3 и Фигура IV.4, показват, че с нарастване на количеството инертен материал в гипсовото тесто, устойчивостта на разрушаване на пробните тела намалява.



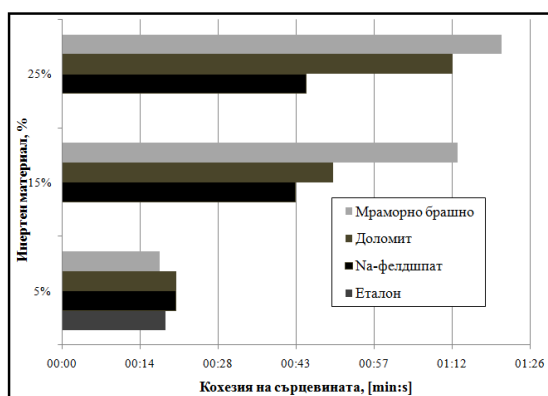
Фигура IV.3. Зависимост между якостта на опън при огъване на гипсови тела и количеството добавен инертен материал в състава, 5÷25%



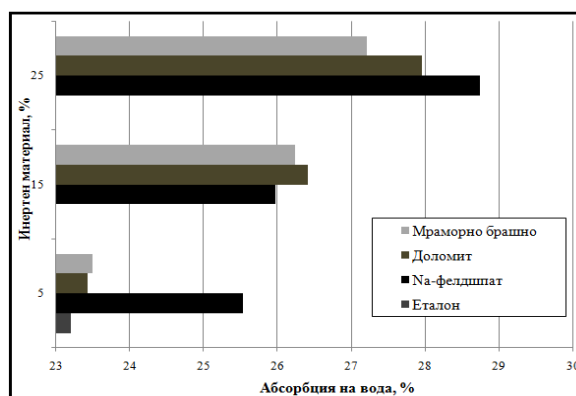
Фигура IV.4. Зависимост между якостта на натиск на гипсовите тела и количеството инертен материал в състава, 5÷25%

❖ Кохезия на ядрото и обща абсорбция на вода

Изследвана е кохезията на ядрото на оптимизирани гипсови тела със съдържание 5%, 15%, 25% добавъчни материали в съответствие със стандарт EN 520.



Фигура IV.5. Зависимост между кохезията на гипсовите тела и добавяното количество инертни материали (доломит, фелдшпат и мраморно брашно), 5 ÷ 25%



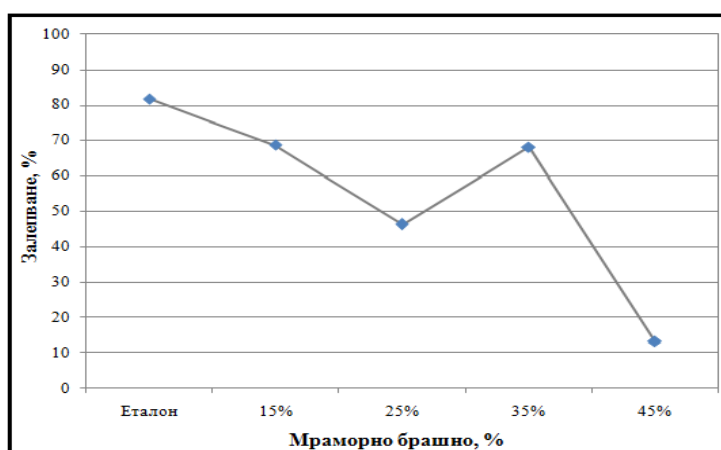
Фигура IV.6. Зависимост между абсорбцията на вода на гипсовите тела и количеството инертен материал, 5 ÷ 25%

По-добрата кохезия на пробите с добавен инертен материал най-вероятно се дължи на пониженото количество дихидрат в тях. Това води до намаляване на свиваемостта на телата при висока температура, както и на първоначалното експандиране на телата при изпаряване на водата от кристалната решетка на дихидрата. По-добрите стойности за мраморно брашно и доломит се дължат на зърнометрията на тези материали (наблюдава се равномерно разпределение на всички фракции), за разлика от натриевия фелдшпат, при който липсват фини фракции. В резултат на проведените изследвания беше установено, че всички минерални пълнители могат да запазят или незначително да увеличат водопоглъщането на гипсовите тела. Повишаването на водопоглъщането на пробните тела се дължи на сравнително високите хидрофилни свойства на използваните инертни материали.

Изследване за образуването на пукнатини бе проведено само с мраморно брашно, поради добрите резултати от предходните тестове. Не се наблюдава образуване на пукнатини.

❖ Степен на залепване на гипсовата матрица към картон преди сушене

В производството на гипсови строителни плоскости от първостепенно значение е площта на покритата с хартия гипсова матрица (залепване). В контрола на производствените процеси, оценките за залепване на плоскостите преди сушене и след сушене са субективни. За целите на нашата експериментална работа приложихме адаптирана методика, като изследвахме степента на залепване на картон и оптимизиран състав от β -полухидрат и мраморно брашно в количество 15%, 25%, 35% и 45% от обема на гипсовата смес.



Фигура IV.8. Зависимост на степента на мокро залепване от количеството мраморно брашно в състава на сместа, 15 ÷ 45%

За да бъдат съпоставими резултатите е приготвена опростена проба от полухидрат и вода (Standard). Гипсовите смеси са изготвени със стандартно водо-гипсово отношение от 0,70. Образците не са изсушавани преди отлепването на хартията.

Трябва да се отбележи, че вероятно точка 2 на Фигура IV.8, означаваща пробата със съдържание на 25% мраморно брашно, може да се разглежда като аномална. Пробите със съдържание 15% и 35% показват близки резултати. Влошаването на процента залепване спрямо еталонната проба е $13,06 \div 13,58\%$. След добавяне на 45% мраморно брашно залепването се влошава значително.

VII.3. Изучаване влиянието на строителни отпадъци

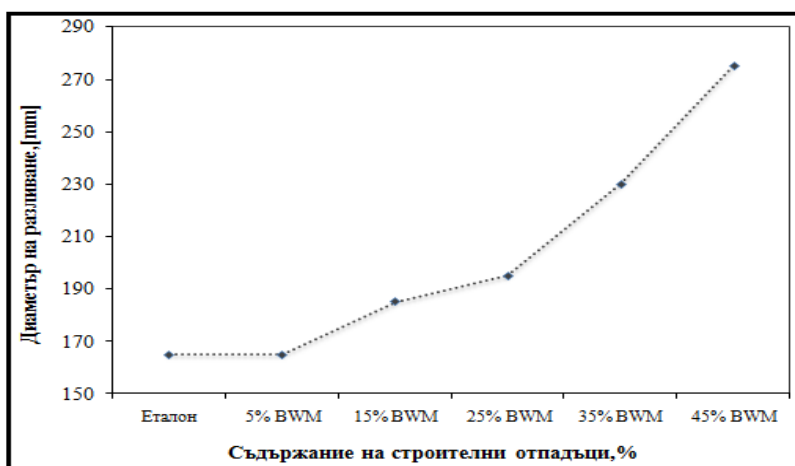
Целта на експериментите е да се проследи промяната в поведението на гипсова суспензия и гипсови тела чрез добавяне на 5%, 15%, 25%, 35% и 45% средна проба от строителни отпадъци като заместващ полухидрата материал. Проектираната композитна смес и оптимизираните гипсови тела са приготвени със стандартно вода-свързващо вещество отношение: 0,70. Тестовете са проведени в съответствие със стандартите EN 13279, EN 520, EN 15283 и ASTM адаптирани методи за изпитване. Опростени проби състоящи се само от гипс и вода бяха изготвени като еталонни, за съпоставимост на резултатите. Бяха проведени предварителни тестове за определяне на времето на свързване, резултатите, от които са поместени в Таблица 5.

Таблица 5. Време на свързване на гипсова смес със съдържание на строителни отпадъци, 5 ÷ 45%

Време на свързване	Единица за измерване	Еталон	Количество строителни отпадъци в сместа, %				
			5	15	25	35	45
Начало	min:s	01:50	01:50	01:55	01:55	02:00	02:30
Край	min:s	05:30	05:30	05:50	06:10	06:10	07:05

По време на експериментите регистрирахме плавно повишаване на първото време на свързване, което е по-значимо едва след прибавянето на 45% инертен материал в състава.

Втората група тестове за обработваемост на оптимизираната смес, чрез цилиндъра на Сутард, изследват рецепти с различно обемно съдържание на строителни отпадъци. Резултатите са илюстрирани на Фигура IV.11. Нарастването на количеството отпадъци в гипсовата смес резултира в повишаване на течливостта на суспензията.

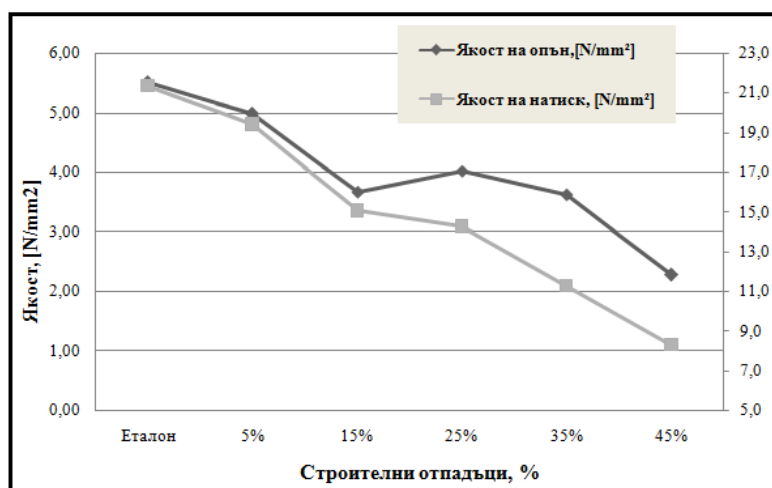


Фигура IV.11. Разливност на гипсова суспензия с различно съдържание на строителни отпадъци (BWM), 5 ÷ 45%

VII.3.1. Изучаване на физико-механичните свойства на оптимизирани гипсови състави със съдържание на строителни отпадъци

❖ Якостно-деформационни характеристики

В резултат на проведените лабораторни експерименти и получените резултати, определено може да се твърди, че с увеличаване на количеството строителни отпадъци в матрицата на пробните тела намалява тяхната механична устойчивост.



Фигура IV.12. Зависимост между якостните свойства на гипсовите тела и количеството добавени строителни отпадъци, 5 ÷ 45%

От резултатите показани на Фигура IV.12, ясно се вижда, че якостта на натиск и якостта на опън на гипсовите тела имат обща тенденция към намаляване на издръжливостта на натоварване. Механичното поведение на повечето свързващи

материали изключително зависи от типа, количеството и зърнометричния състав на добавките. Това може да се обясни от теорията на Грифитс за образуване на пукнатини. Според хипотезата, материалите имат първични, случайно ориентирани микропукнатини. Под действието на външни сили върху материала, при върха на тези микропукнатини или близо до тях се концентрират напрежения, които създават условия за разпространение на пукнатините и довеждат до разрушаване на тялото. Това прави по-лесно предаването на възникващите повърхностни напрежения и бързото разтваряне на пукнатините в матрицата на пробното тяло, което резултира в понижаване на издръжливостта. В огъващия момент на композитното гипсово тяло, модулът на еластичност се запазва дори при по-високи проценти инертен материал в обема. Независимо от това, може да се твърди, че процесът на микропукнатинообразуване протича много бързо, което предизвиква отваряне на макропукнатини, като основна причина за загубата на якост при нарастване на съдържанието на строителни материали в пробните тела.

❖ Кохезия на ядрото

За провеждането на експериментите беше използвана многокомпонентна смес (BWM) за изготвяне на гипсови тела с оптимизирана матрица за изпитване на пожароустойчивост. Както може да се види от резултатите представени в Таблица 6, съществено изменение на устойчивостта се отчита едва след включването на 15% строителни отпадъци в обема на матрицата, като регистрирахме повишаване с 15 s. Най-добри резултати постигнахме за пробите със съдържание на 35% и 45% отпадъци, съответно 47 s и 1:14 min.

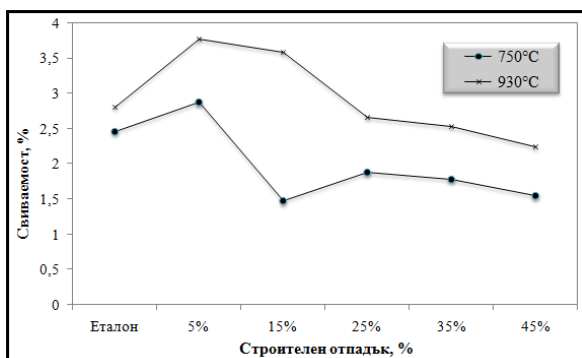
Таблица 6. Кохезия на ядрото на гипсови тела с различно съдържание на строителни отпадъци, (min:sec)

Проба	Единица	Резултат	Резултати				
			Количество строителни отпадъци в сместа, %				
Еталон	min:s	00:04	5	15	25	35	45
BWM	min:s		00:05	00:19	00:36	00:51	01:18

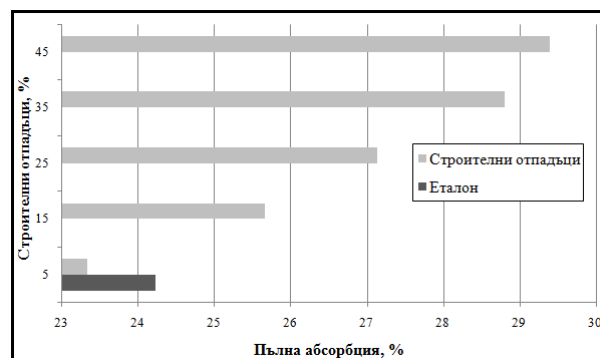
❖ Свиваемост и пълна абсорбция на вода

На Фигура IV.13 е представена зависимостта на степента на свиваемост от нарастването на количеството строителни отпадъци. С повишаване на процента инертен материал в обема на телата, започва постепенно намаляване на общата свиваемост на призмите. Тук следва да се отбележи съдържанието на тухли, керемиди и керамични плочки като компоненти на сместа от строителни отпадъци. Вероятно спецификата на състава обуславя намаляването на общата свиваемост на гипсовите образци.

Определена беше пълната абсорбция на вода на кубични гипсови тела (Фиг. IV.14). Резултатите показват, че с нарастване на количеството строителни материали в състава с 10%, нараства водопоглъщането с близо 1,5%. Образците със съдържание 45% отпадъци показват 5% по-висока степен на абсорбция сравнени с еталонната проба. Добавянето на инертните материали оказва негативен ефект по отношение на степента на водопоглъщане.



Фигура IV.13. Зависимост между свиваемостта на гипсови призми и количеството добавен строителен отпадък, 5 ÷ 45%



Фигура IV.14. Зависимост между абсорбцията на вода на гипсови тела и количеството добавен строителен отпадък, 5 ÷ 45%

❖ Залепване

За да бъде завършен този цикъл тестове беше извършена симулация в лабораторни условия на „мокро“ залепване на гипсови тела с високо съдържание на строителни отпадъци в състава на сместа. Целта на тази група опити е да се определи ефективността за приложение на отпадъците в производството на гипсови строителни плоскости, където най-важна е връзката между хартията и гипсовата матрица. От данните илюстрирани на Фигура IV.15 ясно се вижда, че залепването слабо се влошава след прибавяне на 15 ÷ 25% строителни отпадъци в порядъка на 3 ÷ 7% спрямо референтната проба.



Фигура IV.15. Залепване на гипсови тела и хартия, преди сушене с нарастващо процентно съдържание на строителни отпадъци в състава на матрицата, 15 ÷ 45%

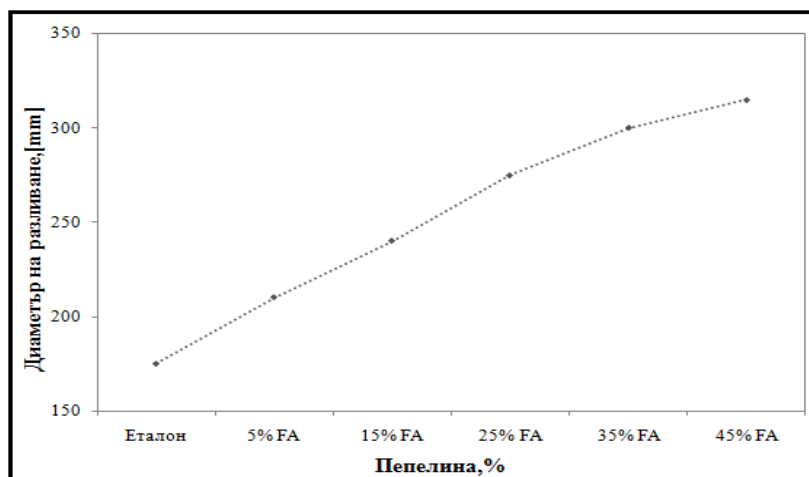
VII.4. Изследване на влиянието на пепелина от изгарянето на въглища

VII.4.1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на пепелина

За определяне на параметрите на гипсовата смес бяха измерени време на свързване и диаметър на разливане. Резултатите от лабораторните експерименти са представени на Фигура IV.18 и Таблица 8.

От получените резултати може да се види, че с увеличаване на процента пепелина (FA) в състава на гипсовата смес, диаметърът на разливане на суспензията значително нараства.

Наред с промяната в течливостта на гипсовата суспензия, беше отчетено и значително изменение във времето на свързване на композитното тесто (начало/край).



Фигура IV.18. Зависимост между диаметъра на разливане от количеството пепелина в състава на сместа, 5 ÷ 45%

Таблица 8. Време на сръзване на оптимизирана гипсова смес със съдържание на пепелина, 5-45%

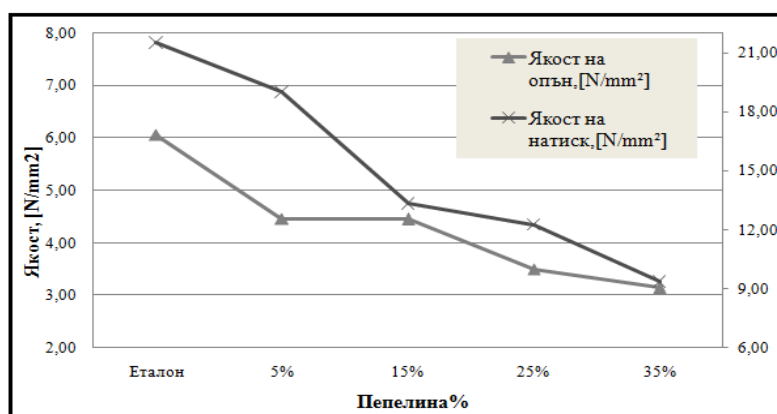
Време на свързване	Единица за измерване	Еталон	Количество пепелина в сместа, %				
			5	15	25	35	45
Начало	min:s	01:45	01:55	02:10	02:25	02:35	02:55
Край	min:s	05:45	05:50	06:30	07:05	07:25	08:10

VII.4.2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на пепелина в състава

Въз основа на получените резултати и наблюдаваната степен на разливност на гипсовата суспензия, избрахме механичните свойства на гипсовите тела да бъдат изпитани при максимално съдържание на пепелина 35% в матрицата.

❖ Механични свойства

Бяха проведени лабораторни изследвания за установяване на якостно-деформационните характеристики на призматични гипсови тела, съставени от β-полухидрат и нарастващ процент пепелина в матрицата, предварително изсушени до постоянно тегло и кондиционирани в ексикатор. Преди провеждане на изпитването е измерена плътността на пробните тела. В съответствие със стандарта EN 13279 за всеки процент армиращ материал, бяха приготвени по три броя гипсови тела. Резултатите са илюстрирани на Фигура IV.19.



Фигура IV.19. Зависимост на якостните свойства на гипсовите тела от количеството пепелина в състава им, 5 ÷ 35%

Приготвените композити на основата на пепелина и β -полухидрата показват тенденция към намаляване на плътността и плавно понижаване на якостните показатели (Фиг. IV.19).

❖ Кохезия на ядрото

Експерименталните резултати, представени на Таблица 9 показват, че включването на 5% и 15% инертен материал в състава на гипсовите тела се характеризира с удвояване на времето на пожароустойчивост.

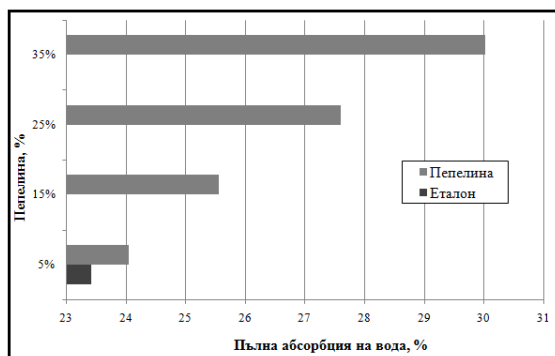
Таблица 9. Кохезия на ядрото на гипсови пробни тела със съдържание на пепелина в обема на матрицата, (min:s)

Проба	Единица	Резултат	Резултати			
			Количество пепелина в сместа, %			
Еталон	min:s	00:10	5	15	25	35
Пепелина	min:s		00:21	00:22	01:17	01:19

❖ Свиваемост, пълна абсорбция на вода и степен на залепване

От анализа на получените резултати може да се твърди, че с повишаване на количеството пепелина в състава на гипсовите призми се наблюдава тенденция към слабо повишаване на общата свиваемост на телата при температура 750⁰С.

Следвайки алгоритъма на изследването избрахме да проведем лабораторни тестове за пълна абсорбция на кубични гипсови тела с различно обемно съдържание на пепелина в състава. Установихме, че в резултат на варирането на количеството пепелина в матрицата на пробните тела се повишава степента на водопоглъщане в границите на 0,5 ÷ 6,6% от степента на пълна абсорбция на референтните проби.



Фигура IV.20. Зависимост между абсорбцията на вода на гипсовите тела и количеството пепелина в матрицата



Фигура IV.21. Залепване на гипсови тела и хартия, преди сушене с нарастващо процентно съдържание на пепелина в състава на матрицата, 15 ÷ 45%

Нарастването на абсорбцията на вода до голяма степен се дължи и на намаляването на обемното тегло на образците с по-високо съдържание на пепелина.

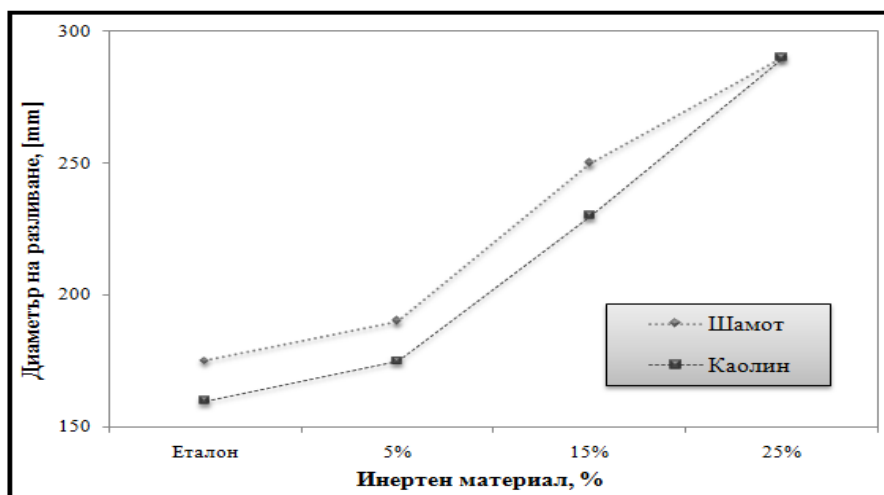
За да определим какво количество пепелина в матрицата е близко до оптимума, изследвахме степента на залепване на хартия (картон) към гипсови смеси. Добавянето на 15% пепелина, влошава степента на покриване на гипсовата сърцевина от хартията с близо 20%. При най-високите процентни съдържания (35% и 45%) на инертен материал не е регистрирано залепване между ядрото и хартията. Качеството на залепване, може да се наблюдава на Фигура IV.21.

VII.5. Лабораторни изследвания за изучаване на влиянието на каолин и шамот

VII.5. 1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на каолин и шамот

Изследвано беше влиянието на каолин и шамот върху времето на свързване и разливността на гипсовата суспензия. Резултатите са представени в Таблица 11 и на Фигура IV.23. Анализът на илюстрираните резултати показва понижаване на вискозността при добавяне на 15% инертен материал с 43,75% (230 mm). Колкото по-висок процент каолин добавяхме, толкова повече се втечняваше суспензията, така за пробите със съдържание на 35% каолин регистрирахме увеличение на разливността до 320 mm.

Резултатите от изпитването на гипсовата смес, след прибавяне на шамот като заместващ полухидрата материал са близки до тези на каолина. Както се вижда от кривата на Фигура IV.23, заместването на гипса с 5% шамот повишава течливостта на сместа с 8.57%, а 15% шамот резултат в нарастване на разливността с 42,86% спрямо базисната проба.



Фигура IV.23. Зависимост между диаметъра на разливане и количеството инертен материал в суспензията, 5 ÷ 25%

Таблица 11. Време на свързване на гипсова суспензия със съдържание на каолин и шамот, (min:s)

Еталон		Каолин	Резултат	
начало	край		начало	край
01:40	05:25	5%	01:55	05:30
		15%	02:05	06:15
		25%	02:15	06:45
Еталон		Шамот	Резултат	
начало	край		начало	край
01:50	05:50	5%	02:05	06:00
		15%	02:15	06:30
		25%	02:40	07:05

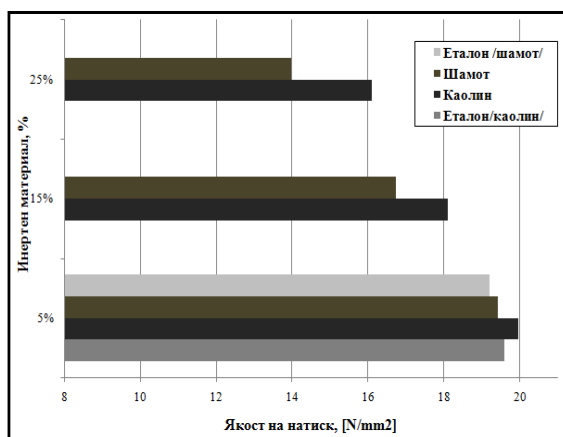
Разбира се, съществува взаимовръзка между степента на разливане и времето на свързване на гипсовата смес. Пропорционално на развитието на тази зависимост между течливостта и количеството инертен материал, се отчита тенденция към удължаване на

времената на свързване при нарастване на количеството каолин или шамот в композитната смес.

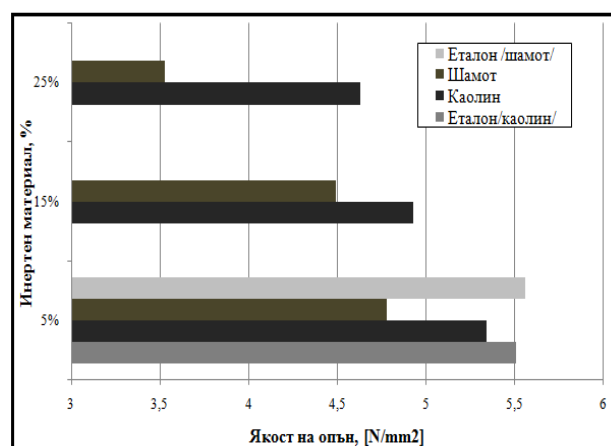
VII.5. 2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на каолин и шамот

❖ Механични свойства

От представените на Фигури IV.24 и IV.25 данни се наблюдава обща тенденция към намаляване на устойчивостта на гипсовите тела. Шамотът като заместващ материал показва по-ниски резултати на якост от пробите съдържащи каолин.



Фигура IV.24. Зависимост между якостта на натиск и количеството добавен инертен материал в състава на гипсовите тела, 5 ÷ 25%



Фигура IV.25. Зависимост между якостта на опън при огъване и количеството добавен инертен материал в състава на гипсовите тела, 5÷25%

❖ Кохезия на сърцевината при висока температура

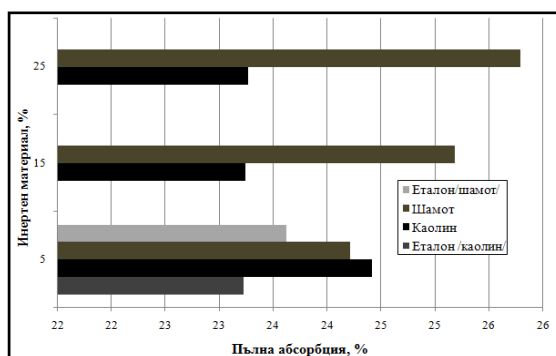
Резултатите от изследването на кохезията на гипсови пробни тела показват тенденция към повишаване на времето на устойчивост с нарастване на съдържанието на каолин и шамот в обема на телата. Както се вижда от резултатите представени в Таблица 12, добавянето на 5% каолин не оказва влияние върху поведението на гипсовите тела при висока температура. От друга страна, използването на шамота като заместващ материал оказва съществено подобряване на устойчивостта на гипсовите тела.

Таблица 12. Кохезия на сърцевината на гипсови тела със съдържание на каолин и шамот, (min:s)

Еталон	Каолин	Количество инертен материал, %	Еталон	Шамот
00:04	00:05	5	00:10	00:22
	00:14	15		00:25
	00:14	25		00:40

❖ Пълна абсорбция на вода и образуване на пукнатини

От представените данни (Фиг. IV.26) ясно се вижда, че с нарастване на съдържанието на каолин в обема на телата степента на водопоглъщане намалява. Употребата на шамот като заместващ материал оказва негативно влияние по отношение степента на водопоглъщане. С добавянето на всеки 10% от материала в състава на телата, нараства степента на абсорбция.



Фигура IV.26. Зависимост на абсорбиционните свойства на гипсовите тела от количеството инертен материал в обема, $5 \div 25\%$



Фигура IV.27. Изследване на образуването на пукнатини. Гипсови тела със съдържание на каолин $15 \div 45\%$ в състава

Изследването на образуване на пукнатини на гипсови тела със съдържание на каолин в състава показва добри резултати. Както може да се види на Фигура IV.27, не се наблюдава образуване на дефекти.

❖ Залепване

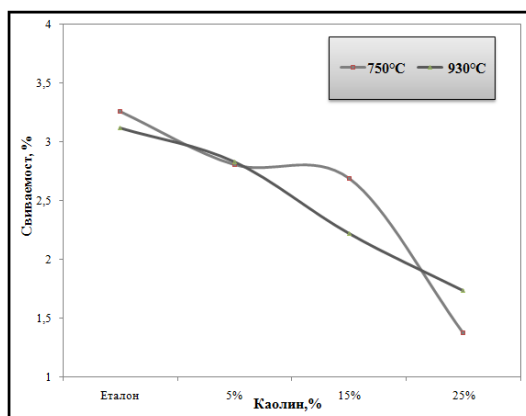
Както може да се види от Фиг. IV.28, с нарастване на количество каолин в състава на матрицата се забелязва влошаване на качеството на залепване.



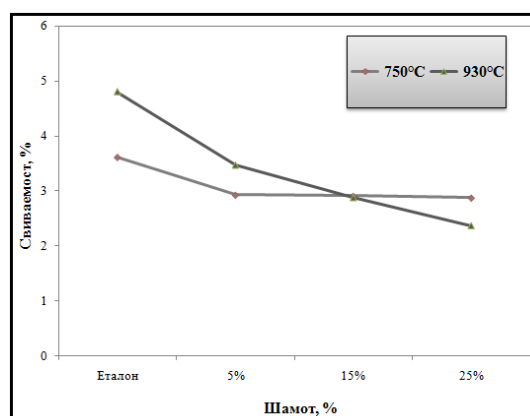
Фигура IV.28. Залепване на гипсови тела и хартия, преди сушене с нарастващо съдържание на каолин в състава на матрицата, $15 \div 45\%$

❖ Свиваемост

Беше изследвана степента на изменение на обема на гипсови призматични тела с нарастващо съдържание на каолин и шамот в обема, за сметка на намаляващото количество свързващо вещество (Фиг. IV.29 и IV.30). От получените резултати се наблюдава тенденция към понижаване на степента на свиваемост на пробните тела и в двата температурни диапазона - 750°C и 930°C .



Фигура IV.29. Зависимост на степента на свиваемост на гипсови призматични тела от количеството каолин в състава на матрицата при 750⁰C и 930⁰C

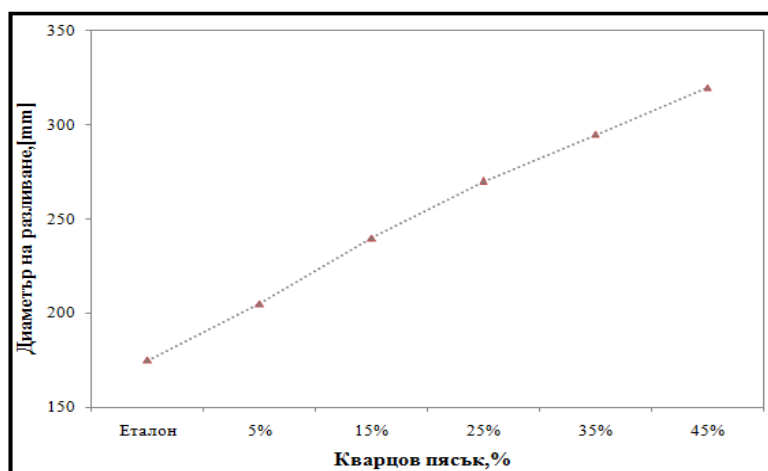


Фигура IV.30. Зависимост на степента на свиваемост на гипсови призматични тела от количеството шамот в състава на матрицата при 750⁰C и 930⁰C.

VII.6. Лабораторни изследвания за изучаване на влиянието на кварцов пясък

VII.6.1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на кварцов пясък

От резултатите представени на Фигура IV.32 се вижда тенденция към пропорционално нарастване на разливността с увеличаване на количеството инертен материал в композитната смес.



Фигура IV.32. Зависимост между количеството кварцов пясък в сместа и диаметъра на разливане на суспензията, 5 ÷ 45%

Понижаването на количеството свързващо вещество рефлектира и върху времето на свързване на суспензията. Данните от изпитването са представени в Таблица 14.

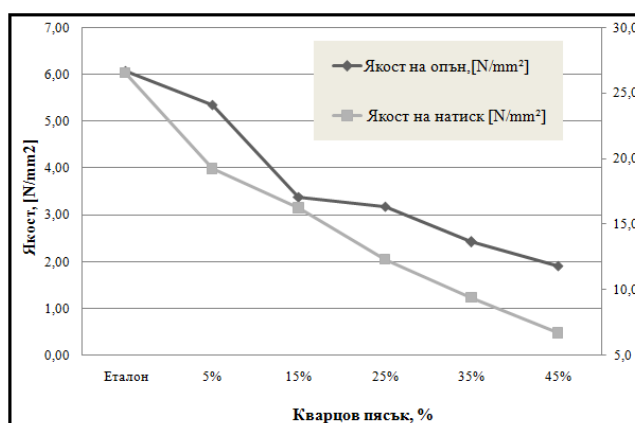
Таблица 14. Времена на свързване на гипсова композитна смес със съдържание на кварцов пясък, 5 ÷ 45%

Време на свързване	Единица	Еталон	Количество кварцов пясък в сместа, %				
			5	15	25	35	45
Начало	min:s	01:45	02:05	02:25	02:50	03:10	03:30
Край	min:s	05:45	06:05	06:45	07:50	08:25	09:05

Както се вижда от представените резултати, зависимостта между количеството инертен материал и изменението на времето на свързване, може да се разглежда като линейна.

VII.6.2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на кварцов пясък

Както може да се наблюдава от резултатите представени на Фигура IV.33, с нарастване на количеството инертен материал се понижава механичната устойчивост на телата произтичаща от намаленото съдържание на свързващо вещество. Наред с това е отчетена тенденция към намаляване на плътността на пробните тела с повишаване на количеството заместващ материал.



Фигура IV.33. Зависимост между якостните показатели и количеството кварцов пясък в състава на пробните тела, 5÷45%

❖ Кохезия на ядрото

Експерименталните резултати представени на Таблица 15 показват, че качествените параметри на пробните тела се обуславят от съдържанието на кварцов пясък в матрицата. Намаляването на количеството свързващо вещество с 15% за сметка на кварцовия пясък резултира в плавно повишаване на устойчивостта с 29 s.

Таблица 15. Кохезия на ядрото на гипсови тела със съдържание на кварцов пясък, (5 ÷ 45%)

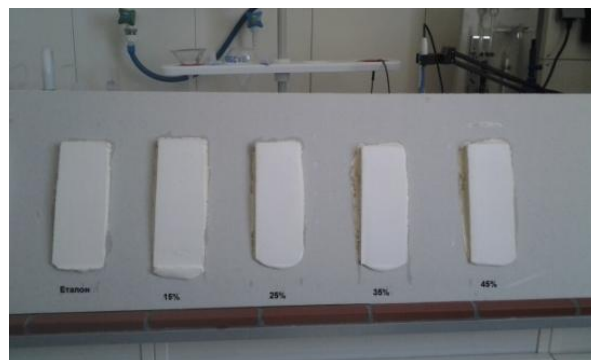
Проба	Единица	Резултат	Резултати				
			Кварцов пясък в матрицата, %				
Еталон	min:s	00:10	5	15	25	35	45
			00:10	00:39	00:53	01:00	01:26

❖ Пълна абсорбция на вода и образуване на пукнатини

Анализът на резултатите от изпитването илюстрирани на Фигура IV.34 на отделните групи пробни тела, показват тенденция към нарастване на абсорбцията с увеличаване на обемното съдържание на инертен материал в състава на матрицата.



Фигура IV.34. Зависимост между количеството кварцов пясък в матрицата на гипсовите тела и степента на абсорбция на вода, 5 ÷ 45%

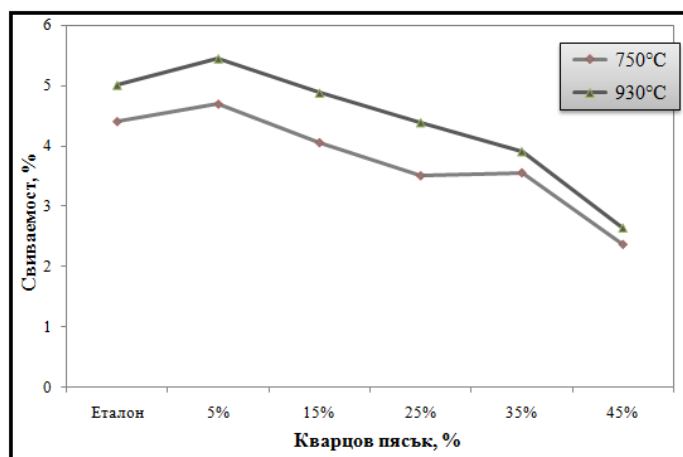


Фигура IV.35. Гипсови тела със съдържание на кварцов пясък в състава, (15 ÷ 45%)

Изследването за образуване на пукнатини на оптимизираните гипсови тела със съдържание на кварцов пясък в състава, не показва поява на пукнатини. Наблюдава се образуване на мехурчета, което вероятно се дължи на скоростта на разбъркване.

❖ Свиваемост

Проведени са две групи изпитвания, които показват близки резултати в степента на изменение на размерите на призматичните гипсови тела. Варирането на количеството инертен материал в обема на пробните тела, показва тенденция към понижаване на степента на свиваемост с намаляване на количеството свързващо вещество.



Фигура IV.36. Зависимост между степента на свиваемост и количеството кварцов пясък в обема на гипсовата матрица, (5 ÷ 45%)

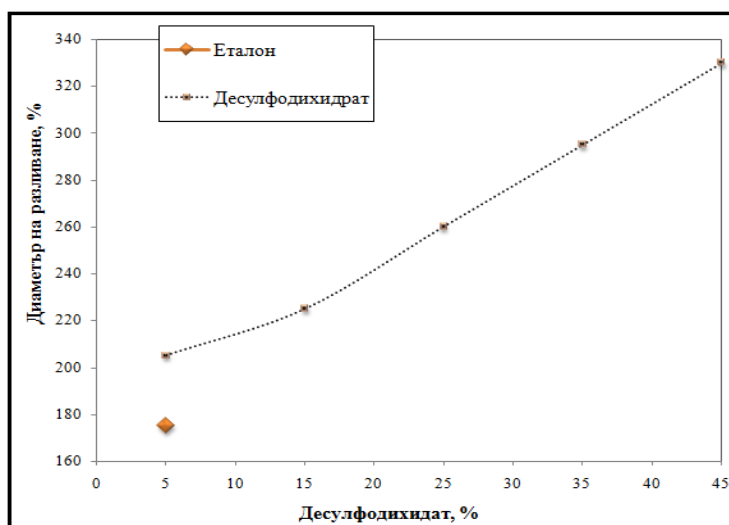
VII.7. Изследване на влиянието на десулфогипс

VII.7. 1. Изследване на оптимизирана гипсова суспензия със съдържание на десулфогипс

Изследван беше потенциала за приложение на десулфодихидрат като заместващ полухидрата материал. Непреминал сушене и калцинация, в „сурово“ състояние, десулфогипсът е с влажност над 8% и не притежава свързващи свойства.

В първата група предварителни тестове, обследвахме промяната в диаметъра на разливане на гипсовата суспензия и времето на свързване. Както се вижда от резултатите илюстрирани на Фигура IV.38, смесването на полухидрат и дихидрат при

фиксирано вода-свързващо вещество отношение от 0,70, показва тенденция към втечняване на гипсовата смес.



Фигура IV.38. Зависимост между количеството дихидрат в сместа и диаметъра на разливане, 5 ÷ 45%

С оценката на резултатите, чрез тълкуване на графиката, може да се дефинира почти линейната зависимост между нарастващото обемно съдържание на дихидрат и оставащото количество несвързана вода, което резултира в драстично покачване на течливостта и подобряване на обработваемостта на композитната смес.

При проведеното изследване на времената на свързване на композитната смес със съдържание на десулфодихидрат прави впечатление сравнително слабото изменение на времената на свързване в сравнение с останалите инертни материали. Това се дължи на особеността на суровия гипс инкорпориран в сместа, да действа като ускорител на процеса на рехидратация на полухидрата.

Таблица 17. Времена на свързване на композитната смес със съдържание на десулфодихидрат

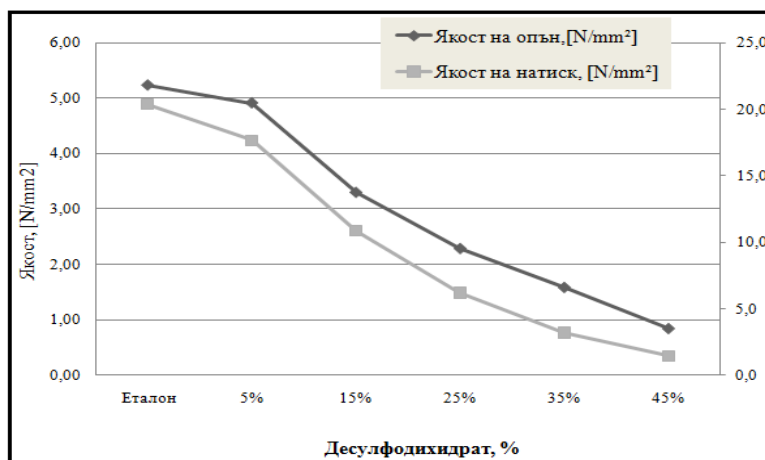
Време на свързване	Единица за измерване	Еталон	Количество десулфодихидрат в сместа, %				
			5	15	25	35	45
Начало	min:s	02:00	02:00	02:10	02:30	02:50	03:05
Край	min:s	06:00	06:05	06:25	06:50	07:10	08:45

VII.7.2. Физико-механични свойства на оптимизирани гипсови тела със съдържание на десулфогипс

❖ Механични свойства

От всички изпитвани компоненти, десулфодихидратът показва най-значимо понижаване на якостните показатели. Тук трябва да се отбележи и съществено изменение в плътността на гипсовите тела, с нарастване на количеството дихидрат в обема на композита. Установихме най-съществени вариации на модула на еластичност, отново при най-високите съдържания на инертен материал. Най-вероятно причината е лошото разпределение на материала в двукомпонентната смес. Поради високата си влажност, агломератите от двухидратните кристали определят размесването и представляват клъстери с високо съдържание на инертен материал в структурата на

пробните тела. Това са потенциални зони на образуване на микропукнатини в процеса на разрушаване.



Фигура IV.39. Зависимост между якостно-деформационните характеристики и количеството дихидрат в състава на гипсовите тела, 5 ÷ 45%

❖ Кохезия на ядрото

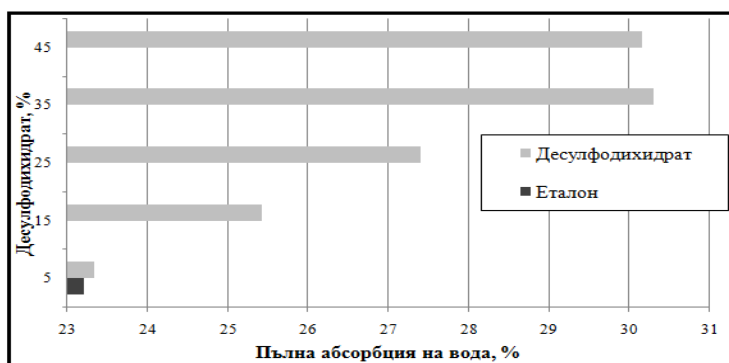
По-високото съдържание на десулфогипс оказва почти незначително изменение на времето на устойчивост на пробните тела при 15% и 25% са регистрирани изменения от 1÷2 s, които биха могли да се разглеждат в рамките на допустимата грешка на измерването. Едва с 35% инертен материал регистрирахме изменение на времето, като бе отчетена два пъти по-висока устойчивост на телата.

Таблица 18. Кохезия на сърцевината на оптимизирани тела със съдържание на десулфодихидрат в матрицата, 5 ÷ 45%

Проба	Единица	Резултат	Резултати			
			Десулфодихидрат, %			
Еталон	min:s	00:10	5	15	25	35
Десулфогипс	min:s		00:06	00:12	00:11	00:20

❖ Пълна абсорбция на вода

Сравнена с първичната опростена проба, тази съдържаща 5% инкорпориран десулфодихидрат показва пренебрежимо повишаване на абсорбционните свойства на пробните тела (Фиг. IV.40).



Фигура IV.40. Зависимост между пълната абсорбция на гипсови тела и количеството десулфодихидрат в състава на матрицата, 5 ÷ 45%

❖ Свиваемост

Колкото по-високо обемно съдържание на „суров“ десулфодихидрат има в гипсовите образци, толкова по-ниска е измерената степен на свиване (Таблица 19).

Таблица 19. Свиваемост на гипсови тела със съдържание на десулфодихидрат, 5% ÷ 45%

Проба	Свиваемост, %	
	(20 min/ 750°C)	(20 min/ 930°C)
Еталон	3,15	3,81
5% Десулфодихидрат	3,44	5,03
15% Десулфодихидрат	2,72	3,96
25% Десулфодихидрат	2,24	3,51
35% Десулфодихидрат	2,62	2,96
45% Десулфодихидрат	1,15	3,03

❖ Залепване

От Фигура IV.41 може да се заключи силно влошаване на залепването при количества над 15% инертен материал в матрицата.



Фигура IV.41. Залепване на гипсови тела и хартия, преди сушене с нарастващо съдържание на десулфодихидрат в състава на матрицата, (15 ÷ 45%)

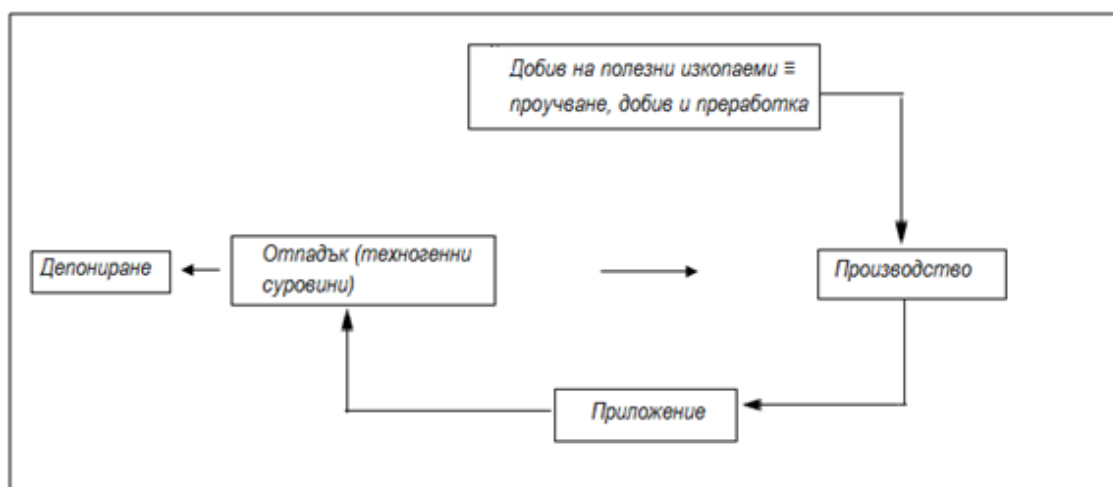
VII.8. Изводи от проведените лабораторни тестове

Както вече беше споменато, целта на дисертационния труд е да се създаде ново поколение строителни материали на основата на гипсови свързващи вещества, чиито научно-приложни приноси да бъдат предпоставка за приложимост в практиката. От друга страна, идеята на експерименталната работа е да се разкрият нови модели за оползотворяване на техногенни суровини, като се разработи нов висок клас строителни композити.

В ранните етапи на разработване на новите композитни структури бяха взети под внимание не само икономическото остойностяване на продуктите и потенциала за повишаване на производствената ефективност във всеки неин аспект, но и перспективите за подобряване цикъла на живот на крайните продукти. Значимостта на подобрения цикъл на живот на строителните материали се заключава в контрола на замърсяването на околната среда, а в този случай дори в изграждането устойчив цикъл на потребление на ресурсите, показан на Фигура IV.43. Схемата на потребление на ресурсите, представлява фундамента на настоящото изследване, който има директно влияние върху развитието на индустриалните процеси в производството на гипсови свързващи вещества.

Обхвата на изследователската работа предполага определяне и тълкуване на взаимовръзката между качествените характеристики, като едрина, минераложки, химичен състав и физични свойства, количеството инкорпориран инертен материал и промяната в поведението на оптимизирани състави. Основните тестове, които избрахме да проведем, за да изследваме как се променя поведението на гипсовите композитни смеси и тела при понижено съдържание на свързващо вещество бяха: диаметър на разливане; време на свързване; якостно-деформационни характеристики; кохезия при висока температура; пълна абсорбция на вода; свиваемост при нагриване; образуване на пукнатини и степен на залепване.

Само три от целия обем изследвани материали бяха добавяни в количество до 45% в композитите - десулфодихидрат, кварцов пясък и строителни отпадъци, а пепелината с максимално съдържание от 35%. Всички останали добавки бяха включвани в обема на телата и смесите с максимално съдържание до 25%.



Фигура IV.43. Цикъл на устойчиво потребление на ресурси

Причините за такъв подбор на изследвания са резултат от данните, които бяха получени от предварителните тестове. Често, прекалено високата степен на втечняване е предпоставка да не се оформи гипсова пита, при изпитването на разливност. Това е съпроводено с висок процент несвързана вода и като правило категорично влошаване на якостните показатели на телата. В дисертационния труд основно бе обърнато внимание на изследването на възможността за директно включване на техногенни суровини в матрицата на гипсовите състави, каквито са десулфодихидрата, строителните отпадъци, пепелината и мраморното брашно.

Въз основа на проведените лабораторни изследвания могат да се направят следните изводи:

1. Силно развитата специфична повърхност на материалите използвани за оптимизиране на матрицата, както и на самия β -полухидрат, подчертават необходимостта от повишено количество вода, или пластификатори, за да се осигури добра обработваемост. Въпреки това, при експериментите се наблюдава тенденция към втечняване, дори при изпитването на каолина, който бе с най-висока стойност по Блейн - $7074 \text{ cm}^2/\text{g}$. Въз основа на данните от предварителните тестове на гипсовата суспензия най-голям диаметър на разливане за пробите със съдържание 25% инертен материал, е отчетен след включването на мраморно брашно - 96,88% спрямо еталонната проба. Най-слабо е изменението на консистенцията за пробите съдържащи 25% строителни отпадъци с едва 18,18% спрямо референтната стойност. От смесите с намалено съдържание на свързващо вещество с 45%, най-добра обработваемост бе отчетена след

добавяне на десулфодихидрат с 88,57% повишение. Високата степен на разливност и лесната обработваемост на гипсовите смеси е отлична предпоставка за редуциране на водата и пластификатори в рецептите за производство на гипсови плоскости, и в процеса на смесване на сухи строителни смеси за нанасяне. Ето защо за контролиране на консистенцията на гипсовата смес е рационално приложението на мраморно брашно и десулфодихидрат.

2. От всички инертни материали добавяни в количество 25% и 45% от обема на сместа, най-дълго време на свързване показват смесите с кварцов пясък, съответно с 1:05 min за начало и 2:05 min за пробите с 25%, а за 45% началото е удължено с 2:50 min, а краят – 3:30 min.

3. Установено е, че сред всички добавки включени в състава на гипсовите тела до 25%, най-висока устойчивост на пряк огън показват композитите съдържащи пепелина – средно с 56 s удължаване на времето. Резултати над 63 s са регистрирани и след инкорпориране на мраморното брашно. Най-слабо е изменението на устойчивостта при добавяне на 25% десулфодихидрат. От всички добавки включвани в състава в съдържание 25 % най-добри резултати показват мраморното брашно и пепелината. От трите изпитвани добавки със съдържание 45%, най-добри резултати са регистрирани за пробните тела с кварцов пясък (1:26 min), а със съдържание на строителни отпадъци – 1:18 min.

4. Сравнителният анализ на данните получени от изпитването на пълна абсорбция показва, че от всички добавяни инертни материали в количество 25% от състава, най-ниска степен на водопоглъщане показват пробите със съдържание на каолин (23,27%). Всъщност, те не само показват най-ниска стойност спрямо останалите, но каолинът е единственият изследван материал в обхвата на експерименталната работа, който понижава абсорбционната способност на телата. От всички инертни материали със съдържание 45%, най-ниска степен на водопоглъщане регистрирахме след прибавяне на кварцов пясък, като повишаването на абсорбционната способност на телата е с 4,71%.

5. Едни от най-значимите показатели определящи приложимостта на строителните материали са техните якостно-деформационни характеристики. От проведените тестове за якост на опън при огъване и якост на натиск на гипсови призматични тела се установи, че най-слабо понижаване на механичната устойчивост притежават композитите със съдържание на каолин. При 25% каолин в матрицата на телата якостта на опън спада с едва 15,97%, а на натиск - 17,86 %. За пробните тела с понижено съдържание на свързващо вещество 45%, най-добри якостни показатели регистрирахме за призмите с включени строителни отпадъци, като устойчивостта на натиск бе понижена с 58,95%, а на опън с 61%. Разбира се трябва да се вземе под внимание, че каолинът не е добавян в матрицата на гипсовите тела в количество 45 %. За някои видове гипсови строителни материали, като гипсовите строителни плоскости (гипсокартон) и плоскостите с армирана структура (гипсфазер), понижаването на механичната якост на гипсовата матрица се компенсира до голяма степен от използваната хартия или влакна в структурата. Влошаването на механичните показатели, не означава, че даденият инертен материал не може да се използва в реалното производство, а по-скоро е необходимо да се намери оптималното съотношение свързващо вещество – инертен материал.

6. От останалите елементи на серията тестове за свиваемост при фиксирана температура от 750⁰C, тенденция към понижаване на свиваемостта показаха всички изпитвани минерални добавки. Все пак, най-ниска степен на свиваемост за тази тестова група регистрирахме след прибавяне на кварцов пясък (спад с 2,08%), но добри резултати се получават и с добавяне на десулфодихидрат. За телата обработени при

930⁰C, понижаването на свиваемостта се запази за всички проби, с изключение на пепелина. За тази група тела със съдържание на 35% пепелина бе отчетено повишаване на свиваемостта с близо 1%. За подобряване на този параметър при висока температура е подходящо приложението на шамот (спад с 2,43%) и кварцов пясък (спад с 2,37%).

7. От всички добавки изследвани в съдържание 45%, само за мраморното брашно, каолина и строителните отпадъци се регистрира залепване. Безспорно най-добри резултати от тестовите, показаха пробите съдържащи строителни отпадъци във всички съдържания 15 ÷ 45 %. За пробите съдържащи 15 % отпадъци покритата с хартия площ бе с едва 6,82 % по-малка спрямо базисната, а при 45 % строителни отпадъци в сместа, залепването се понижи с 32,89 % спрямо референтната проба. За сравнение пробите съдържащи 45 % мраморно брашно показаха влошаване на залепването с 68,39 % спрямо еталонната проба.

8. Всички изпитвани минерални добавки като заместващи полухидрата материали показват добри резултати на изпитването за образуване на пукнатини.

VIII. Оптимизиране на промишлени технологии

Базирайки се на получените резултати от лабораторните експерименти и изведените въз основа на тях изводи, избрахме да разширим областта на експериментиране, като проведем промишлени тестове, чрез които да направим оценка на ефективността и потенциала на оптимизираните рецепти. Съобразно априорната информация от извършения литературен обзор, характеристиките на отделните суровини, включително обема генерирани отпадъци в отделните случаи и с цел подобряване на технико-икономическите показатели, беше избрано провеждането на промишлените тестове да се осъществи с добавяне на десулфодихидрат в състава на гипсови строителни плоскости (гипсокартон). При избора на конкретен материал се повлияхме и от възможността за лесно оптимизиране и инсталиране на система за дозиране; достъпност на суровината в региона, където е разположен завода за производство на гипсови плоскости и ниската себестойност на изходния материал.

VIII.1. Производство на гипсови строителни плоскости

Технологията за производство на гипсови строителни плоскости (гипсокартон) включва няколко етапа:

- ❖ Подготовка на дихидрата постъпващ в завода в режим на обогатяване (сушене; смилане; калцинация и охлаждане);
- ❖ Образуване на гипсова суспензия (дозирание на всички компоненти в смесител);
- ❖ Създаване на условия за контакт между гипсовата смес и картоната върху лентов транспортър с фиксирана дължина;
- ❖ Отрязване на плоскост с определен размер преди отвеждане към етап на сушене;
- ❖ Изсушаване на плоскостите и фино форматиране;
- ❖ Стапеловане и опаковане на готовите плоскости.

Матрицата на гипсовата плоскост е изградена от гипсова сърцевина разположена между два картонени листа. Произвежданите гипсови плоскости могат да бъдат с различни геометрични размери, с вариращи дебелина (9,5 ÷ 20 mm), дължина (2000 ÷ 3600 mm) и широчина (600 ÷ 1200 mm). Разбира се, важен показател е и целевата плътност, чиято стойност също е променлива. Специфична особеност в производството на гипсови строителни плоскости е добавянето на пластификатори, забавящи и ускоряващи процеса на рекристализация агенти в рецептите. Тяхната функция е от една страна да контролират времето на свързване и втвърдяване на гипсовата смес, а от друга да оптимизират физико-механичните показатели на крайните продукти. Те се класифицират в четири категории: изменящи разтворимостта на свързващото вещество

(NaCl/ KCl); участващи в реакция с полухидрата с образуване на слабо дисоцииращи се съединения (боракс; борна киселина и натриев фосфат); ускорители ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и повърхностно активни вещества (под формата на пяна).

Сред прилаганите в производството на гипсови плоскости компоненти са още нишесте, стъклени влакна, хидрофобизиращи агенти и вермикулити. Нишестето е слепващ агент между гипсовата сърцевина и хартията. При висока температура скорбялата се разлага и придобива свойствата на лепило, поради което активирането му се наблюдава след процеса на сушене.

Всички добавки се смесват в смесител, от който гипсовата суспензия се подава към поточна линия и преминава през формовъчна маса, която разстила гипсовата суспензия върху движещия се картон, и оформя плоскостта (мокър поток).

Оформените плоскости изминават определено разстояние, предварително избрана дължина на производствената линия, което осигурява необходимото време за пълно протичане на реакцията по свързване на гипсовото ядро и картоната. В края на линията, мокрият поток преминава през отсекачел, който оформя плоскости с определена дължина, а готовите плочи се насочват към сушилния. Целта на сушенето на плоскостите е да се отнеме излишъкът от вода останала в тях след изкристилизирането на дихидрата и едновременно с това нишестето да бъде активирано. В края на производствения процес, готовите плоскости се стапеловат и опаковат.

VIII.2. Подготовка на суровината

За производството на гипсови строителни плоскости се прилага както природен гипс, така и синтетични гипсови форми. Транспортирането на материала може да бъде чрез морски, пътен, железопътен транспорт или лентови транспортъори, според локацията на завода.

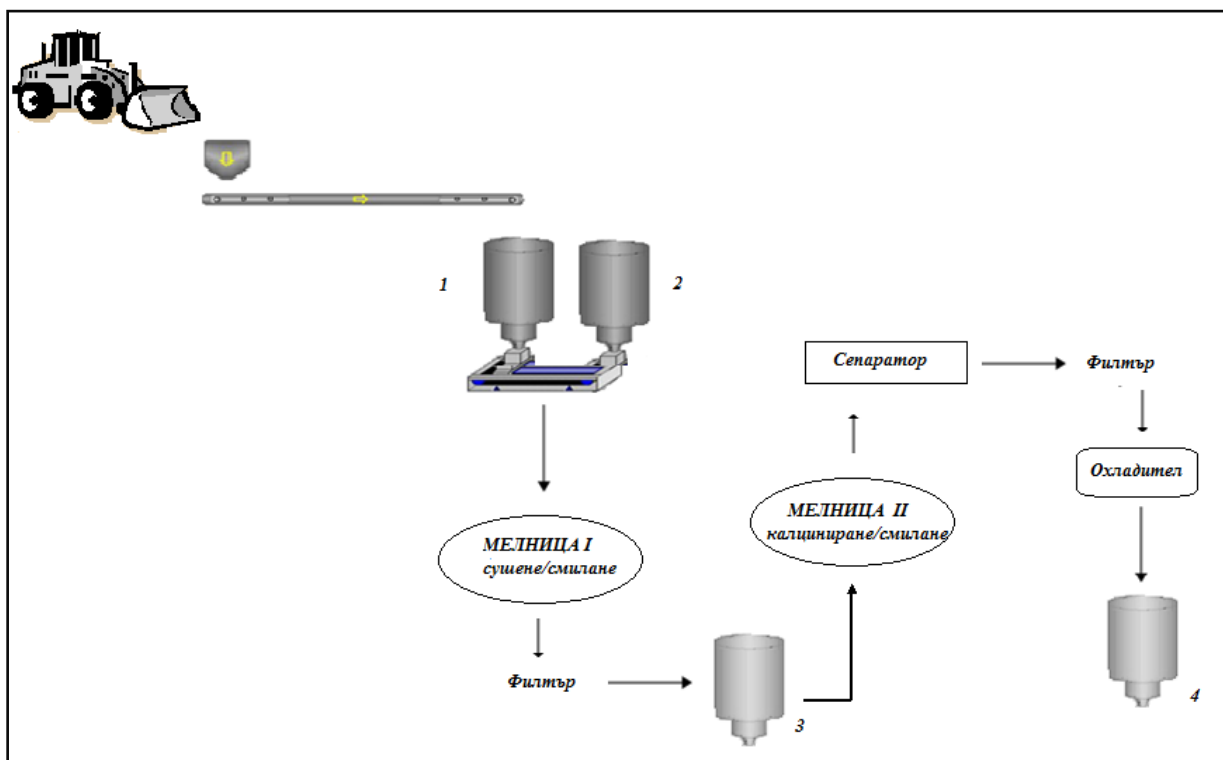
Различните източници на гипс се характеризират с различно съдържание на влага в материала, поради което се налага избор на диференциран подход за обработка на суровината.

Природният гипс се добива по открит или подземен способ, като влажността му достига до 4 %, сравнен със синтетичните гипсове, които преминават през процеси на обезводняване и имат по-висока влажност. Материалът преминава през стадий на трошене и стадий на смилане – калцинация в отворен цикъл, за природните гипсови форми и през двустадийна схема на смилане за синтетичните гипсове. Ниската влажност на материала позволява в някои случаи сушенето на суровината да отпадне от схемите за подготовка и тя да бъде директно подложена на калцинация. Чуковите и челюстните трошачки са най-често прилагани за подготовка на природната суровина, а схемите на обогатяване са в затворен цикъл, където след трошене е включено контролно пресяване и връщане на суровината на входа на трошачката. След това материалът се насочва към мелница за средно смилане чрез чукова мелница, дезинтегратор, топкова или дискова мелница за фино смилане.

В технологичните схеми за подготовка на десулфогипс, сушенето на материала преди етапа на калцинация се изисква, поради високата и често варираща стойност на влажността на изходния материал. На Фигура V.1 е представена верижна схема за подготовка на десулфодихидрат за производство на гипсови строителни плоскости.

Постъпващият за подготовка гипс преминава последователно през горивна камера и чукова мелница. Въздухът в горивната камера се подгрява до температура от 450°C чрез горелка работеща с природен газ. В този етап се извършва отделяне на физически свързаната вода. Непосредствено след това, гипсът се подава за смилане към чукова мелница и се транспортира до филтърна уредба, съставена от ръкавни филтри. От

силоса за сух гипс (3) чрез клетъчен дозатор материалът се подава към втора горивна камера.



Фигура V.1. Схема за производство на β-полухидрат от десулфогипс с комбинирано сушене и смилане на суровината.

Легенда: 1), 2) Силос за дихидрат; 3) Силос за сух гипс; 4) Силос за β – полухидрат.

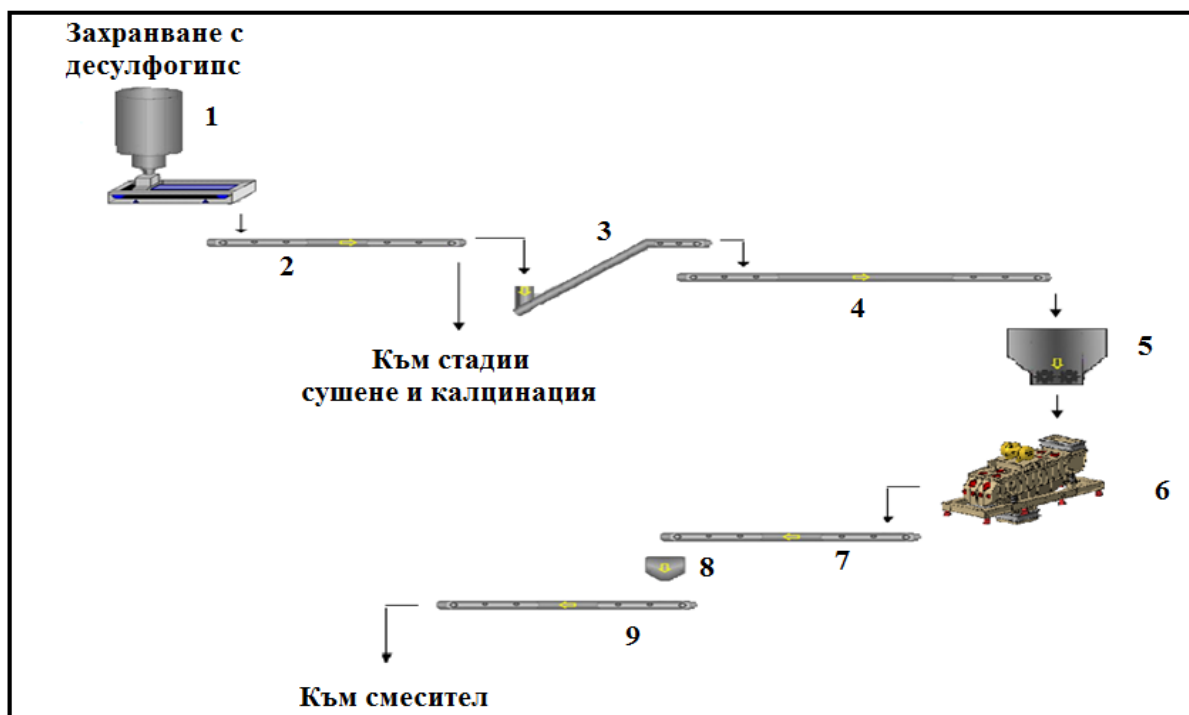
Системата за калциниране на гипс е сходна с тази за сушене. Гипсът заедно с горещия въздух навлизат в мелницата, където материалът се смилва допълнително. Целта е да се увеличи повърхността на гипсовите частици за да се постигне по-доброто им и равномерно изпичане. В чуковата мелница се изпаряват около 75% от химически свързаната в гипса вода.

VIII.3. Инсталация за подготовка и дозиране на десулфодихидрат

В първия етап от промишлените тестове бе проектирана верижна схема за подготовка на суровината. Десулфогипсът използван за получаване на полухидрата и въведен в „сурово” състояние в рецептата на композитната смес се получава като вторичен продукт от десулфатизацията на газове от изгарянето на лигнитни въглища. След обезводняване, чрез лентов вакуум филтър, материалът се подава по лентов транспортър към открит склад за съхранение. Гипсът постъпва по транспортна лента от открития склад към цех за зърнометрична подготовка и калцинация, където се разпределя в два силоса за дихидрат, всеки с обем от 80 m³. След това, материалът преминава последователно през етапите на сушене и калцинация.

На Фигура V.2 е показана верижна схема на машините и апаратите на усъвършенстваната технологична схема за подготовка на десулфодихидрата. Част от подавания в системата дихидрат от силоса (1) с помощта на мобилна реверсивна лента (3) се отклонява към втора лента с дължина 60 m, завършваща с двувалцова трошачка с релефни валци (5), вибрационно сито (6) и се дозира чрез тегловна транспортна лента (9) директно към смесителя.

Като се вземе под внимание варирането във влажността на подавания материал (до 10%), избрахме контролното пресяване да се извършва чрез вибрационна пресевна уредба. Също така, операцията на пресяване има за цел отделяне на случайно попаднали предмети в суровината.



Фигура V.2. Оптимизирана верижна схема на машините и апаратите за дозиране на десулфодихидрат.

Легенда: 1) Приеман силос за дихидрат; 2), 3), 7) Лентов транспортър; 5) Валцова трошачка; 6) Вибрационна пресевна уредба с параметри: вибриращо тегло: 820 kg; максимална амплитуда: 4,8 mm; работна честота: 16 Hz; мощност: 1x2,7 kW; 8) Колектор за десулфодихидрат; 9) Тегловна транспортна лента.

VIII.4. Производствени тестове

След като бе проектирана и въведена в експлоатация инсталацията за дозиране на десулфодихидрат, бяха проведени промишлени изпитвания на оптимизирана рецепта с директно прибавяне на необработен десулфогипс в смесителя. За провеждане на промишлените експерименти избрахме да бъдат произведени стандартни гипсови строителни плоскости тип А, с дебелина 12,5 mm и ширина 1200 mm с плътност $> 8.0 \text{ kg/m}^2$. Тези параметри определят необходимите количества гипс и вода, при избраната скорост на линията, която в този случай бе 60 m/min. Скоростта на мокрия поток и дължината на линията са в пряка зависимост, както с процеса на рекристализация, така и с геометричните и физични показатели на плоскостите. Трябва да се вземе под внимание, че количествата ускорител, нишесте, забавител и пенообразувател са променливи величини. Те зависят от качеството на полухидрата, както и от необходимостта за постигане на оптимални параметри на гипсовата смес. В някои случаи е възможно изменение на количеството процесна вода в рецептата.

Въз основа на проведените лабораторни изпитвания избрахме да добавим до 15 % десулфодихидрат от общото количество гипс прилаган в рецептата в мащаба на промишлени тестове в завод за производство на гипсови строителни плоскости, без да са извършвани предварителни полупромишлени изпитвания. Добавянето на 15 % десулфогипс в сместа в лабораторни условия показва значително повишаване на

разливността и подобряване на обработваемостта на гипсовата смес. Както вече бе споменато, това явление би могло да резултира в намаляване на количеството пластификатори и в понижаване на количеството вода в рецептата.

* *Плоскост тип А- гипсокартонена плоскост с лице, подходящо за полагане на гипсова шпакловка или декорация, EN 520.*

Таблица 20. Резултати от промишлените тестове с оптимални показатели на рецептата

β-полухидрат	kg/min	435
Десулфодихидрат	kg/min	76
Вода	l/min	< с 40 l от стандартното
Ускорител	g/min	< от стандартното
Забавител	ml/min	не е добавен
Пенообразувател	ml/min	< от стандартното
Вода за образуване на пяна	l/min	< от стандартното
Нишесте	g/min	стандартно
Втечнител	ml/min	< от стандартното

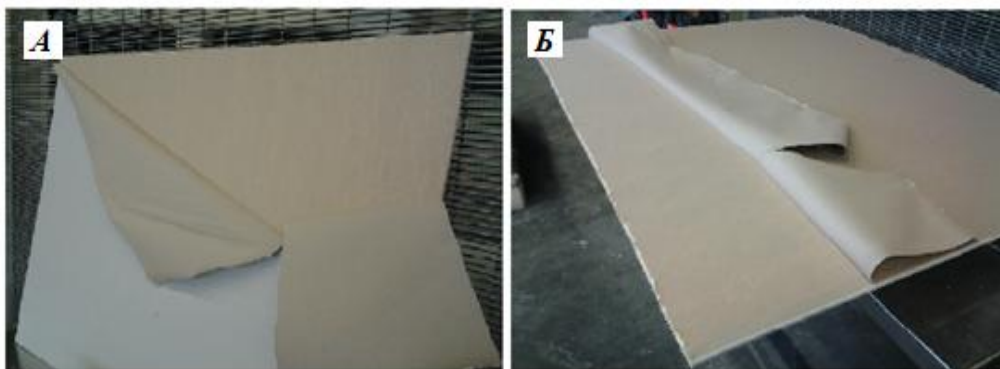
Получените експериментални резултати, както от оптимизираната рецепта за производство на строителни плоскости, така и от работата на оптимизираната инсталация за дозиране и преработка на десулфодихидрат, показаха по-добри параметри от предварителните лабораторните изпитвания. Бяха постигнати отлични показатели на гипсовата смес, целево тегло, пълно покритие на гипсовата сърцевина с хартия (залепване преди и след сушене) и добри геометрични характеристики. Рецептата, при която бе достигнат оптимума на показателите на гипсовата смес и готовите плоскости бе със съдържание на 15 % десулфогипс.

След провеждане на експерименталното производство, плоскостите бяха подложени на лабораторни контролни тестове, за да бъдат съпоставени със съществуващата база данни от измерени показатели и да бъде проверено, дали отговарят на изискванията на прилаганите стандарти.

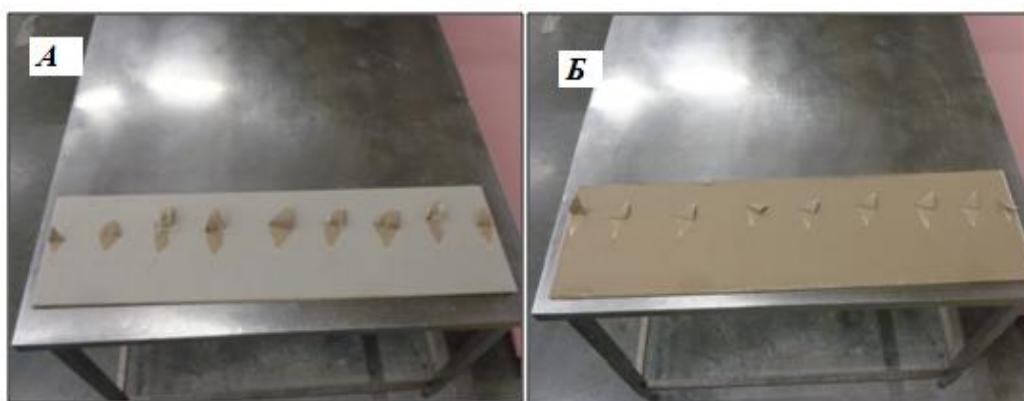
Таблица 21. Резултати от лабораторните тестове за якост на оптимизираните плоскости

Разрушаващ товар Fmax, [N]	Стандартна плоскост	Оптимизирана плоскост
напречно	232	232
надлъжно	596	602
Модул на еластичност, [N/mm ²]		
напречно	2528	2431
надлъжно	3185	2855

*(EN 520: напречно – 210 [N]; надлъжно – 550 [N])



Фигура V.3. Оценка на качеството на залепване на гипсова строителна плоскост с оптимизиран състав на матрицата, преди сушене: А) Оценка на залепване на лицев картон; Б) Оценка на залепване на картона на гърба.



Фигура V.4. Оценка на качеството на залепване на гипсова строителна плоскост с оптимизиран състав на матрицата, след сушене: А) Оценка на залепване на лицев картон; Б) Оценка на залепване на картона на гърба.

VIII.5. Изводи от промишлените внедрявания

Промишлените внедрявания в завода за гипсови строителни плоскости (гипсокартон) на технологията за производство с понижено съдържание на свързващо вещество преминаха през два етапа:

- Проектиране и внедряване на инсталация за подготовка и дозиране на десулфодихидрат;
- Промишлено изпитване на оптимизирана рецепта с ниско съдържание на свързващо вещество и инкорпориране на дихидрат в матрицата на гипсовата плоскост.

Въз основа на получените резултати от промишлените тестове, както на инсталацията за дозиране на дихидрата, така и на оптимизираната рецепта, може да се заключи, че:

1. Проектираната система за дозиране на дихидрат с високо влагосъдържание (10 %) е подходяща за производства, чиято основна суровина е десулфодихидрат;
2. Системата за дозиране на дихидрат, който не преминава предварително процеси на сушене и калцинация, не е характерна и за пръв път успешно се прилага в производството на композити на основата на гипс;
3. Технологичните показатели и производствените данни ясно и категорично показват предимствата на оптимизираната технология за производство на гипсови строителни плоскости;

4. Оптимизацията на рецепти с понижено съдържание на свързващо вещество е приложима за всички видове гипсови строителни плоскости;
5. Обема на суровината за сушене и калциниране намалява с близо 17,6 % за денонощие.

IX. Охарактеризиране на производствения и екологичен потенциал на оптимизираните моделни състави на гипсови композитни материали с ниско съдържание на свързващо вещество

IX.1. Цикъл на живот на продуктите

Оценката на цикъла на живот е метод за цялостно окачествяване на взаимовръзката на материалните и енергийни потоци с влиянието, което те оказват върху околната среда. Това означава, да се разкрие и оцени отношението между количествените замърсявания на:

- въздуха, като резултат от изпускането на вредни емисии в атмосферата;
- водата, като резултат от консумацията ѝ за технологични цели и изхвърлянето на такава след употреба;
- почвата, при разработването на полезни изкопаеми, или депониране на отпадъци от производствата;

и да се дефинират количествата, типа енергия, и изходни материали за производствени цели.

Оценката започва от добива на изходната суровина (природни минерални суровини); техният транспорт; процесите на предварителна подготовка на материалите; включването в производствения процес на крайните продукти; наличието на спомагателни процеси (като сушене); опаковане и транспорт до потребителите. Тази цялост на цикъла, позволява да се направи пълна оценка на влиянието върху околната среда във всеки етап и при необходимост да се търсят алтернативни подходи за оптимизиране.

Според направените до момента проучвания за оценка на цикъла на живот на гипсовите строителни плоскости (гипсокартон), най-съществено е влиянието на използвания природен газ за процесите на сушене и калцинация на суровината и сушене на плоскостите. Според Gypsum Association и направеният през 2013 година анализ на цикъла на живот на стандартни гипсови строителни плоскости (тип А), около 70 % от общото въздействие върху околната среда е резултат от консумираната енергия допринасяща за глобалното затопляне, киселинните дъждове и нарушаването на озоновия слой. За производствата работещи с природен гипс е отчетено 98 % влияние в резултат на изтощаването на природните ресурси, като абиотичен фактор. Сухите и течните добавки участващи в рецептите са класирани на трето място по значимост с еутрофикационен потенциал от близо 27 %, като влиянието им може да варира според спецификата на произвежданите продукти.

IX.2. Потенциал на технологията за производство на гипсови композити с намалено съдържание на свързващо вещество

Заклучителната фаза на изследването е насочена към охарактеризиране на производствения и екологичен потенциал на оптимизираните моделни състави на гипсови композитни материали с ниско съдържание на свързващо вещество.

Въз основа на получените лабораторни и експериментални резултати, и базирайки се на оценката на цикъла на живот на продуктите, в съответствие с ISO 14040, бяха определени ползите от прилагането на новата технология. За целите на нашите производствени тестове източник на гипс бе синтетичен еквивалент - десулфодихидрат. Въпреки това, голяма част от производствата както на гипсови строителни плоскости,

така и на сухи строителни смеси, и композити на основата на гипс все още работят с природен гипс. В част от тях, технологичните параметри на процесите и изискванията за качество на продуктите позволяват за производствени цели да се комбинират природен и синтетичен полухидрат. Въпреки това, е регистрирано силно отрицателно влияние и огромна значимост от добива и приложението на природен гипс за гипсови композити. Ето защо, редуцирането на количеството природен гипс за калцинация, използван като суровина за направата на композитни материали с над 17 % за денонощие при включване в рецептата на инертен материал като заместващ компонент, би облекчило влиянието върху околната среда.

За да охарактеризираме степента на редуциране на CO₂ емисии при намалена консумация на природен газ за сушене и калцинация, приложихме емисионния фактор за метан, в съответствие с Декларацията за екологични продукти на основата на гипс от 2009 г. В избрания емисионен фактор за това изчисление е взет под внимание и жизненият цикъл на енергийния носител. За проведените в обхвата на тази работа промишлени експерименти, прилагането на десулфогипс като инертен материал в състава на гипсовата матрица е отличен начин за оптимална енергийна ефективност и поради лесното транспортиране (чрез лентов транспортър). От друга страна материалът е отпадъчен продукт, който продължава да намира приложение и не е необходимо да бъде депониран. В същото време, не се извършват специфични, енергоемки процеси по преработка на материала, а директно въвеждане на суровината в състава на сместа.

Въвеждането на синтетичен гипс в сурово, необработено състояние в обема на гипсовата матрица в съдържание 15 %, редуцира производството на полухидрат с близо 17,6 % за денонощие. Това от своя страна понижава количеството фосилни горива използвани като източник на енергия за процесите на сушене и калцинация. Тук трябва да се вземе под внимание, че спецификата на суровината (влажност, чистота), обуславя промяната в параметрите на процесите на сушене и калцинация, за това калкулацията е строго индивидуална и варира в широки граници. Резултатите от извършеното охарактеризиране ефективността на производството на полухидрат от десулфогипс, при прилагане на оптимизирана рецепта с понижено съдържание на свързващо вещество показват, че консумацията на метан за денонощие би могла да се понижи с >11,5 %, разходът на електроенергия за сушене с 3,9 %, а за калцинация - с 4,2 %.

Както бе споменато, инкорпорирането на десулфогипс повлиява положително разливността на гипсовата смес. Това от своя страна води до понижена консумация на вода в рецептата и по-малко количество пластификатори. Пониженото количество вода, означава понижаване на температурите за изсушаване на плоскостите, или по-ниска енергийна консумация за килограм изпарена вода и по-ниска енергийна консумация на квадратен метър площ. За избрания от нас продукт за провеждане на промишленото изпитване на оптимизираните моделни състави, консумацията на вода в рецептата спадна с над 6 % спрямо стандартното количество в минута, а необходимото количество метан изразходван за изсушаване на плоскостите може да се редуцира с 18 % за час. За консумацията на енергия за изсушаване на плоскостите (kWh/m²) е отчетен спад с > 3 % за час.

Оптимизираните рецепти притежават отличен потенциал за приложение на отпадни продукти и превенция на депонирането им чрез инкорпориране в състава на гипсовите строителни материали. От друга страна, ще се намали консумацията на природни суровини като гипс и вода, и ще се понижи разхода на природен газ и електроенергия за процесите, и количеството пластификатори.

Таблица 22. Данни за консумацията на енергия за калциниране на дихидрат,
(Wirsching, 1985)

Процес на калцинация	Краен продукт	Химически свързана вода	Обща консумация на енергия за тон дихидрат		Максимален капацитет за денонощие
		%	Топлинна, [kJ/t]	Електрическа, [kWh/t]	[t]
Калциниране с предварително смилане до 0-0,2 mm чрез сушене-смилане	β-полухидрат/гипсова мазилка	5,5÷5,7	1050000÷1100000	21÷23	220÷500

Връзката между екологичния потенциал основан на намалената консумация на суровини и енергия, и икономическата оценка в полза на производствата, дефинира нов метод за капитални спестявания за производството на гипсови строителни плоскости със съдържание на 15 % инертен материал в състава.

Х. Общи изводи

Целта на това изследване е да се създадат научни и практически предпоставки за приложението на инертни материали в производството на „зелени” гипсови строителни материали. Въз основа на получените резултати и наблюдаваните изменения от проведените лабораторни и промишлени изпитвания, могат да бъдат обобщени следните изводи:

1. Подобряване на обработваемостта на гипсовата смес и пожароустойчивостта на гипсовите тела е възможна след заместване на 15 ÷ 25 % полухидрат с фелдшпат, доломит или мраморно брашно. От получените резултати може да се твърди, че за подобряване на течливост на композитната смес е целево прилагането на минерални добавки, като най-добри резултати са постигнати след прибавяне на 25% мраморно брашно. Добавянето на мраморен отпадък в количество 25 % от състава, е препоръчително за подобряване на кохезията при пряк огън на гипсовите тела. Увеличаването на количеството фелдшпат, доломит и мраморно брашно не промени съществено времето на свързване на суспензията, като най-значимо изменение бе наблюдавано при прибавяне на 15 % ÷ 25 % мраморно брашно. Въпреки, че общата механична якост на изследваните гипсови тела намалява, най-добри якостни свойства показват пробите, приготвени с мраморно брашно. Допълнително, абсорбционните свойства на телата с инертен материал, се увеличават до максимум 5,5 % от референтната проба.

2. Ефективното използване на мраморен прах и други инертни минерални добавки, в комбинация с отпадъчен гипс в производството на строителни материали, допринася за разработването на устойчива среда.

3. Установен е потенциал за приложение на строителни отпадъци, получени като ситнеж от трошачно-сортировъчните инсталации за преработка. Наблюдавано е повишаване на течливостта на гипсовата смес с нарастване на съдържанието на строителни отпадъци в състава. Рецептите с високо съдържание на строителни отпадъци показват тенденция към плавно удължаване на времето на свързване. Също така, композитите със съдържание на строителен отпадък показват по-добри кохезионни свойства. За якостно-деформационните показатели е отчетен спад на общата устойчивост на композитните структури при нарастване на съдържанието на строителни отпадъци. Въпреки това, пробите с 25 % в състава, показват все още приемливи резултати. С нарастване на количеството строителни отпадъци, се

наблюдава влошаване на свиваемостта и абсорбционната способност на телата. В лабораторни условия, пробните тела със съдържание на строителни отпадъци показват степен на залепване с хартията, по-добре изразена в сравнение с останалите добавки изследвани в обхвата на работата. Инкорпорирането на строителни материали в структурата на гипсовите композити в количество 15 % ÷ 30 %, би облекчило депонирането им като превърне гипсовата индустрия в утвърден сектор за утилизацията.

4. За регулиране на обработваемостта на гипсовата смес е целево приложението на пепелина, тъй като нарастването на обемното ѝ съдържание повишава течливостта на суспензията. Рецептите с високо съдържание на пепелина регистрират удължаване на времето на свързване, което би могло да окаже благоприятно влияние за производството на гипсови композити. Редуцирането на свързващото вещество за сметка на нарастващото количество пепелина категорично повишава пожароустойчивостта на гипсовите тела.

5. Установено е, че добавянето на каолин и шамот в обема на телата повлиява благоприятно разливността на гипсовата смес. Резултатите показват понижаване на вискозността при добавяне на 15% каолин, като при най-високите съдържания пробите показват почти двойно по-голям диаметър на разливане. Прибавянето на каолин и шамот като заменящи полухидрата материали, показва обща тенденция към намаляване на устойчивостта на гипсовите тела на механични натоварвания. Шамотът като заместващ материал показва по-ниски резултати на якост от пробите съдържащи каолин. Отчетено е понижаване на плътността на гипсовите тела спрямо еталонната проба. Каолинът показва понижаване на абсорбционната способност на телата, за разлика от всички останали инертни материали.

6. С нарастване на количеството кварцов пясък се понижава механичната устойчивост на телата произтичаща от намаленото съдържание на свързващо вещество. Отчетена е тенденция към намаляване на плътността на пробните тела с повишаване на количеството заместващ материал. Наблюдавано е понижение във вискозността на смесите и удължаване на времената на свързване. С нарастване на съдържанието на кварцов пясък се подобряват кохезионните свойства на телата на пряк огън.

7. Наблюдавано е слабо изменение на времената на свързване след прибавяне на десулфодихидрат в сравнение с останалите инертни материали. Това се дължи на особеността на суровия гипс инкорпориран в сместа, да действа като ускорител на процеса на рехидратация на полухидрата. Най-ниски стойности на якостно-деформационните показатели бяха измерени за гипсовите тела съдържащи десулфогипс. Наблюдавано е повишаване на разливността на гипсовата смес с повишаване на количеството десулфогипс в състава.

8. Понижаването на количеството свързващо вещество, означава понижена консумация на гипс за сметка на други материали, инертни спрямо гипса, характеризирани като отпадъчни продукти (строителни отпадъци, десулфогипс, мраморно брашно). Редуцирането на количеството свързващо вещество означава ниска консумация на гориво за сушене и калцинация на суровината, а пониженото количество природен газ - ниски въглеродни емисии. Съдържанието на инертен материал в рецептите води до редуциране на количеството пластификатори и понижава разхода на вода за технологични цели, а намаленото количество вода в рецептите, води до понижаване на температурите за изсушаване на плоскостите и спад в разхода на природен газ.

9. Получените експериментални резултати от промишлените изпитвания, показват че използването на десулфодихидрат в състава на гипсовите смеси, без предварителна обработка, с подходяща система за дозиране на влажен материал би довело до

повишаване на енергийната ефективност и подобряване на екологичния баланс на производството.

10. Получените резултати от проведените промишлени тестове и производствените данни от работата на инсталацията, и ефективността на оптимизираните рецепти показват, че разработената иновативна технология за производство на гипсови строителни материали с понижено съдържание на свързващо вещество е подходяща за производството на „зелени“ гипсови строителни плоскости.

11. В резултат на промишлените изпитвания може да се твърди, че проектираната система за дозиране на десулфодихидрат е подходяща за работа в условията на производството на гипсови строителни плоскости.

12. В резултат на проведените промишлени тестове, може да се твърди, че десулфогипсът е подходящ заместващ компонент в производството на всички видове гипсови строителни плоскости, който оказва благоприятно влияние върху ефективността на производствата.

XI. Научно-приложни приноси

Анализът на данните от проведените лабораторни и промишлени изпитвания, относно влиянието на рецептурните параметри върху показателите на строителни материали на основата на гипс, в съответствие с дефинираните цели и задачи на изследването, фиксира следните научно – приложни приноси:

1. Изучено е и е доказано влиянието на различни инертни материали върху рецептурните и технологични параметри в производството на гипсови строителни материали.
2. Приложен е нов подход в оползотворяване на техногенни суровини, като паралелно с това е разработена нова практика за превенция на изтощаването на природни минерални ресурси.
3. Реализирана е нова конструкция за дозиране на инертни материали с висока влажност в производството на гипсови строителни материали.
4. Вследствие на проведените лабораторни и промишлени изследвания е разработена и внедрена нова оптимизирана рецепта за производство на гипсови строителни плоскости с понижено съдържание на свързващо вещество, които отговарят на стандартите.
5. Реализирано е повишаване на ефективността на производството в резултат на понижаване на консумацията на енергия и суровини, и понижаване на количеството въглеродни емисии.
6. Доказано е, че има възможност всички търсени на пазара видове гипсови строителни плоскости да бъдат произвеждани с понижено съдържание на свързващо вещество.

XII. Бъдещи насоки

В резултат на проведените лабораторни тестове и на получените данни от промишлените внедрявания, могат да се планират следните насоки за бъдещи изследвания в областта на оптимизиране на моделните състави на гипсови строителни материали:

1. Следвайки концепцията на дисертационния труд, да се проведат промишлени тестове с останалите осем инертни материала изследвани в обхвата на дисертационния работа;
2. Да се изследват останалите показатели на оптимизираните гипсови тела, като устойчивост на удар, топлоизолационни свойства и акустична изолация;

3. Да се изследват и оценят влиянията на произведените гипсови строителни материали върху качеството на вътрешния (интериорен) въздух в затворени помещения;
4. Да се оценят възможностите за бъдещо рециклиране в крайния етап от цикъла на живот на продуктите;
5. Да се проведат промишлени тестове с по-високо съдържание на инертен материал в матрицата на гипсовите композитни материали;
6. Да се проведат промишлени тестове в условията на производството на сухи строителни смеси, гипсфазерни плоскости и други композити на основата на гипс;
7. Да се направи комплексна прогностична оценка на цикъла на живот, след провеждане на допълнителните изпитвания и да се определи състоянието на технологичния поток, като се дефинира ефективността на оптимизираните рецептурни състави.

XIII. Публикации по дисертационния труд

- Tinkova, T.**, Effects of additives on gypsum slurry behavior, Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies, Vol. 9, ISSN 1314-7269 (Online), Published at: www.scientific-publications.net, pp. 422-429, 2015.
- Tinkova, T.**, G. Paraskov, I. Grigorova, I. Nishkov, Utilization of construction waste as a raw material in manufacturing in gypsum based compositions, Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies, Vol. 9, ISSN 1314-7269 (Online), Published at: www.scientific-publications.net, pp. 414-421, 2015.
- Tinkova, T.**, I. Grigorova, I. Nishkov, New approaches on gypsum body composite materials addition, In Proc. of XVIth Balkan Mineral Processing Congress, Belgrade, Serbia, Vol. II, pp. 1069 - 1075, XVI - 007.14.04, June, 2015.
- Тинкова, Т.**, И. Григорова, Г. Парасков, И. Нишков, Композитни материали на основата на гипс и пепелина, Годишник на МГУ, том 58, свитък II, Добив и преработка на минерални суровини, София, октомври, стр.118-122, 2015.

XIV. Литература, използвана в автореферата

- Best, C. J., Marsh, F. L., Method of producing light weight plasters, Patent No. US2031585 A, United State Patent Office, 1936.
- Denning, S. P., Plaster, Patent No. US2197566 A, United State Patent Office, 1937.
- Feuerborn, H. J., Coal ash utilization over the world and in Europe, International Workshop on Environmental and Health Aspects of Coal ash utilization, 2005.
- Himsworth, R. F., Dunn, S. J., Calcium sulphate plaster, Patent No. US 2113375 A, United State Patent Office, 1938.
- King, D. G., Gypsum plaster, Patent No. US1989641 A, United State Patent Office, 1935.
- Lefebure, V., Calcium sulphate plaster mix, Patent No. US1970663 A, United State Patent Office, 1932.
- Wallace, E. N., Lefebure, V., Manufacture of cements from calcium sulphate and blast furnace slag, Patent No. US2248033 A, United State Patent Office, 1941.
- Wirsching, F., Knauf Gerbrüder, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol.4, 555-584, 1985.