

МИННО ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

МИННО ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ

Катедра "Механизация на мините"

гл. ас. инж. Иван Стефанов Минин

Технико- експлоатационни параметри на барабанни топкови мелници (за условията на обогатителни фабрики „Елаците” и „Челопеч”).

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за получаване на образователна и научна степен "доктор"

Специалност: "Механизация на мините"

Професионално направление: 5.8 "Проучване добив и обработка на полезни изкопаеми"

**Научни консултанти: 1. Проф. д.т.н. Антоанета Ботева
2. Доц. д-р Емил Асенов -ТУ**

София, 2011г.

МИННО ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

МИННО ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ

Катедра "Механизация на мините"

гл. ас. инж. Иван Стефанов Минин

Технико- експлоатационни параметри на барабанни топкови мелници (за условията на обогатителни фабрики „Елаците” и „Челопеч”).

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за получаване на образователна и научна степен "доктор"

Научна специалност: "Механизация на мините"

Професионално направление: 5.8 "Проучване добив и обработка на полезни изкопаеми"

Научни консултанти: 1. Проф. д.т.н. Антоанета Ботева

2. Доц. д-р Емил Асенов -ТУ

Рецензенти:

София, 2011г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита на разширен катедрен съвет на катедра „Механизация на мините“ при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“-София на 06.04.2011г.

Дисертацията е разработена в катедра „Механизация на мините“ при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, а експерименталните изследвания са проведени в „Елаците мед“-АД, „Челопеч майнинг“ – АД и МГУ „Св. Иван Рилски“.

Докторантът работи като главен асистент в катедра „Механизация на мините“ при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“.

Дисертационният труд е в обем 178 страници, съдържащ текст, 55 фигури, 50 таблици, списък с използваните литературни източници и сайтове и 4 приложения в обем от 56 страници, съдържащи 36 фигури и 10 таблици.

Номерацията на таблиците и фигурите в автореферата съответства на номерацията в дисертационния труд.

Защитата на Дисертационния труд ще се състои на2011г. от.....часа в зала..... на Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София, на открито заседание на

Материалите по защитата (дисертация и рецензии) са на разположение на интересуващите се в канцеларията на сектор СДК при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“ - София.

Адрес: МГУ „Св. Иван Рилски“,
София 1000,
Студентски град,
Сграда КЦОК, ет. 2,стая 4.

Автор: гл.ас. Иван Стефанов Минин

Заглавие: Техничко- експлоатационни параметри на барабанни топкови мелници (за условията на обогатителни фабрики „Елаците“ и „Челопеч“).

Тираж 30 броя.

Издателска къща „Св. Иван Рилски“ при МГУ - София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Цел на дисертационния труд

Целта на настоящият труд е чрез изследване на технологичният процес на смилане на материали в барабанна топкова мелница /БТМ/, и създаване на математичен модел на процеса смилане, да се определи влиянието на конструктивните параметри на топкови мелници за мокро смилане на руди върху технологичните такива, и покаже връзката между тях, както и да се избере подходящ технологичен режим

Актуалност

Динамичните промени в световната икономика водят до необходимост от разработването на все по бедни находища на полезни изкопаеми. Последното налага смилането на огромни маси руди с цел разкриване на рудните минерали при преработката на рудите. В същото време нараства обемът на консумацията на смлени материали за нуждите на строителната и преработвателната промишленост. От друга страна непрекъснато се повишават цените на електрическата енергията, това налага изследването на барабанните мелници които са голями консуматори на електрическа енергия с цел поевтиняване на процеса смилане.

Актуалността на настоящото изследване се определя от практическото значение на разработените, методики и получените експерименталните резултати показващи връзката на конструктивните и технологични параметри на топковите мелници. Моделите и методиките са приложими и при проектиране на подомни машини.

Практическа приложимост

Въз основа на теоретичните и експериментални изследвания са получени данни, които могат да се използват при проектирането, изследването и оптимизирането на подобен тип машини с оглед увеличаването на техническата и икономическата им ефективност.

Разработена е методика за симулационно компютърно изследване на 3D модел на барабанна топкова мелница. Методиката е приложена върху триизмерен пространствен компютърен модел на БТМ.

Научна значимост и новост

На базата на проведените експерименти е създаден математичен модел на смилането в БТМ чрез който са получени регресионни уравнения за три целеви функции. Като са използвани получените регресионни уравнения за целевите функции е създадена е обобщена целева функция на полезност описваща връзката между конструктивни и технологични параметри.

Реализиране на работата

Настоящото изследване е извършено в периода 2004 – 2010г. Натурните изпитания и изследвания са извършени върху БТМ, намиращи се в “Елаците мед” -АД и “Челопеч майнинг” -АД. Компютърните изследвания и обработката на резултатите в МГУ „Св. Иван Рилски”- София.

Одобряване на работата

Работата е докладвана на етапи и като цяло на заседание на катедра „Механизация на мините“ при Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“- София.

Публикуване

Основните резултати от дисертационния труд са представени в показни 4 публикации в края на автореферата, докладвани на Международни научни сесии 2004, 2006 и 2010г на МГУ „Св. Иван Рилски“- София.

Структура и обем на работата

Дисертационният труд е в обем 178 страници, съдържащ текст, 55 фигури, 50 таблици, списък с използваните литературни източници и сайтове и 4 приложения в обем от 56 страници, съдържащи 36 фигури и 10 таблици.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. Анализ на съвременното техническо ниво на процеса смилане (мокро топково смилане)

Смилането на материали е промишлен процес, намиращ приложение в строителната, минно-обогатителната, химическата, багрилната, хранително-вкусовата и други промишлености. Смилането е крайната фаза на процесите на редукция на размерите на материалните частици. Строителните технологии употребяват инертни материали, необходими за облицовки и пълнители, както и материали, използвани за свързващи вещества в сухи смеси. Това са главно индустриални материали със средна твърдост. При обогатителните технологии се смилат суровини със средна до висока твърдост на смилания материал. Според източници [80] около 3.3 % от световното потребление на електроенергия за 1971 г. е употребявана от обогатителната индустрия за трошене и смилане на минералните суровини. Според съвременни източници [81] потреблението на обогатителната индустрия на САЩ само за трошене и смилане на материали за 2003г. е потребена $29 \cdot 10^9$ kWh или около 1 % от общото потребление на енергия в САЩ.

Основен проблем, решаван от теорията на разрушаване на материалите, е да се намери взаимовръзката между силите и енергиите вложени за разрушаване на даден обем от материала и времето, вида и начина на разрушаването на този обем от материала. Научното направление „смилане на материали“ се занимава с взаимовръзките между зърно метричните характеристики на частиците, техните физикомеханични свойства, параметрите на смилачната машина и разхода на енергия за разрушаване на частиците.

Изборът на мелницата и определяне на оптималния ѝ режим на работа за съответния вид продукт в настоящият етап се извършва емпирично, тъй като натрупаните знания имат повече качествен характер. Непосредствен интерес представлява интерпретацията на съществуващите експериментални данни от изследователската работа с лабораторни, полу промишлени и промишлени образци

барабанни мелници. Изследвани са различни типове мелници на базата на които можем да направим следните заключения:

- Изследване на механизма на разрушаване на твърдите тела. Тези изследвания се доближават до работите върху физиката на твърдите тела, като основната им цел е да се изучат основните закономерности на процесите, които протичат при разрушаване на телата.

- Изследване на механиката на мелниците.

Работите в тази група третираят въпросите за статиката и динамиката на мелницата, а така също и въпросите за определянето на съществени фактори, влияещи върху процеса на смилането.

- Изследвания върху закономерностите на зърнометричния състав и физикомеханичните свойства на готовия продукт.

На база на литературния обзор и на известните научни изследвания, експерименталните разработки и производствения опит, могат да се направят следните изводи:

1. За смилане на руди най-удачни са къси барабанни топкови мелници от среден или голям промишлен клас. Относно схемата им на задвижване най – удачни са със схема на задвижване от зъбен венец получаващ въртящ момент от малко зъбно колело монтирано на вал задвижван от редуктор или непосредствено от двигател чрез съединител.

2. Изхождайки от необходимият диапазон на смилане при рудите, като най-добър скоростен режим се отбелязва смесен или водопаден.

3. В литературата съществуват три подхода за описание на процесите на разрушаване на материалите – феноменологичен, физически и емпиричен.

4. Съобразно съвременните теоретични постановки процесите, които протичат при смилането са многообразни и взаимосвързани. Промяната в свойствата на материалите, получени чрез смилане с БТМ се различават съществено от тези, получени по друг механичен способ. Като такива свойства могат да се посочат механичната активация, повишената разтворимост и промяната в енергията на повърхността.

5. Основно разрушаването на материалите във БТМ се извършва посредством удар и стриване при напрежения, по-високи от границата на разрушаване.

6. Всички съществуващи методи не отчитат историята на натоварването – времето за действие, честотата, редуването и разпределението на натоварването.

7. Почти всички теории за разрушаването на металите не отчитат ефекта от натрупването на дефектите в обработвания материал.

8. За фино смилане на материалите по-ефективно се оказва разрушаването чрез стриване.

9. В съществуващите литературни източници има информация за влиянието на един или друг фактор самостоятелно върху производителността или мощността на БТМ. Липсва информация за въздействието им едновременно.

10. Не съществува пълна информация за влиянието на конструктивните параметри на барабанните мелници върху технологичните параметри на процеса смилане.

11. Не съществува пълна информация за методите използвани при определянето на конструктивните параметри на съществуващите барабанни мелници.

12. Не съществува цялостна методика за определяне на оптималните технологични и конструктивни параметри на съществуващите барабанни мелници.

13. В съществуващите литературни източници не е разгледан въпросът за връзката между износването на облицовката на мелницата и технологичните параметри на смилането.

14. За определянето на оптималния режим на работа на БТМ не бяха открити методи.

ГЛАВА II. Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на настоящият труд е чрез изследване на технологичният процес на смилане на материали в барабанна топкова мелница /БТМ/ и създаване на математичен модел на процеса смилане, да се определи влиянието на конструктивните параметри на топкови мелници за мокро смилане на руди върху технологичните такива и покаже връзката между тях, както и да се избере подходящ технологичен режим.

Постигането на поставената цел е възможно, като се решат следните основни задачи:

1. Да се извършат технологични изследвания в реални условия на барабанна топкова мелница:

- да се изследва износването на облицовките на барабанна топкова мелница;
- да се изследва относителният енерго разход на барабанна топкова мелница;
- да се изследва добивът на разчетна класа в барабанна топкова мелница;
- да се изследва относителната производителност на мелницата.

2. Създаване на математичен модел на процеса смилане в барабанна топкова мелница.

3. Да се определи структурата на математичния модел на процеса на смилане на материали с барабанна топкова мелница.

4. Статистически анализ на резултатите от измерванията на мелници работещи в реални условия.

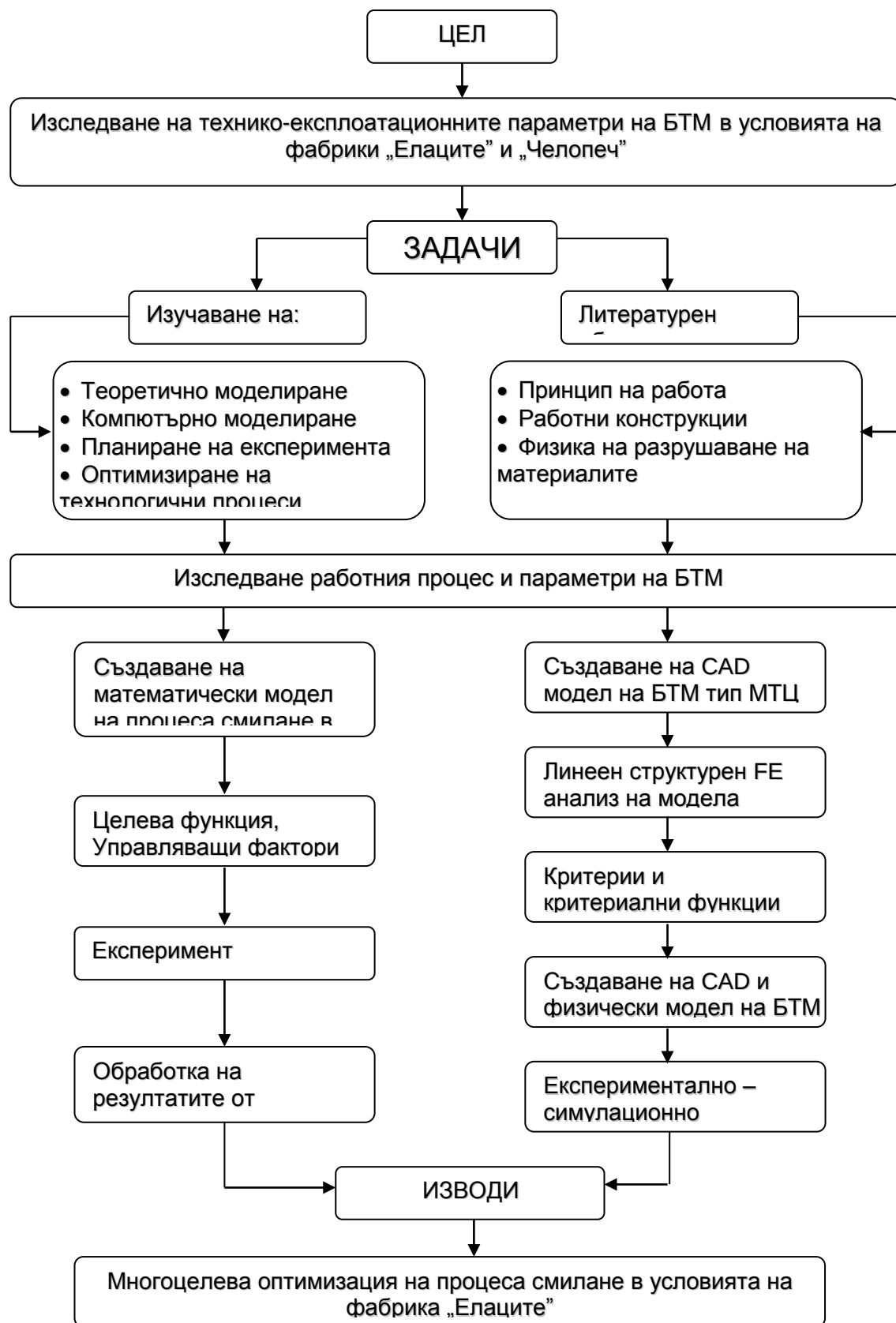
5. Създаване на CAD модел на барабанна топкова мелница, на който да бъде направено симулационно моделно изследване.

6. Създаване на CAD и физичен модел на барабанна топкова мелница на базата на теорията на подобие.

7. На база на извършените изследвания и направените изводи да се създаде теоретична основа за определяне на влиянието на конструктивните върху технологичните параметри на мелниците.

8. Да се създаде обобщена функция на полезност описваща работата на БТМ.

За онагледяване на поставените задачи е представен методичният алгоритъм за достигане на поставената цел на блок-схема 2.1.



Блок схема 2.1

ГЛАВА III. Експериментално изследване на износването на облицовките на барабанни топкови мелница в условията на обогатителни фабрики „Челопеч” и „Елаците”

3.1 Теоретична обосновка

Износването на облицовките на мелниците е един от основните проблеми при експлоатацията на тези машини. Освен, че те регулярно трябва да бъдат подменяни, което води до значителни финансови разходи за предприятията, износването влияе и на технологичният процес на смилане на рудата. Износването на облицовките на мелницата увеличава вътрешният обем на мелницата и намалява коефициентът на напълване със смилащи тела.

Плъзгането на раздробявания пълнеж по повърхността на облицовката на барабана зависи основно от профила на облицовката и коефициента на триенето между раздробявания пълнеж и облицовката.

Износването на облицовката на топковите мелници ще е по – интензивно в мелниците имащи повече плъзгане и специфични нормални контактни налягания между раздробяващата маса със смилаемия материал и облицовката на барабана.

Известно е, че количеството на раздробен чрез изтриване продукт [71] е пропорционално на площта на съприкосновение на търкащите се повърхности. Разчетите показват, че повърхността на триене на облицовките с топките е едва около 2% от сумарната повърхност на топките вътре. Това позволява да твърдим, че количеството износен материал в резултат на при плъзването (триенето) между смилащите тела и облицовката на барабана, съставлява примерно 2% от общото количество на износеният материал.

3.2. Описание на експеримента проведен във фабрика „Челопеч”

Профилът на облицовките на мелниците тип МТР 3,5х5 са показани на фигура 3.1 от дисертационния труд, като са направени измервания на четири различни сечения с дължини съответно 120, 170, 150 и 135 мм. Освен това измерванията са в четири зони (А, В, С, D) от барабана, което е показано на фигура 3.2 от дисертационния труд . При всяко измерване са записани широчината на съответното сечение и количеството преработена руда до моментът на измерването от моментът на поставяне на нова облицовка.

Измерванията за всяка облицовка от моментът на поставянето са два броя. Това се дължи на факта, че всяко измерване води до голям престой на машината, което е икономически не изгодно за предприятието. Измерванията са направени на 4 броя облицовки.

3.3 Статистически анализ на резултатите получени във фабрика „Челопеч”

Резултатите от експеримента показаха, че износването в отделните зони от барабана е различно, което предполага да бъде направено статистическо изследване по отделно за всяка зона, а след това то да бъде усреднено за цялата облицовка. Изследването има за цел да се получи зависимост между износването $i, \%$ от преработената до моментът на достигането му количество руда $Q_{ПР}, t$.

Резултатите от измерванията показани в таблица 3.1 са статистически изследвани за всяка зона. Посредством програмата STATGRAFICS са получени по два модела за всяка зона, един с константа и един без константа. Оказа се, че параметрите на моделите с константа не могат да бъдат приети за адекватни поради това, че стойностите на показателя на доверителна вероятност (***P*-критерий**) за константите е над критичната $> 0,05$.

На таблица 3.13 са показани параметрите на получените модели, като модел М3.9 се отнася за усредненото износване на целият барабан. В таблицата са показани стойностите на коефициентът на множествена корелация - R^2 , максималният показател на доверителна вероятност - P_{MAX} , стойността на критерия на Фишер- F и неговата значимост, средната абсолютна грешка, степените на свобода - ν и стойностите на константите и коефициентите. Аналитично моделът изглежда по следният начин:

$$i = 1,12 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{ПР}, \% \quad (3.13)$$

3.4. Описание на експеримента проведен във фабрика „Елаците”

Експериментът проведен във фабрика „Елаците” включва 5 броя измервания на 5 различни мелници и е проведен в периода 01.07.2009г – 24.03.2010 г.

Износването се определя в проценти като 0% отговаря на износване когато са поставени нови облицовки, а 100% при максимално износване тоест когато трябва да бъдат сменени износените облицовки.

За всяка мелница са направени две измервания в различни моменти от време като, това е съобразено с плановите спирания на машините. Резултатите са показани в таблица 3.11.

3.5 Статистически анализ на резултатите получени във фабрика „Елаците”

За целта резултатите от измерванията показани в таблица 3.12 са статистически изследвани посредством програмата STATGRAFICS благодарение на което се получи адекватен модел без константа.

Параметрите на регресионен модел М 3.10 са показани в таблица 3.13.

Следователно във аналитичен вид регресионният модел М 3.10 може да се представи:

$$i = 5,72 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{ПР} \% \quad (3.14)$$

Полученият модел е с добри показатели (таблица 3.13) и той може да бъде оценен като модел с голяма адекватност. Коефициентът на множествена корелация R^2 е 98,99%, а коригираният коефициент на множествена корелация $R^2(adj)$ е над 98%. Този модел има добри показатели на оценка. Стойността на показателя на доверителна вероятност (***P*-критерий=0**) за модела е под критичната **0,05**, т.е. може да се приеме, че моделът е адекватен с доверителна вероятност над 98%.

Таблица 3.1 Резултати от измерванията

Дата	Зона на	Сечение	Сечение	Сечение	Сечение	Износване	Преработка, t
25.07.06	A	90	100	95	90	34,04	270597
	B	95	110	105	100	28,01	270597
	C	100	115	110	100	25,4	270597
	D	85	110	105	95	31,2	270597
10.10.06	A	60	70	65	60	64,21	537716
	B	65	75	70	75	59,9	537716
	C	70	75	75	75	58,4	537716
	D	55	60	65	60	66,2	537716
13.02.07	A	95	110	100	85	31,62	261617
	B	85	120	110	100	27,79	261617
	C	90	130	120	100	23,61	261617
	D	85	100	95	90	35,09	261617
16.05.07	A	65	80	80	75	47,47	537136
	B	70	85	75	80	45,6	537136
	C	70	95	100	80	39,96	537136
	D	65	70	70	60	53,39	537136
20.09.07	A	90	100	95	90	34,04	237468
	B	85	120	115	100	26,96	237468
	C	95	125	115	95	25,07	237468
	D	85	100	90	90	35,92	237468
10.04.08	A	0	5	5	5	97,51	758055
	B	15	25	15	10	88,85	758055
	C	20	35	30	28	80,5	758055
	D	30	45	32	25	77,17	758055
05.08.08	A	90	110	100	85	32,67	279695
	B	95	130	120	95	23,5	279695
	C	95	125	120	95	24,23	279695
	D	80	105	110	90	32,89	279695
17.02.09	A	0	5	5	5	97,51	772067
	B	5	5	5	5	96,46	772067
	C	5	15	13	10	92,73	772067
	D	22	30	33	15	82,73	772067

Параметри на получените модели Таблица 3.11

Модел Зона	Const	$Q_{ГР}, t$	ν	F	Значимост на F	$P_{\max}$	Абсолютна грешка.	R^2
M3.1- A	-0,222	0,00012	11	343,04	0,000	0,9354	3.12	97.12%
M3.2- A		0,00012	12	831,75	0,000	0,000	3.04	98.69%
M3.3- B	-2,124	0,000116	11	327,81	0,000	0,437	3.791	97.04%
M3.4- B		0,000116	12	702,44	0,000	0,000	3.399	98.46%
M3.5- C	-2,112	0,000108	11	244,48	0,000	0,4744	4.043	97.04%
M3.6- C		0,000104	12	526,71	0,000	0,000	3.643	97.95%
M3.7- D	2,573	0,000105	11	433,3	0,000	0,2427	3.631	97.74%
M3.8- D		0,00011	12	999,88	0,000	0,000	3.388	98.91%
M3.9		0,000112	12	1119	0,000	0,000	2.576	99.02%

Резултати от измерванията във фабрика „Елаците”. Таблица 3.12

Период	Диаметър на барабана D_B, m	Дължина на барабана L_B, m	Износване $i, \%$	Преработка Q_{PR}, t
01.07.2009 24.03.2010	4,13 4,22	6,23 6,29	45	966922
01.07.2009 15.01.2010	4,12 4,22	6,25 6,32	50	809024
23.03.2009 26.11.2009	4,20 4,30	6,24 6,33	50	898547
01.06.2009 24.03.2010	4,16 4,29	6,17 6,30	65	1044979
25.01.2008 27.11.2008	4,17 4,30	6,15 6,28	65	1091019

Таблица 3.13. Параметри на модел М3.10

Параметри	Стойност	Стандартна грешка	Т- статистика на Стюдънт		Р критерий
Q_{PR}, t	5,72E-05	1,33E-06	43,1777		0,000
	Сума от квадрати на модела	Степени на свобода	Средно на квадрати на модела	F критерий	Значимост на F
Модел	30637,8	1	30637,8	1864,31	0,000
Остатък	312,243	19	16,4338		
Общо	30950	20			
Коефициент на множествена корелация				98.9911 %	
Коригиран коефициент на множествена корелация				98.9911 %	
Стандартна грешка				4.05386	
Средна абсолютна грешка				2.32305	
Статистика на Дърбън- Отсън				1.97877	
Остатъчна авто корелация				0.000	

3.6. Изводи.

От получените модели на износването можем да направим следните изводи:

- получените математични модели показват, че износването на облицовките на мелниците, увеличаващи вътрешният диаметър и дължина на барабана е в линейна зависимост от количеството преработена руда;

- износването на облицовките на мелницата във фабрика „Челопеч” е по интензивно от това на мелниците в „Елаците”, но то може да се дължи на различното качество на облицовките и на различната абразивност на рудата.

- количеството преработена руда от БТМ от моментът на поставяне на нова облицовка, до всеки следващ момент е достатъчно условие да се определят текущите стойности на вътрешният диаметър и дължина на барабана.

- ползата от тези модели е в това, че във всеки момент по тях може да се определи степента на износване в зависимост от количеството преработена руда, но

това се отнася само в случаите че качеството на облицовките и характерът на рудата не се променя.

ГЛАВА IV. Експериментално изследване на работата на барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5Х6 в условията на „Елаците мед” – АД.

4.1. Математически модел на процеса смилане в барабанна топкова мелница **4.1.1. Етапи на моделирането**

Най-важният критерий за оптимален работен процес може да бъде формулиран по следният начин:

Да се конкретизират и установят стойностите на работните параметри на БТМ, спрямо които да бъде възможно да се осигури очакваната от потребителя производителност при изискваното качество на крайния продукт и то да бъде постигнато при минимални енергийни разходи.

Процесът на моделиране на всеки многофакторен обект представлява сложна задача [41,49], която се решава като се използват строги математико-статистически методи, а така също и редица неформализирани методи.

4.1.2. Определяне на целта и целевите функции. Изисквания към целта и целевата функция

Първата задача, пред която се изправяме е моделирането на барабанни топкови мелници /БТМ/ и ясно формулиране на целта.

Целевата функция трябва да отговаря на някои изисквания.

1. Целевата функция трябва да се характеризира количествено т.е. всяка комбинация от стойности на входните фактори да се характеризира с число.

2. Целевата функция трябва да бъде единствена.

В много случаи това изискване се изпълнява автоматично т.е. целта е поставена строго конкретно и характеристиката ѝ е една. Най-често такива са икономическите целеви функции (себестойност, енергоразход и др.).

В други случаи целта е поставена по-общо и това позволява да се формулират няколко целеви функции, като всяка от тях характеризира определена страна на поставената цел. При това в повечето такива случаи е трудно, а много често и невъзможно, да се отдаде предпочитание само на една от тях. Такива са най-вече целевите функции при изследване на качеството на предметите.

4.1.3.Избор на цел и целеви функции

Както бе посочено целта на настоящата работа е да се създаде математичен модел на процеса на мокро смилане на материали в барабанна топкова мелница, който да позволява да се отразяват основните явления, които протичат в нея. Създадения математичен модел може да обслужва проектирането и експлоатацията на машини от този тип.

За целеви функции са приети:

1. Относителна производителност по класа готов продукт – q – количество готова продукция за единица време отнесено към работния обем на барабана. Относителната

производителността характеризира процеса откъм количествената му страна но отчитайки и ефективността на мелницата.

2. Добив на разчетна класа – K (%) – процентно съотношение на готовия продукт в общото количество обработен материал.

3. Енергоразход за единица готов продукт - E - количеството разходвана електроенергия за производство на единица готов продукт.

4.1.4. Избор на управляващи фактори

При избора на управляващи фактори трябва да се имат в предвид някои изисквания [52,54,59, 60,73,74], които определят и до голяма степен техния избор:

- Всеки управляващ фактор трябва да има определена област на значимост (Z_{min}, Z_{max}) , в която да допуска еднозначно количество оценка т.е. да бъде контрулеруем.

- Факторите трябва да бъдат управляеми. Това изискване означава факторите да се установят и поддържат на различни нива в дефиниционната им област.

- Факторите трябва да се измерват с възможно най-висока точност.

- Факторите трябва да бъдат независими – в цялото множество от фактори да няма функционално свързани фактори.

- Съвместимост на факторите – това изискване позволява да се реализират всички комбинации от нива на факторите и техните дефиниционни области, както когато се търси областта на съвместимост.

Броят на набелязаните първоначални управляващи фактори се съкращава съгласно по-горните изисквания, след което се определят и отсяват съществените от несъществените управляващи фактори.

4.1.5. Основни фактори, влияещи върху процеса на смилане при барабанните топкови мелница

Основните фактори влияещи на процеса смилане са центробежната сила действаща на топките, ъгловата скорост на барабана, диаметъра на топките и барабана, относителната скорост на барабана, степента на запълване на барабана с топки, дължината на барабана, натоварването на мелницата с руда, дебелината на облицовките и др.

4.1.6. Структура на математическия модел на процеса смилане на материали в БТМ

С избора на управляващите фактори $q, i = 1, m$ се определя "m" пространствено, с което трябва да се апроксимира регресионната зависимост $\Psi(q)$. Математически тази зависимост [40,75,76] се формира като условно (по отношение на вектора на входните фактори) математическото очакване на целевата функция.

$$\Psi = M \left\{ \frac{Y}{q} \right\} = \Psi(q) \quad (4.7)$$

Най – често апроксимацията се извършва с краен брой суми от непрекъснати функции на входните фактори:

$$\Psi \approx \eta = \sum_{i=1}^k \beta_{ui} \cdot f_i(q) \quad (4.8)$$

където:

$f_i(q)$ - апроксимиращи функции;

k - брой на тези функции;

β_u - неизвестни коефициенти.

Обикновено функциите $f_i(q); (i = 1, 2, \dots, k)$ са непрекъснати функции на q и имат вида:

$$f_i(q) = q_1^{\alpha i 1} \cdot q_2^{\alpha i 2} \dots q_m^{\alpha i m}; i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, m \quad (4.9)$$

4.1.7. Статистически анализ на получените резултати

Статистическия анализ на получените резултати [50,51,53,69,70] може да се направи и обработи по два начина. Единият от които е чрез математично формулирани зависимости, които са доказали адекватността си [41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 61, 62,64]. Друг начин, е чрез използването на компютърни програми, в които е заложена теорията на по-горе споменатата литература. Програми, в които е заложена теоретичната постановка са програмите Regression от Data Analysis на Excel, Sigma Plot и STATGRAFICS.

4.2. Провеждане на пасивен факторен експеримент на барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5х6 работеща в условията на фабрика „Елаците“

В тази глава целта на проведеното изследване е да се опише с математически средства относителната производителност по готов продукт към единица обем на барабана, относителният енергоразход и добивът на разчетна класа на смилания продукт в барабанната топкова мелница. За целта са направени измервания върху мелници тип МТЦ 4,5х6 работещи в условията на “Елаците мед” - АД. Измерванията обхващат периода от 01.01.2004г. до 26.09.2006г. и се отнасят за 4 броя мелници с номера 4, 6, 7 и 8. Измерванията са сравнително ограничени по брой но това е обосновано от факта, че те са правни само при аварийно и планово-ремонтно спиране на мелниците през този период. Като управляващи фактори в изследването са определени следните параметри:

1. Вътрешната дължина на барабана на мелницата $L_{Б,m}$. Дължината е определена посредством измервания с рулетка.

2. Вътрешен диаметър на барабана на мелницата $D_{Б,m}$. Този параметър се определя също посредством измервания с рулетка.

3. Маса на смилещата среда M_T, t . Този параметър се изчислява като работният обем на барабана се умножи по коефициентът на запълване с топки и полученото произведение се умножи по насипното тегло на топките, която зависи от диаметъра им. Коефициентът на запълване с топки се пресмята след направата на измервания (при спряна мелница) на разстоянието от равнината на топките до най високата точка на барабана.

4. Натоварване на мелницата с руда $Q_{ex}, t / h$. Този параметър е измерен посредством електронна везна монтирана на лентовия транспортър захранващ мелницата.

5. Съдържание на класа -15мм в постъпващата руда $K_{-15}, \%$. Този параметър е получен след ситов анализ на постъпващата в мелницата руда в момента на измерването на другите параметри. Това е отношението на количеството на класата - 15 мм към цялото количество на постъпваща руда.

6. Съдържание на шисти в постъпващата руда $K_{ш}, \%$. Този параметър е получен след ръчно разделяне по специална методика на шистите от останалата част на рудата.

От целевите функции са направени измервания на относителната производителност по готов продукт към единица обем на барабана на мелницата $q, t / h m^3$.

Друга изчислена целева функция е относителната енергоразход, $E, kWh / t$, който се получава като отношение на измерената посредством датчици мощност на двигателя на мелницата към производителността на мелницата по готов продукт за единица време.

Третата измерена целева функция е добив на разчетна класа на смляната руда $K, \%$, която се получава след ситов анализ и е отношението на класа + 0,08мм към общото количество смлян продукт за единица време.

Получените, резултати от измерванията са показани в таблици 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4 от дисертационния труд, които след преработка са показани в таблица 4.5.

4.3. Статистическо изследване на резултатите от пасивния експеримент на барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5х6.

4.3.1. Изследване на относителният енергоразход на мелницата.

Първата изследвана целева функция е относителният енергоразход $E, kWh / t$, който се получава като отношение на измерената посредством датчици мощност на двигателя на мелницата към производителността на мелницата по готов продукт за единица време.

4.3.2. Изследване на относителната производителност по готов продукт към единица обем.

Втората изследвана целева функция е относителната производителност на мелницата, която се получава като отношение на производителността на мелницата към обема на барабана и има дименсия $\frac{t}{h \cdot m^3}$.

4.3.3. Изследване на добивът на разчетна класа.

Третата изследвана целева функция е добивът на разчетна класа, което е отношение на количеството смлян продукт с класа -0,08 към общото количество смлян продукт и се измерва в проценти.

Измерените и изчислени входящи параметри и целеви функции са показани на таблица 4.5.

Резултатите от експериментът са обработени статистически с програмите Regression от Data Analysis на Excel и STATGRAPHICS, като са получени 18 модела, като параметрите им са показани в таблица 4.28.

От всички получени модели с най-добри показатели за относителният енергоразход е модел М4.3, за относителната производителност е модел М4.8 и за добивът на разчетна класа е модел М4.16.

Те може да бъдат оценени като модели с голяма адекватност. Коефициентите на множествена корелация R^2 са около 99,7%, а коригираните коефициенти на множествена корелация $R^2(adj)$ са над 99%. Тези модели имат най-добри показатели на оценка спрямо всички останали. Стойността на показателите на доверителна вероятност (**Р-фактор=0**) за моделите са под критичната **0,05**, т.е. може да се приеме, че моделите са адекватни с доверителна вероятност над 99%. Аналитично трите модела могат да се представят по следният начин:

1. За относителният енергоразход:

$$E = 0,146218 \cdot D_B \cdot D_B \cdot L_B + 0,0424305 \cdot M_T - 0,0611135 \cdot Q, kWh / t$$

2. За относителната производителност:

$$q = -3,27 \cdot 10^{-2} D_B \cdot D_B \cdot L_B + 2,124 \cdot 10^{-2} \cdot M_T + 6,74 \cdot 10^{-3} \cdot Q, \frac{t}{h \cdot m^3}$$

3. За добивът на разчетна класа:

$$k_{0,08} = 9,08 \cdot 10^{-2} \cdot Q + 0,124 \cdot (k_{15} - k_{ш}) + 0,247 \cdot M_T, \%$$

4.3.4. Изводи

4.3.4.1. Получените резултати от измерванията и статистическия анализ на относителния енергоразход на мелницата показват следното:

- относителният енергоразход се влияе в най - голяма степен от четири параметъра, а именно от вътрешният диаметър на барабана, вътрешната дължина на барабана на мелницата, масата на топките и натоварването на мелницата с руда;

- при увеличаване на вътрешният диаметър и дължина на барабана на мелницата се повишава и относителният енергоразход на мелницата,

което най-вероятно се дължи на това, че при по голям вътрешен обем на мелницата се увеличава относителната скорост на барабана. Това повишава мощността за издигане на топките и за предаване на кинетична енергия на топките;

- при повишаване на натоварването на мелницата с руда се намалява относителният енергоразход , което вероятно се дължи на това, че масата на рудата практически не влияе на мощността на мелницата от една страна, а от друга постъпването на повече руда води и до получаването на повече смлян продукт (по висока относителна производителност);

- при увеличаване на масата на топките на мелницата се повишава и относителният енергоразход на мелницата защото най-много енергия се черпи за издигането им и за предаване на кинетична енергия на смилащите тела.

4.3.4.2. Получените резултати от измерванията и статистическия анализ на относителната производителност по готов продукт към единица обем на мелницата показват следното:

— относителната производителност по преработена руда към единица обем на

Таблица 4.5. Резултати от измерванията и изчисленията

№	D_B, m	L_B, m	M_T, t	$Q, t / h$	$K_{-15}, \%$	$k_{III}, \%$	$E, kWh / t$	$q, t / hm^3$	$K_{-0,08}, \%$
1.	4,08	6,26	151,1	146	88,9	19,2	13,66	1,08	61,8
2.	4,23	6,23	136,2	155	86,6	15,1	12,13	0,974	56,1
3.	4,25	6,23	134,6	147	89,2	19,1	13,54	0,888	54,5
4.	4,27	6,25	129,8	145	92,8	15,9	12,76	0,847	53,3
5.	4,27	6,27	148,1	154	91,3	36,6	13,18	0,948	52,7
6.	4,19	6,16	146,3	145	91,4	32,5	13,1	1,003	58,3
7.	4,3	6,2	115,2	142	87,2	29	13,03	0,855	54,6
8.	4,07	6,2	143,4	136	87,6	11,3	14,19	0,994	60
9.	4,1	6,25	131,7	132	84,2	25,5	14,39	0,906	56
10.	4,12	6,15	134,8	138	89	29,8	14,2	0,957	57,3
11.	4,2	6,2	148,7	152	89,5	30,1	13,15	1,032	59,7
12.	4,2	6,2	146,2	142	89,1	29,4	14,08	0,977	59,6
13.	4,24	6,18	141,6	145	89,4	39,9	13,93	0,968	57,9
14.	4,25	6,24	160,9	145	88,5	15,2	14,07	0,992	61,6
15.	4,27	6,27	162,2	150	76,2	19,9	14,33	0,978	59,7
16.	4,14	6,18	145,7	138	89	29,8	14,64	0,94	58,3
17.	4,2	6,2	158,7	150	92,7	27,4	13,6	0,964	57,7
18.	4,23	6,25	155,7	147	93	35,5	14,01	0,938	57,4
19.	4,25	6,27	147	147	89,4	24,6	13,74	0,963	57,9
20.	4,27	6,22	149,5	148	92,4	45,7	13,72	0,912	56,4
21.	4,14	6,21	174,4	140	87	18,8	14,14	1,046	63,4
22.	4,18	6,28	165,5	138	85,8	41,6	14,93	0,934	60,2
23.	4,22	6,31	156,9	144	87,1	20,2	14,24	0,897	60,9
24.	4,22	6,31	162	130	93,2	32,6	15,85	0,806	60
25.	4,22	6,33	148,5	154	92,3	25	13,31	0,99	58
26.	4,23	6,35	154,3	155	92,3	28,5	13,55	0,927	57,4
27.	4,32	6,22	139	160	87,2	35,4	11,94	0,949	55,4
28.	4,11	6,15	127,4	135	79,8	22	13,63	0,888	54,5
29.	4,18	6,22	137,6	133	92,2	24,8	14,44	0,842	54
30.	4,25	6,3	147,1	141	92,1	15,75	13,47	0,938	60,3
31.	4,18	6,16	144,9	153	91	27,8	12,87	0,948	53,5
32.	4,24	6,14	161,9	154	91	19	13,64	1,001	61,1
33.	4,25	6,15	166,1	155	92	21,6	13,55	1,035	60,9
34.	4,26	6,2	166,5	152	89	24,7	13,82	0,902	60,1
35.	4,1	6,2	147,7	155	91,6	33,7	12,24	1,052	56,7
36.	4,12	6,24	149,1	160	85	41,7	12,06	1,083	57,7
37.	4,23	6,32	158,7	155	89	25,9	12,9	1,003	59,6
38.	4,27	6,22	149,5	148	92	45,7	13,71	0,912	56,4
39.	4,3	6,24	155,7	144	92	45,7	13,89	0,871	57,4
40.	4,3	6,25	150,8	144	92	38,5	14,02	0,855	56,4
41.	4,3	6,25	147	123	89	47,9	14,5	0,728	55,7
42.	4,21	6,28	143,3	165	92	25,8	11,75	0,989	53,4
43.	4,24	6,29	151,8	143	90	35,4	13,7	0,878	56,4
44.	4,24	6,33	160,5	155	89	27,6	12,9	0,907	59,3
45.	4,25	6,15	157,4	157	90	33	13,06	0,941	58,4

Таблица 4.28

Модел	Const.	D_B	L_B	M_T	k_{-15}	Q	k_{III}	$D_B^2 \bullet L_B$	$k_{-15} - k_{III}$	k_{-15}^2	k_{III}^2	ν	$R^2 \%$	$R^2_{(adj)} \%$	F критерий	Значимост на F
M4.1	19,757	0,014	0,031	-0,001	-0,082	-0,0006	-0,002					44	80,6	78,1	32,42	6,71E-13
M4.2	19,388			0,032		-0,098		0,034				44	87,5	86,6	95,71	1,48E-18
M4.3				0,042		-0,061		0,146				44	99,7	99,7	5444,34	0
M4.4	19,686			0,031		-0,081		0,011				44	80,6	79,1	56,82	0
M4.5	19,758	3,960	-0,620	-0,198	0,0014	-0,0016	0,0053					44	74,6	70,6	18,595	5,97E-10
M4.6	19,758			-0,198		-0,0016		3,959				44	73,2	71,2	18,595	5,97E-10
M4.7	1,3515			0,0014		0,005		-0,012				44	73,2	71,3	37,37	0
M4.8				0,0021		0,0067		-0,003				44	99,6	99,6	4167,97	0
M4.9		-0,023		0,0015		0,0055						44	99,6	99,6	3718,8	0
M4.10	2,938	-0,702		0,0012		0,0054						44	71,2	69,2	33,94	0
M4.11	86,96	-4,874	-2,866	0,1738	-0,080	-0,052	-0,071					44	67,2	61,9	12,947	6,48E-08
M4.12	86,96			0,1738		-0,051			-0,08			44	77,6	60,2	20,677	2,56E-08
M4.13	51,87			0,1705	-0,0978	-0,058	-0,079					44	65,2	61,8	18,82	0
M4.14				0,2077	0,3002	0,0164	-0,088					44	99,8	99,8	6738,35	0
M4.15	38,49			0,1660		-0,066			0,068			44	60,2	57,3	20,68	0
M4.16				0,2466		0,0907			0,124			44	99,8	99,8	7566,7	0
M4.17				0,2117	0,3209		-0,0899					44	99,8	99,8	9164,16	0
M4.18				0,2876						0,002	-0,001	44	99,8	99,7	6134,52	0

мелницата се влияе в голяма степен от четири параметъра, а именно от вътрешният диаметър и дължина на мелницата, натоварването на машината с руда и количеството на смилащите тела;

- повишаването на натоварването на мелницата с руда води до нарастване на относителната производителност на машината вероятно поради фактът, че в барабана има повече руда на единица обем;

- повишаването на количеството топки води до нарастването на относителната производителност, което вероятно се дължи на фактът, че се повишава вероятността всяка частица да има повече контакти със смилащата среда;

- увеличаването на износването на облицовките на мелницата което увеличава вътрешният диаметър и дължина на барабана води до намаляване на относителната производителност на машината защото увеличава обема на барабана на мелницата.

4.3.4.3. Получените резултати от измерванията и статистическия анализ на добивът на разчетна класа показват следното:

- добивът на разчетна класа се влияе от четири фактора: масата на смилащата среда, натоварването на мелницата, съдържание на класа ситен продукт на входа на мелницата и съдържание на шисти в постъпващата руда;

- при повишаване количеството на топките в изследваните граници повишава добивът на разчетна класа вероятно поради това, че се увеличават ефективните удари;

- намаляването на едрината на постъпващата руда води до подобряване на добивът на разчетна класа вероятно защото се намалява степента на смилане;

- повишаване съдържанието на шисти влошава добивът на разчетна класа на продуктът излизащ от мелницата вероятно поради фактът, че шистите са много трудно смилаеми и трудно достигат разчетната класа;

- повишаването на натоварването на мелницата с руда води до подобряване на добивът на разчетна класа вероятно поради увеличаване на ефективните удари.

ГЛАВА V. Линеен структурен деформационно-напреженов FE анализ на CAD-CAE модел на мелница тип МТЦ 4,5х6

В тази глава са изложени резултатите от проведения структурен анализ на барабанна топкова мелница и на специфичен конструктивен възел (вал зъбно колело – зъбен венец) на мелницата. Показана е възможността чрез симулационно компютърно изследване на 3D-CAD модел и CAE-анализ да се получат стойностите и разпределението на деформациите и напреженията върху модела.

Програмната реализация е на три димензионната параметрична CAD-CAE система **SolidWorks-COSMOSWorks**. Обект на изследването е барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5х6, каквито са мелниците от обогатителната фабрика на „Елаците мед” - АД.

5.1. Особенности на обекта на изследване

Обектът на изследване е барабанна топкова мелница работеща в условията на фабрика „Елаците”. Периферната задвижваща сила се създава и предава към зъбният венец от синхронен двигател през вал-зъбно колело. Работният орган е барабана на

мелницата на който действа както силата на тежестта на барабана, на зъбният венец и смилящата среда, така и центробежната сила породена от движението на топките разположени в барабана. Действието на тези сили поражда реакции в лагерите на мелницата.

5.2. Структурни елементи и системи

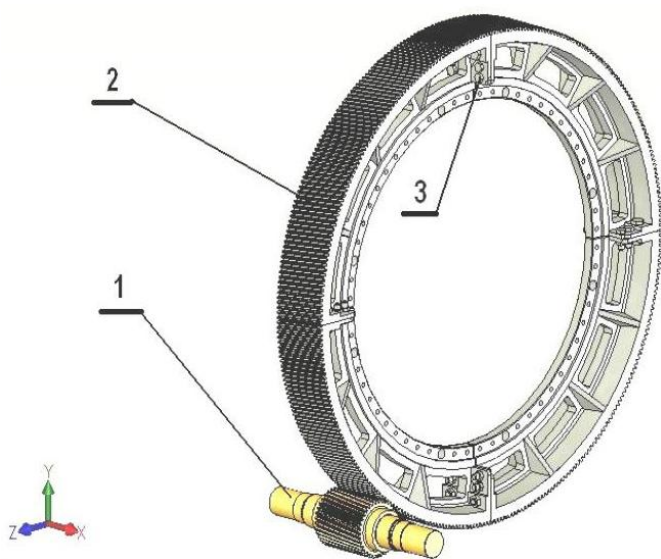
Задвижването на мелничния барабан се осъществява чрез синхронен двигател с мощност 2500kW, който посредством съединител задвижва водещия вал 1 зацепен с водимият зъбен венец 2 (фиг.5.1), който предава движението на барабанныя мелничен корпус и е съставен от 4 сектора, от които е сглобен венецът чрез специални болтови съединения. Тази съставна конструкция се определя от технологични предпоставки, свързани с изработването на венеца, който е с големи габаритни размери. Главен недостатък на такова техническо решение е намалената коравина на зъбите над конзолния праг поради намаленото от въздушната междина.

Барабанът е заварена стоманена конструкция, която се отличава с малък брой на елементите, тежка технология за изработване поради големите си габарити и маса. Барабанът се облицова със стоманени плочи (брони), които го предпазват от износване.

Челната стена задвижваща (предно дъно) се захваща фланцово към барабана на мелницата и зъбният венец. Тя също има отвори посредством които се монтират облицовъчните плочи (брони-шарани).

Челната стена захранваща (задно дъно) се захваща фланцово към барабана на мелницата. Тя също има отвори посредством които се монтират облицовъчните плочи 1 (брони-шарани). Част от нея е захранващата тръба 2, която служи за по-лесно постъпване на рудата в барабана на мелницата.

Лагерите са плъзгачи, самонагаждащи се с бабитна заливка върху долната част на опорната чаша. Самонагаждането се осъществява чрез сферична опорна повърхнина между черупката и тялото на лагера.



Фигура 5.1. Задвижване на мелницата

5.3. Цел на компютърното изследване

Крайна цел на това изследване е чрез инструментите на компютърното приложение на метода на крайните елементи (МКЕ) да се получи разпределението на деформациите и механичните напрежения във всички точки от обекта и чрез подходящ анализ, да се направят важни изводи относно възможностите за практическо подобряване на техникоексплоатационните параметри на БТМ системите от този тип.

5.4. Същност и особености на методиката за провеждане на симулационното компютърно изследване.

Схематично съдържанието на разглежданата методика може да бъде представено така:

- Избор на обект и създаване на тримерен CAD-модел;
- Експертно и аналитично определяне на екстремалните параметри на механично натоварване за различни работни режими и варианти на схемите на задвижване;
- Избор на програмната система за CAE – анализ, коректно дефиниране на граничните условия (степените на свобода) и натоварването и получаване на графичните и числени резултати;
- Анализ на резултатите с оглед на разпределението на екстремните стойности на напреженията, коефициента на сигурност (FOS), геометрията и топологията на детайлите, физикомеханичните параметри на използваните материали, параметрите на работните режими и др.

5.5. Компютърно моделиране на триизмерен CAD-модел на барабанна мелница тип МТЦ 4,5х6

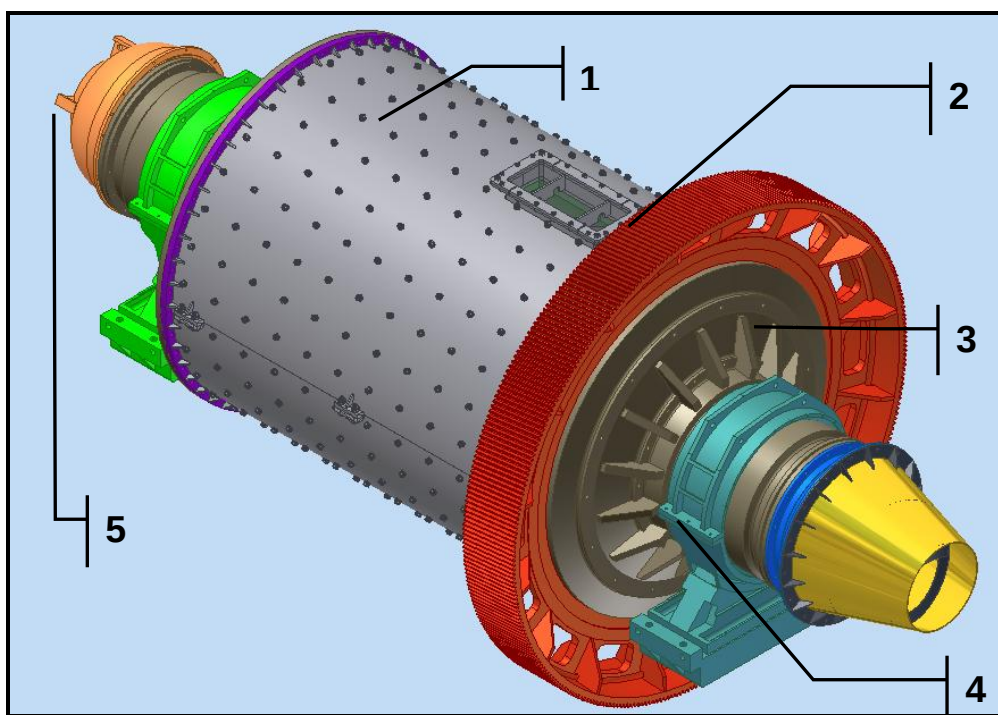
Тази задача е изпълнена като на базата на действителните геометрични и физикомеханични параметри на действителния обект се създаде тримерен компютърен модел в CAD формат. За целта са използвани инструментите на CAD програмата за 3D моделиране Solid Works [72]. Създаден е моделът на сглобената единица, който съдържа всички детайли, свързани помежду си в съответствие с технологията на изработване чрез разглобяеми или неразглобяеми съединения – пресови или такива със стягащи пръстени по нормите на DIN 7012.

На фиг. 5.10 е показан CAD моделът на сглобената единица „барабанна мелница“, който е изграден на базата на 3D моделите на детайли, създадени в същата програмна среда на SolidWorks както следва:

5.6. Гранични условия, механично натоварване и работни режими за провеждане на структурния МКЕ анализ

При уточняване на граничните условия, които се определят от особеностите на работните режими, формирането на периферната сила и разпределението на натоварването в барабана на мелницата, бяха взети под внимание следните аналитични и конструктивни предпоставки:

1. Двигателният въртящ момент се формира от двигател с обща мощност 2500 kW;
2. Прецизно параметриране на геометричните модели по форма, метрика и физикомеханични константи на материала.
3. Определяне на условията на силово натоварване по големина и разпределение.
4. Дефиниране на ограниченията на степените на свобода чрез пълно фиксиране или ограничаване на една, две или три степени на подвижност при изследването на зъбната двойка и на барабана.
5. Прецизиране на силовото натоварване върху контактната повърхност на зъбните двойки, като е отчетено разпределението на тази контактна сила ($P=477\text{kN}$) върху повече от един зъб, така както е при зъбни предавки с наклонени зъби.



Фигура 5.10. Модел на мелница МТЦ 4,5х6

1 - барабан; 2 – зъбен венец; 3 – челна стена задвижна; 4 – лагер преден; 5 - захранвач

6. Уточняване на видовете и броя на симулационните студии както следва:

- линеен структурен анализ на обектите на изследване с цел определяне на големината и разпределението на еквивалентните напрежения (по von Mises), а при необходимост и на коефициента на експлоатационна сигурност (FOS);

- честотен анализ на същите обекти и определяне на собствените (резонансни) честоти и форми с оглед тълкуване на опасността от възникване на резонансни явления при определени режими на работа.

7. Оптимизиране на обектите с цел намаляване до приемливи граници на изчислителните операции, в съответствие с възможностите и производителността на използваните микропроцесорни изчислителни машини.

5.7. Резултати от пресмятането на основните технологични и силови параметри на барабанна топкова мелница МТЦ 4,5х6

За да може да бъде направено симулационно изследване на барабана и на зъбната двойка на мелницата е необходимо да се определят посоката и големината на силите действащи върху възлите на мелницата. Пресмятанията са направени съгласно [68] и са представени в дисертационния труд

5.8. Граничните условия и натоварване на CAE-модела в програмната среда на COSMOS Works.

1. При изследване на барабана на мелницата:

- Двете лагерни опори са изпълнени с плъзгащи сферични лагери и те могат най-точно да бъдат зададени с програмните инструменти като контакт по сферична повърхност с нулева степен на свобода в радиално направление и свободно въртене по

две от осите на координатната система. Това отразява напълно степените на подвижност на самонагаждащите се лагери;

- Натоварването от топките се задава като вертикална разпределена сила с направление перпендикулярно на хоризонталната TOP (X,Z) равнина чрез инструмента „**Apply force**”.

- Силата на тежестта на корпусния барабан е вътрешна, по характер на проявление - обемна и има приложна точка в масовия му център. Както големината, така и приложната точка се определят автоматично от програмата .

- Механичното натоварване от разпределените центробежни сили породени от движението на топките върху повърхността на барабана ще се параметрира чрез тяхната дискретизация върху повърхността на контакт между смилащата среда и барабана. Тези сили са изчислени аналитично. В програмната среда на COSMOS Works това става отново с „**Apply force**”.

2. При изследване на зъбната предавка на мелницата:

- Водещ вал е този елемент от предавателния механизъм, който е изработен от прокатна въглеродна стомана и предава едностранно чрез шийката (FIX) двигателния въртящ момент ($M_{дв} = 160 \text{ KNm}$);

- Лагерните опори са разположени върху повърхностите 1 на съответните цилиндрични шийки и ограничават преместването в радиално и аксиално направление;

- Натоварването на зъбите от приложената върху контактната повърхност, разпределена сила F_n е показано на същата фигура. Тъй като моделирането на вал с 35 зъба ще увеличи неприемливо броя на крайните елементи при дискретизацията, то бе прието да се работи с модел, който има зъбонарязване в малка област (5 зъба);

- С цел прецизиране на резултата от студията за определяне картината на деформациите и напреженията при зъбите на вала, е извършено второ изследване на друг модел, който представя само зъбонарязаната част от вала.

5.9. Дефиниране на резултатите от CAE-изследването

Анализът на резултатите е извършен в следните две направления:

- Относно напреженията, резултатите са изведени чрез еквивалентното напрежение съгласно von Mises [72], което се изразяват чрез трите главни напрежения по формулата:

$$\sigma_{von} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (5.20)$$

където: σ_{von} е еквивалентното напрежение(stress) по von Mises, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – първо, второ и трето главни напрежения.

- Относно фактора на сигурност (**Factor of safety**) (**FOS**), този критерий се базира на теорията на Mises – Henky, според, която **FOS** представлява отношение между големината на допустимото напрежение съответстващо на границата на еластичност - σ_{limit} и тази на еквивалентното напрежение σ_{von} по von Mises ($\sigma_{limit} \geq \sigma_{von}$). От това следва:

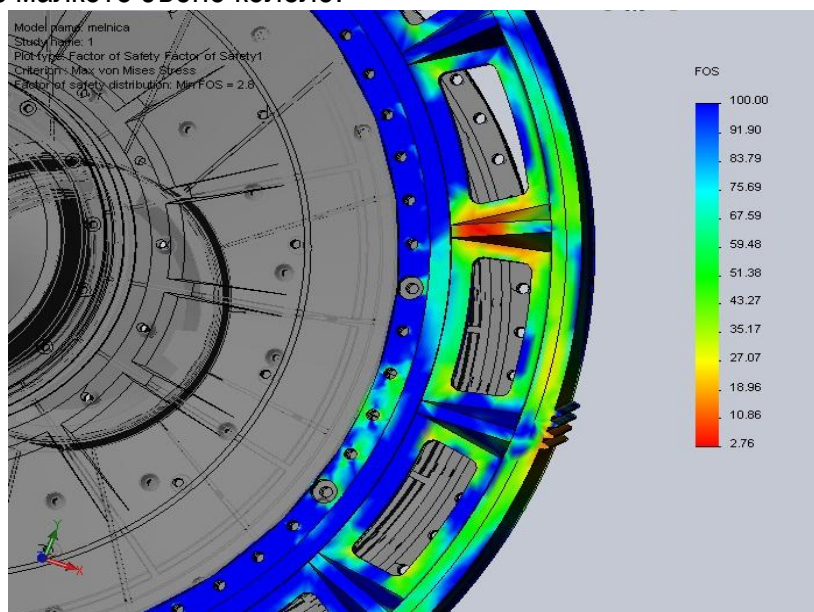
$$FOS = \frac{\sigma_{limit}}{\sigma_{von}} \geq 1 \quad (5.21)$$

5.10. Резултати и анализ от проведения структурен линеен анализ на мелницата.

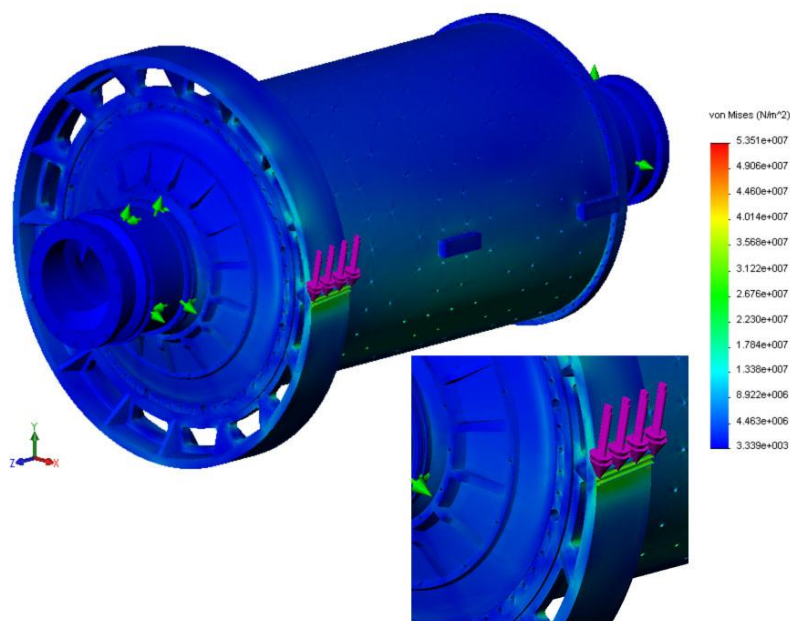
Методът на крайните елементи (FEA анализ) представлява числен метод за оценка на инженерните решения. За целта изработеният тримерен модел се разделя на малки части от прости по форма елементи, свързани помежду си с общи точки (възли). Методът определя поведението на модела като комбинира информацията, получена от всички образуващи елементи.

Замрежването (дискретизацията) на модела е една от най-важните стъпки от изследването. Големият брой елементи предполага по-висока точност на резултатите, но също така увеличава продължителността на изчислителния процес.

От фигурите и диаграмите на напреженията става ясно, че максималната стойност от 54 MPa се намира в основата на зъбите, участващи в зацепването на зъбният венец с малкото зъбно колело.



Фиг. 5.16 Разпределение на фактора на сигурност в зъбния венец



Фигура 5.17. Разпределение на еквивалентни напрежения в барабана и в зъбите на венета

По-големи концентрации на напрежение (около 35 MPa) се забелязват по спиците на зъбният венец и отворите на фланеца.

На фиг. 5.19 се забелязва зона в корпуса на барабана, разположена от страната на зъбният венец. Наблюдава се сложно напрегнато състояние, породено от едновременното действие на центробежните сили, породени от масата на топките на мелницата и усукващият момент, предаван на барабана от зъбният венец. Възникващите напрежения са от порядъка на 35 – 40 MPa.

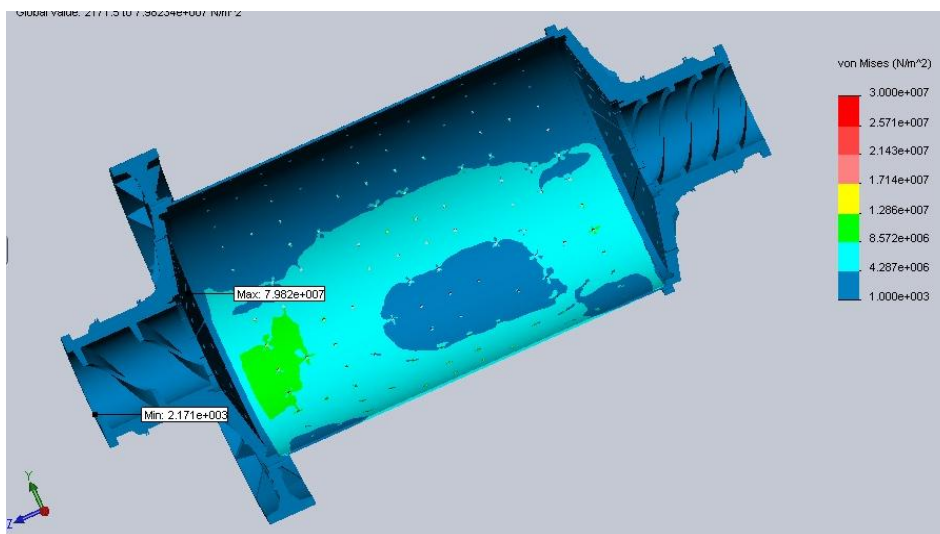
Локални концентрации се забелязват и в зоната на контакт между дъната и барабана.

Съгласно описаната по-горе методиката за моделиране и симулационно изследване, са показаните от фиг. 5.13, 5.14 и от 5.20 до фиг. 5.28 обекти. В първата част са представени резултатите от извършения линеен структурен анализ на деформационно напреженовото състояние, а във втората - на собствените трептения на задвижващия вал и зъбни сегменти с 5 зъба от зоната A1, която е с най-неблагоприятно натоварване на зъбите в тези области на венеца.

Най-голямата σ_{von} от тази студия е $\sigma_{von} = 47\text{MPa}$ и локализирано в края на един от зъбите. Анализът на увеличеният частичен изглед от фиг. 5.14 показва, че това максимално напрежение е получено за област със силно деформирана мрежа на крайните елементи. Това може да се обясни като отклонение в работата на изчислителният модул, поради влошените параметри на дискретизация в тази част на модела.

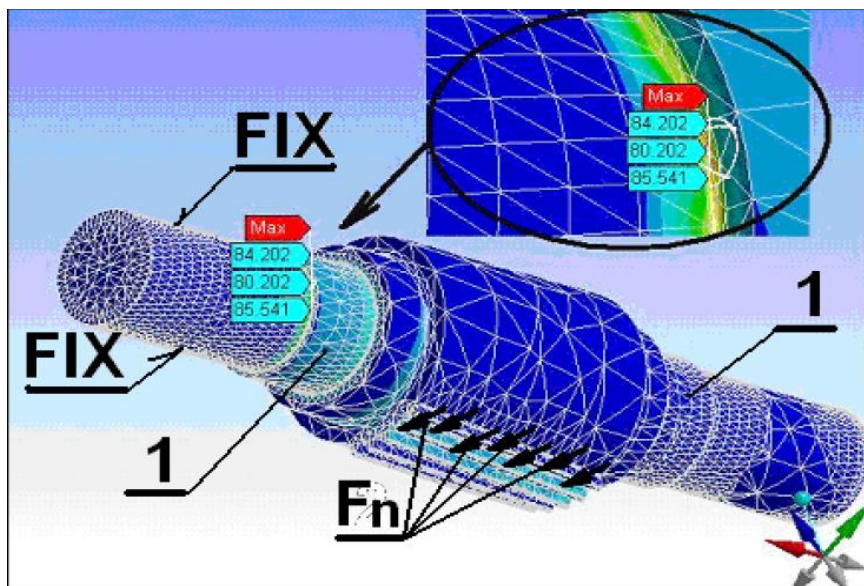
5.11. Резултати и анализ от проведения структурен линеен анализ на зъбната двойка на мелницата.

На фигура 5.13 максималните напрежения достигат (85-87 MPa) но само за концентратора на напрежение, който се е получил в основата на стъпалото в две от шийките на вала. Това са шийки които предават двигателния въртящ момент. За всички останали области напреженията не надвишават (10-15 MPa) или коефициентът на сигурност $FOS > 10$.



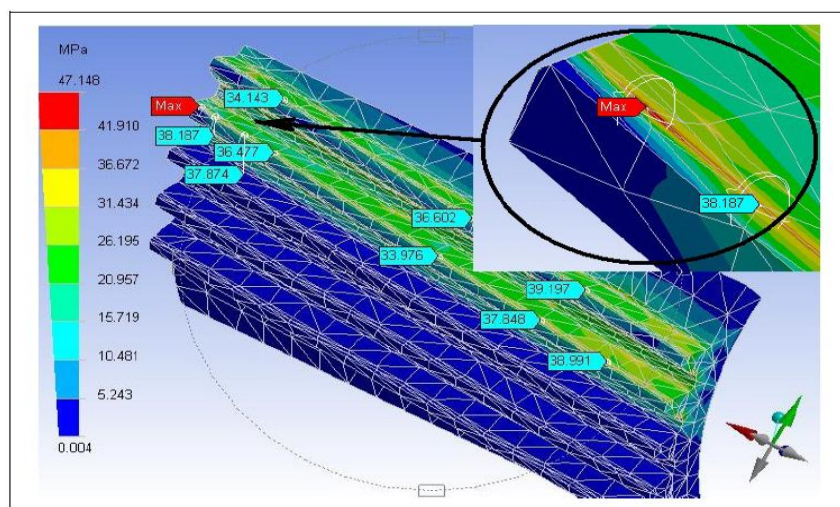
Фигура 5.19. Разпределение на еквивалентни напрежения в барабана

Вече бяха разгледани особеностите на конструкцията и обосновано очакваното не благоприятно натоварване на зъбите, които са разположени в областите на свързване на съседните сегменти на зъбният венец.

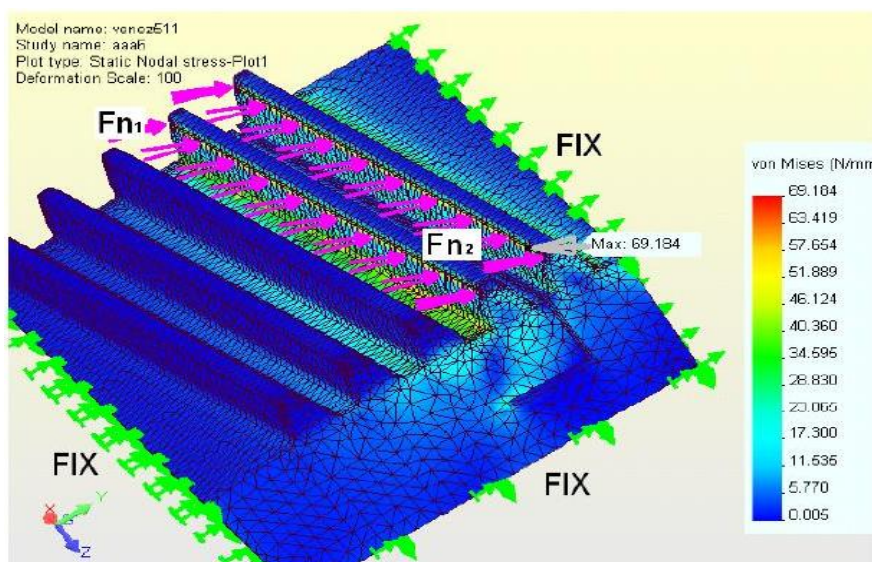


Фигура 5.13 Разпределение на силите действащи на натоварения зъб и ограничения на степените на свобода в CEA модела.

По тази причина всички опити съгласно методиката на изследване, са насочени към многовариантно изпитване на опростен представителен модел. Такъв е геометричният модел от фиг. 5.20 до фиг. 5.23, който представя част от венеца с 5 зъба от зоната с Г-образно подрязване на основния пръстен. Фигура 5.21. показва картината на разпределение на напреженията при работа (натоварване) на двата подрязани зъба, а на фиг. 5.22 е локализирана зоната на максимално напрежение: $\sigma_{\text{von}}^{\text{max}} = 71,5 \text{ MPa}$. И в този случай това е област от края на зъба, където се променя геометрията на модела и качеството на дискретизация.



Фигура 5.14.Еквивалентни напрежения върху зъбонарязаната част на вала



Фигура 5.20. Еквивалентно напрежение получено за област със силно деформирана мрежа на крайните елементи

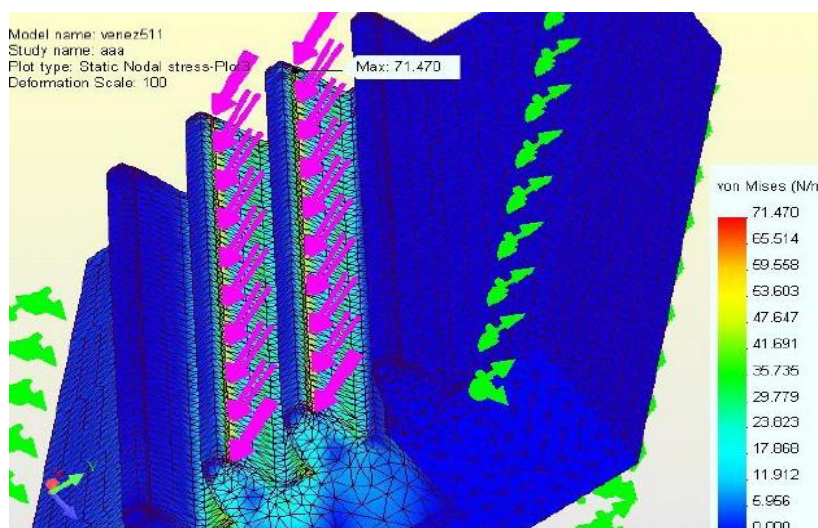
От разгледаните варианти на натоварване на венеца могат да се направят следните изводи:

1. Долната граница на коефициента на сигурност в областите с най-големи еквивалентни напрежения на слиза под 2, т.е. $FOS > 2$ и то за контактните повърхности на зацепване между зъбните двойки на венеца и вала.

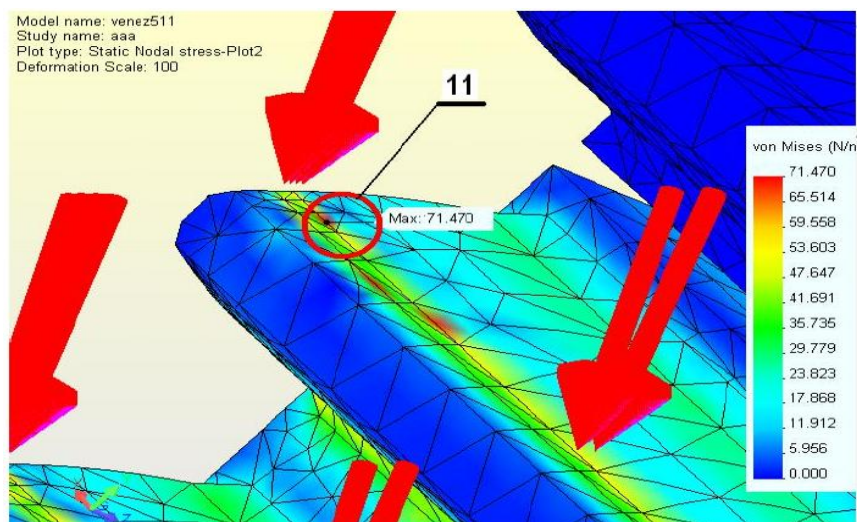
2. В областта AA (фиг. 5.23) за случай на натоварване, както и при фиг. 5.21 ще настъпват периодични деформации на подрязаната част от основата на зъба. По абсолютна стойност огъването не надвишава $\delta = 15 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$, а еквивалентното напрежение - $\sigma_{\text{von}} = 17 \text{ MPa}$.

3. Всички резултати от фиг. 5.20 до фиг. 5.23 показват, че еквивалентните напрежения извън зъбонарязаната част на венеца са $\sigma_{\text{von}} < 6 \text{ MPa}$ и $FOS > 25$.

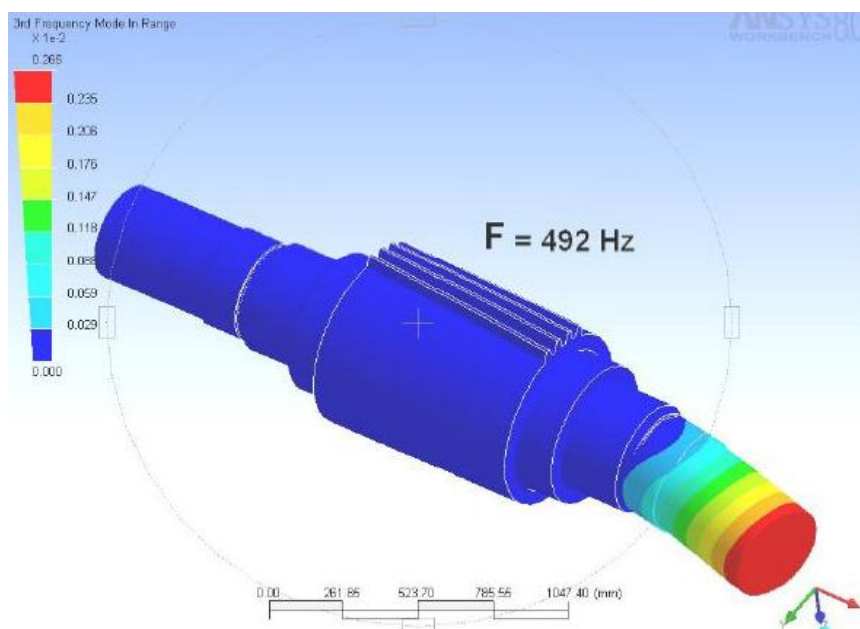
Посредством някои специализирани инженерни приложения на МКЕ за честотен анализ на механични обекти, тук са определени собствените честоти и форми на двата елемента (вал и венец).



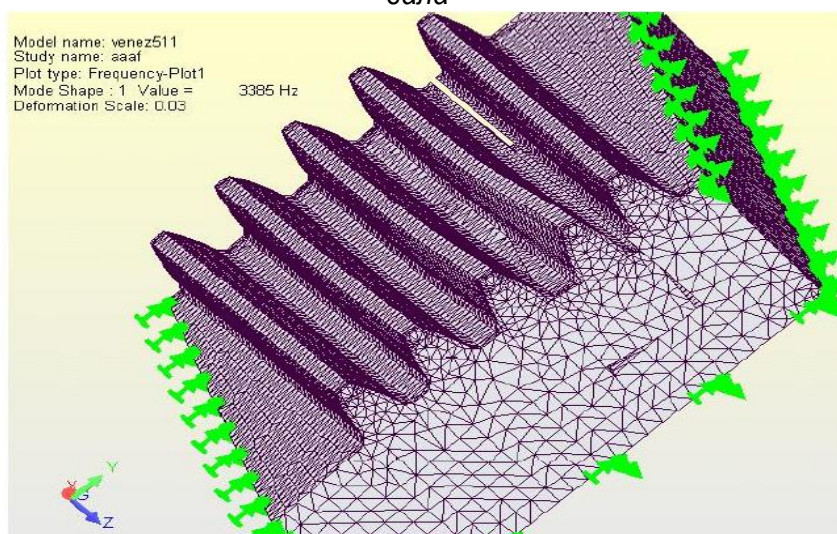
Фигура 5.21. Разпределение на еквивалентни напрежения при работа на двата подрязани зъба



Фигура 5.22. Локализирана зона на максимално напрежение



Фигура 5.24. Деформации при трета хармонична честота на свободната крайна шийка на вала



Фигура 5.26. Деформации при $f_1 = 3385$ Hz

Резултатите от честотния анализ на вала визуализирани за III хармонична ($f_3 = 492 \text{ Hz}$) на фиг. 5.24. Честотното изследване на зъбния венец са представени като деформации на фиг. 5.26,. При $f_1 = 3385 \text{ Hz}$ е характерно, че собствените трептения се проявяват в най-голяма степен при зъбите около подрязания конзолен участък в зоната на свързване на съседните сегменти от венеца. Друга особеност е появата на сложни по форма деформационни вълни при нарастване на честотата на собствените трептения.

5.12. Изводи

5.12.1. Относно резултатите от симулационния анализ на барабана на мелницата:

1. От фигурите и диаграмите на напреженията става ясно, че максималната стойност от 54 MPa се намира в основата на зъбите, участващи в зацепването на зъбният венец с малкото зъбно колело.

2. По-големи концентрации на напрежение (около 35 MPa) се забелязват по спиците на зъбният венец и отворите на фланеца, посредством който е монтиран към барабана на мелницата.

3. На фиг. 5.19 се забелязва зона в корпуса на барабана, разположена от страната на зъбният венец. Наблюдава се сложно напрегнато състояние, породено от едновременното действие на центробежните сили, породени от масата на топките на мелницата и усукващия момент, предаван на барабана от зъбният венец. Възникващите напрежения са от порядъка на 10 MPa .

4. Локални концентрации на напрежения се забелязват и в зоната на контакт между дъната и барабана.

5. Анализът на резултатите от извършения линеен статичен анализ показва, че най-големите стойности на напреженията и деформациите не надхвърлят допустимите за конкретния случай на натоварване. Това води до извода, че мелницата спокойно може да бъде натоварена допълнително с топов товар, ако е необходимо да бъде оптимизиран технологичният и режим.

5.12.2. Относно резултатите от симулационния анализ на зъбната предавка на мелницата:

1. Анализът на резултатите от извършения линеен структурен анализ показва, че най-големите стойности на деформациите и напреженията са локализирани в две области – контактните повърхнини при съвместна работа на зъбните двойки и концентраторите на напрежение в преходите (стъпалата) между различните повърхнини. За вала това е силно изразено (виж фиг. 5.13) в стъпалото между задвижващата и опорната лагерни шийки. В съчетание с периодичното знакопроменливо натоварване при въртене, в тази зона може да настъпи умора на материала и разрушаване. Експлоатационната практика потвърждава направения извод.

2. В областите на свързване на зъбните сектори от венеца настъпват радиални периодични деформации на конзолните прагове с честота $f_1 = 0.26 \text{ Hz}$ и $f_2 = 3385 \text{ Hz}$ и амплитуда $\delta = 15 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$. Въпреки малката амплитуда, тези участъци от зъбния венец при такава конструкция създават условия за намалена уморна якост на материала и ускорено износване на зъбния профил на венеца и вала. По тази причина се счита, че е

необходимо да се извърши реконструкция на зъбния венец в областите на свързване между отделните сектори.

3. Използваният изследователски метод за статично моделно симулационно изследване на зъбния предавателен механизъм на топковите барабанни мелници МТЦ 4,5х6 позволява чрез компютърното инженерно приложение на МКЕ да се получи деформационно-напреженовата картина на голямо-габаритен и тежко натоварен механизъм. В минната практика тази възможност има голямо значение, тъй-като прогнозните резултати са предпоставка за научно-изследователска работа в следните направления:

- детайлно аналитично изследване за различни частни случаи на натоварване при стационарни и преходни работни режими;
- експериментално изследване в промишлени условия;
- подобряване на техническо-експлоатационните параметри на барабанните мелниците от този тип.

ГЛАВА VI. Създаване модел на лабораторен образец.

6.1 Създаване на критерии на подобие на барабанна топкова мелница

За разширяване сферата на значимост за провежданото експериментално изследване на работния процес на барабанна топкова мелница, се налага да се определят подходящи критерии за подобие и критериални уравнения на регресия. С прилагането на критерии за подобие и експерименталното определяне на уравнения на регресия в критериален вид, може да се създадат условия за пренасяне на тези резултати за проектирането на серия барабанни топкови мелници, като се изисква техните процеси да са подобни.

6.1.1 Теоретична постановка

В теорията за подобие [46,77,78] като основно понятие се използва “явление”, което се разглежда като комплекс от процеси, които се описват чрез уравнения, свързващи параметрите на процеса и параметрите на разглежданата система. В случая се разглежда връзката между трите целеви параметъра – производителност, качество и относителен енергоразход и седемте основни параметри на мелницата съгласно системата.

6.1.2. Определяне на критериите за подобие за процеса на смилане на руди с барабанна топкова мелница

Конкретните критерии на подобие, които се получават като се имат предвид изискванията на теоремата на подобие. За целта трябва:

1. Оpozнаване и записване на факторите (6.3,6.4,6.5)определящи процеса:
 $P_1, P_2, \dots, P_i, P_j, P_{j+1}, \dots, P_m$
2. Съставяне на матрица на размерностите (6.6) на тези “ m ” параметри.
3. Приемане на $k = 3$ независими (6.18,6.19,6.20) помежду си фактори.
4. Определяне на критериите (6.21).
5. Съставяне на общия вид на критериални уравнения (6.22, 6.23, 6.24, 6.25, 6.26, 6.27, 6.28).

6.1.3 Определяне на коефициенти на подобие за барабанна топкова мелница и параметрите на модела

Едновременно с разпространението на опитните данни и разработените зависимости за други типоразмери машини е необходимо също така да се отчитат законите на подобие. При моделирането на барабанни топкови мелници трябва да се спазва не само геометричното, но и физическото подобие между модела и действителния образец. Л. С. Ейгенсон [46] счита за подобни такива физични явления, ако те протичат в геометрично подобни системи и при това полето на всички едноименни физични параметри участващи в явленията са съответно подобни.

Мащабните коефициенти се определят в резултат от анализ на критериите на подобие (безразмерни комплексни, имащи едно и съща стойност при подобни явления).

Процесите на смилане в барабанни топкови мелници ще бъдат подобни при следните условия: геометрично подобие на модела и действителната мелница, геометрично подобие на изходните материали за модела и действителната машина, равенство на критериални съотношения:

$$(\varphi)_H = (\varphi)_M, (\psi)_H = (\psi)_M, (k_{ш})_H = (k_{ш})_M, (k_{ВХ})_H = (k_{ВХ})_M, \\ \left(\frac{E \cdot M_T^2}{Q} \right)_H = \left(\frac{E \cdot M_T^2}{Q} \right)_M, \left(\frac{q \cdot M_T}{V_B} \right)_H = \left(\frac{q \cdot M_T}{V_B} \right)_M, (k)_H = (k)_M.$$

Избираме коефициентът на геометрично подобие да бъде 10, като за модела са получени следните параметри:

1. Диаметърът на модела $D_M = 0,45m$.
2. Дължината на модела на мелницата $L_M = 0,6m$.
3. Диаметъра на топките на модела $d_{TM} = 0,01m$.
4. Ъгловата скорост на модела $\omega_M = 5,497rad / s$.
5. Масата на топките на модела на мелницата $M_{TM} = 179kg$.
6. Натоварването с материал на модела $Q_M = 140kg / h$.

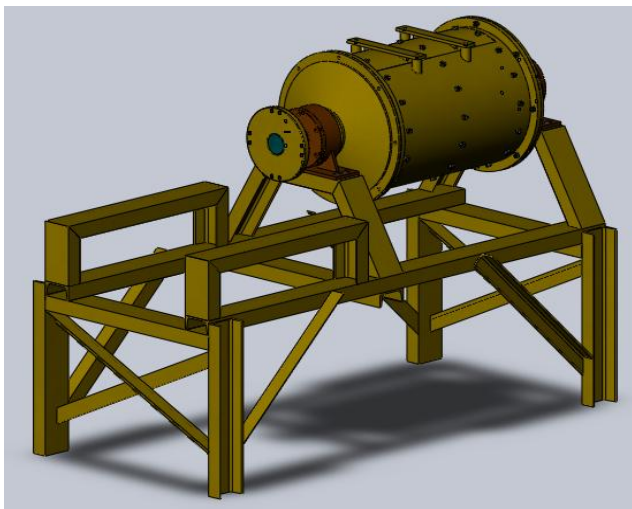
6.2 Създаване на CAD и физически модел на лабораторен образец.

При създаване на модела са спазени всички размери на модела на мелницата съгласно 6.1.3. Този модел ще бъде необходим при лабораторни изследвания на барабанни топкови мелници, като ще е възможно да бъдат правени пълни факторни експерименти. За целта бе създаден CAD модел на барабанна топкова мелницата, както и съпътстващата работна документация, със сборен чертеж показан в приложение III. За създаването на настоящият модел, бе използван специализиран програмен продукт Solid Works. На фигура 6.2 е показан модела на мелницата поставен върху рама, а на фигура 6.3 изработения барабан на модела и лагерните тела.

6.3. Изводи

1. Проведения анализ на критериалните отношения показват, че осигуряването на пълно удовлетворяване на всички критериални уравнения при моделиране на смилането в барабанни топкови мелници е трудно постижимо. На практика обаче се

преминава към приближено моделиране, точността на което се определя от експеримента.



Фигура 6.2. CAD модел



Фигура 6.3

2. Съгласно теорията на подобие можем да кажем, че процесите на смилане в барабанни топкови мелници ще бъдат подобни, както при геометрично подобие на модела и действителната мелница, геометрично подобие на изходните материали за модела и действителната машина, така и при равни критериални съотношения. Последното изискване е видно от равенствата:

$$(\varphi)_H = (\varphi)_M = 0,397;$$

$$(\psi)_H = (\psi)_M = 0,809;$$

$$(k_{ш})_H = (k_{ш})_M;$$

$$(k_{ВХ})_H = (k_{ВХ})_M.$$

3. Всичко това показва, че с модела може да се провеждат активни факторни експерименти, чиито резултати да се превеждат към мелници работещи в най – различни минно геоложки условия.

ГЛАВА VII. Многоцелева оптимизация на процеса смилане в БТМ по обобщена функция на полезност

7.1 Теоретична постановка

Качеството на един технологичен продукт или качеството на функциониране на един обект или система [66] е комплексен показател, съставен от множество целеви параметри. Всеки от тях има определено значение, но не е достатъчен за оптимално управление на обекта. Оптималните стойности на различните целеви параметри обикновено се получават при различни стойности на множеството управляващи параметри, а оптимизацията само по един критерий не винаги е най-доброто решение. В действителност реалните технологични оптимизационни задачи винаги са многоцелеви.

Някои от многоцелевите задачи могат да се сведат до един основен параметър, а останалите да играят ролята на областни ограничения.

В задачите за многокритериална оптимизация основен проблем е „вземане на решение” коя точка от компромисната област да бъде избрана за оптимална. Това вземане на решение трябва да бъде максимално подпомогнато от избраният метод за многоцелева оптимизация. Избраният метод в настоящата разработка е методът на многоцелева оптимизация по обобщена функция на полезност. При него много целевата оптимизация се свежда към едно целева, като се приведат множеството критерии към един.

7.2 Избор на обобщена функция на полезност описваща процеса смилане в БТМ за условията на фабрика „Елаците”

Както се вижда от формула (7.4), всеки целеви параметър Q_j ще се трансформира в коефициент на полезност η_j в границите от 0 за най-безполезния до +1 за най-полезният резултат. Ако в допустимото пространство $x \in \Gamma_x$ има резултати за Q_j , по-лоши от най-безполезния Q_{Cj} , при прилагане на формула (7.4) те се приемат за равни на Q_{Cj} .

След трансформирането на физическите параметри в безразмерни полезности се съставя обобщената функция на полезност. Тя може да бъде средноаритметична обобщена функция на полезност без тегловни коефициенти (7.5), средноаритметична обобщена функция на полезност с наличие на тегловни коефициенти (7.6) и средно геометрична обобщена функция на полезност (7.7).

За описание на процеса смилане в БТМ избираме средноаритметична обобщена функция на полезност без тегловни коефициенти. Това се дължи на факта, че качествена оценка на тегловните коефициенти не може да бъде формулирана в рамките на направените изследвания. От друга страна средно геометричната обобщена функция на полезност се използва при технологични процеси, за които продуктът не се приема за годен, ако дори един от целевите параметри не отговаря на изискванията за границите на полезност. Освен това използването на средно геометричната обобщена функция на полезност води до натрупване на грешки.

На таблица 7.1 са показани изчислените стойностите на коефициентите на полезност η_E, η_q, η_k спрямо целевите функции E, q и k (4.28), (4.37), (4.45) на трите целеви параметъра получени след статистическия анализ на резултатите от пасивния факторен експеримент проведен в фабрика „Елаците”. В същата таблица са показани и трите възможни обобщени функции на полезност (7.5), (7.6), (7.7) със следните означения:

- ϕ_2 - средноаритметична обобщена функция на полезност с наличие на тегловни коефициенти;

- ϕ_1 е средноаритметична обобщена функция на полезност без тегловни коефициенти;

- ϕ_3 - средно геометричната обобщена функция на полезност.

Показани са също и стойностите на най-безполезните резултат за целевите параметри съответно Q_{CE}, Q_{Cq}, Q_{Ck} , както и границите на полезност на целевите параметри $Q_{max} - Q_{min}$, необходими за изчисляване на ϕ_1, ϕ_2 и ϕ_3 .

Направените изчисления показват, че коефициентите k_j за енергоразхода не могат да бъдат с отрицателна стойност, поради фактът, че за подобряване на смилането е необходима повече енергия.

7.3 Статистическа оценка на обобщената функция на полезност

Резултатите от таблица 7.1 са обработени статистически с програмата STATGRAPHICS. Получени са четири модела на средноаритметичната обобщена функция на полезност без тегловни коефициенти като единия е с константа, а другите без константи.

Като модел с най-добри параметри е избран модел М 7.4(таблица 7.5). Уравнението на модел без константа в натурални променливи (таблица 7.5) изглежда по следния начин:

$$\phi_{1,2} = -7,97 \cdot 10^{-3} \cdot D_B^2 \cdot L_B + 9,76 \cdot 10^{-3} \cdot M_T + 3,35 \cdot 10^{-3} \cdot (k_{15} - k_{III}) - 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \dots \quad (7.11)$$

Модел М 7.4 може да бъде оценени като модел с най-висока адекватност. Коефициентът на множествена корелация R^2 е съответно 97,45%, а коригираният коефициент на множествена корелация $R^2(adj)$ е 97,26%. Този модел има и други високи показатели на оценка. Стойността на показателя на доверителна вероятност (**Р-критерий**) за модела е под критичната **0,05**, т.е. може да се приеме, че моделът е адекватен с доверителна вероятност над 95%. Друго голямо предимство на този модел е, че той обхваща най-много управляващи фактори. Друго голямо предимство на този модел е, че той обхваща най-много управляващи фактори.

7.4. Намиране на оптимално отношение между управляващите фактори действащи на процеса смилане в БТМ за условията на фабрика „Елаците”

Намирането на оптималното съотношение на управляващите фактори има за цел да определи оптималният режим на процеса смилане в барабанните топкови мелници работещи в условията на фабрика „Елаците”. От теорията на управление на технологичните процеси е известно, че режимът е оптимален когато обобщената функция на полезност има максимална стойност.

За да определя максималната стойност на обобщената функция на полезност са използвани програмите „Excel” и “Matlab”.

Два от управляващите фактори участващи в обобщената функция на полезност, а именно вътрешният диаметър и дължина на барабана се променят равномерно, поради фактът, че са функция от износването. Това дава възможност те да бъдат представени графично от поучената в глава 3 функция за износване на облицовките - $i, \%$.

Други два от управляващите фактори участващи в обобщената функция на полезност, обаче не подлежат на управление или се поддържат постоянни. Това са $k_{15} = 93,2\%$, стойност която се поддържа постоянна последните години и количеството шисти в постъпващата в мелницата руда, фактор, който не може да бъде управляван и поради това е избрана неговата средна стойност, а именно $k_{III} = 28,65\%$. Поради тази причина при използването на програмата „Excel”, са ограничени с тези стойности и са получени различни резултати от тези получени посредством “Matlab”.

Таблица 7.1

W_{ji}	0,5		0,3		0,2
k_j	1		1		1
Q_C	52,7		11,75		0,728
$Q_{max} - Q_{min}$	10,7		4,1		0,355
η_k	η_E	η_q	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
0,8505	0,4659	0,9915	0,76929	0,254433	0,732387
0,3178	0,0927	0,6930	0,367799	0,108425	0,273275
0,1682	0,4366	0,4507	0,351838	0,101743	0,321082
0,0561	0,2463	0,3352	0,212542	0,056327	0,166677
0,0000	0,3488	0,6197	0,322833	0,076193	0
0,5234	0,3293	0,7746	0,542427	0,171797	0,511077
0,1776	0,3122	0,3577	0,282504	0,084664	0,270681
0,6822	0,5951	0,7493	0,675554	0,223172	0,672563
0,3084	0,6439	0,5014	0,484574	0,149219	0,463497
0,4299	0,5976	0,6451	0,557513	0,174412	0,549272
0,6542	0,3415	0,8563	0,617336	0,20027	0,576193
0,6449	0,5683	0,7014	0,638187	0,211066	0,635823
0,4860	0,5317	0,6761	0,564582	0,179238	0,559017
0,8318	0,5659	0,7437	0,713764	0,244792	0,70474
0,6542	0,6293	0,7042	0,662566	0,218909	0,661841
0,5234	0,7049	0,5972	0,608475	0,197527	0,603961
0,4673	0,4512	0,6648	0,527766	0,167323	0,519461
0,4393	0,5512	0,5915	0,52734	0,167767	0,523211
0,4860	0,4854	0,6620	0,54444	0,173665	0,538488
0,3458	0,4805	0,5183	0,448197	0,140235	0,441601
1,0000	0,5829	0,8958	0,826234	0,284678	0,805263
0,7009	0,7756	0,5803	0,685609	0,233069	0,680748
0,7664	0,6073	0,4761	0,616576	0,220195	0,60511
0,6822	1,0000	0,2197	0,633987	0,228355	0,531213
0,4953	0,3805	0,7380	0,537948	0,169805	0,518126
0,4393	0,4390	0,5606	0,479613	0,154482	0,476368
0,2523	0,0463	0,6225	0,307071	0,088193	0,193808
0,1682	0,4585	0,4507	0,359155	0,103938	0,326376
0,1215	0,6561	0,3211	0,36624	0,107267	0,294714
0,7103	0,4195	0,5915	0,573781	0,199768	0,560689
0,0748	0,2732	0,6197	0,322552	0,081093	0,233048
0,7850	0,4610	0,7690	0,671679	0,228206	0,652884
0,7664	0,4390	0,8648	0,690056	0,229281	0,662638
0,6916	0,5049	0,4901	0,562203	0,198429	0,555203
0,3738	0,1195	0,9127	0,468673	0,135102	0,344193
0,4673	0,0756	1,0000	0,5143	0,152109	0,328137
0,6449	0,2805	0,7746	0,566665	0,187169	0,519391
0,3458	0,4780	0,5183	0,447384	0,139991	0,440852
0,4393	0,5220	0,4028	0,454673	0,152258	0,452013
0,3458	0,5537	0,3577	0,419066	0,136848	0,409146
0,2804	0,6707	0,0000	0,317035	0,113802	0
0,0654	0,0000	0,7352	0,266877	0,059918	0
0,3458	0,4756	0,4225	0,414646	0,133362	0,411128
0,6168	0,2805	0,5042	0,467179	0,164468	0,443506
0,5327	0,3195	0,6000	0,484074	0,160736	0,467423

Таблица 7.5. Параметри на модел М7.4 без константа

Параметри	Стойност	Стандартна грешка	Т- статистика на Стюдънт		Р критерий
$D_B^2 \cdot L_B$	-0,00797	0,001746	-4,56412		0,000
M_T	0,009757	0,001126	8,66219		0,000
$k_{15} - \kappa_{\text{ш}}$	0,003352	0,001379	2,43085		0,0195
Q^2	-1,2E-05	5,49E-06	-2,27014		0,0285
	Сума от квадрати на модела	Степени на свобода	Средно на квадрати на модела	F критерий	Значимост на F
Модел	12,2088	4	3,0522	391,57	0,000
Остатък	0,319589	41	0,007795		
Общо	12,5284	45			
Коефициент на множествена корелация				97.4491 %	
Коригиран коефициент на множествена корелация				97.2624 %	
Стандартна грешка				0.0882885	
Средна абсолютна грешка				0.0704934	
Статистика на Дърбън - Отсън				1.0442	
Остатъчна автокорелация				0.435233	

Стойностите на управляващите фактори, при които ОФП е максимална чрез използването на двете програми са показани в таблица 7.6

Таблица 7.6

Управляващи фактори						ОФП	Програма
D_B, m	L_B, m	M_T, t	$Q, t / h$	$k_{15}, \%$	$\kappa_{\text{ш}}, \%$	$\phi_{1\max}$	
4,07	6,14	174,4	123	93,2	11,3	0,9772	Matlab
4,07	6,14	174,4	123	93,2	28,65	0,942	Excel

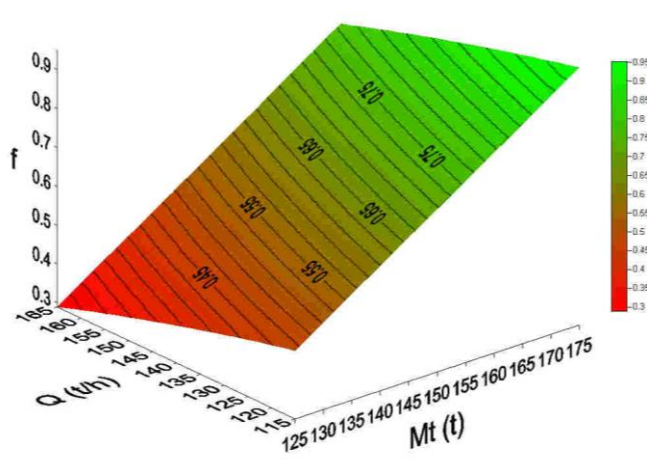
Графично представяне на оптималното отношение на управляващите фактори

За по-добро онагледяване на получените резултати и показването им графично, се ограничава по един от параметрите като постоянни и е показано влиянието на останалите два параметъра на обобщената функция на полезност. Това се обуславя от фактът, че обобщената функция на полезност зависи от три параметъра и не е възможно графичното показване изменението на всички параметри едновременно.

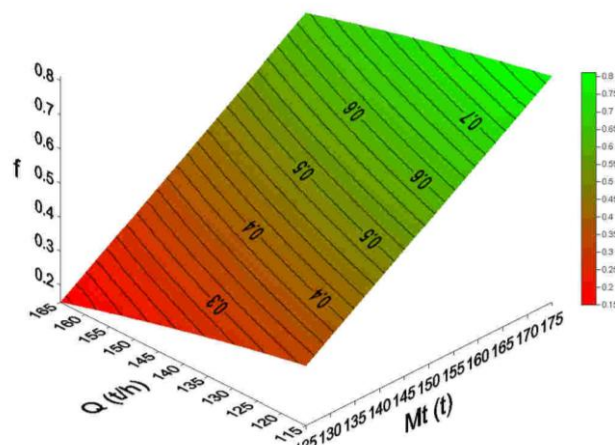
За графично представяне на зависимостта на обобщената функция на полезност от масата на топките и натоварването на мелницата с руда, са избрани два варианта на износване – при нова облицовка ($i = 0\%$, фигура 7.1) и при максимално допустимо износване на облицовките преди подмяната им ($i = 100\%$, фигура 7.3). За графично представяне на резултатите е използвана програмата „SURFER 8”.

За графично представяне на зависимостта на обобщената функция на полезност от масата на топките и износването, както и в предишният случай са избрани два варианта на натоварване с руда – ниски стойности на натоварване ($Q = 115t / h$, фигура 7.4) и при максимално натоварване в областта на направения експеримент ($Q = 165t / h$, фигура 7.6).

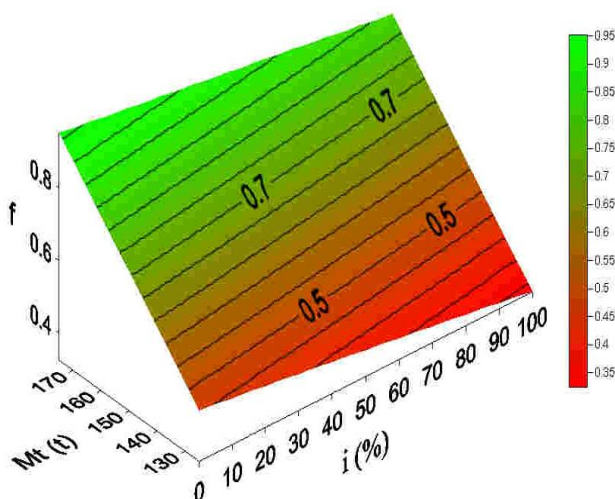
За графично представяне на зависимостта на обобщената функция на полезност от натоварване на мелницата с руда и износването, са избрани два варианта на масата на топките – минимално количество ($M = 120t$, фигура 7.7 и при максимално количество топки ($M = 175t$, фигура 7.9).



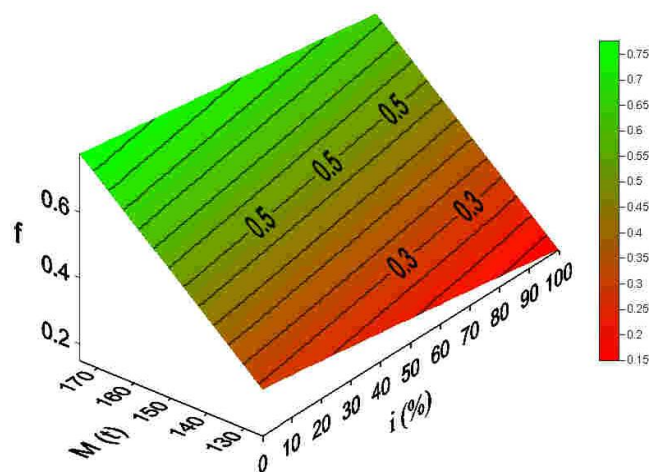
Фигура 7.1. $\phi = f(M_t, Q, i = 0\%)$



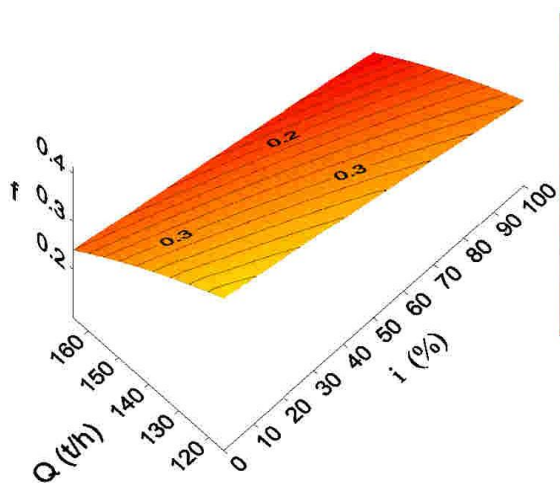
Фигура 7.3. $\phi = f(M_t, Q, i = 100\%)$



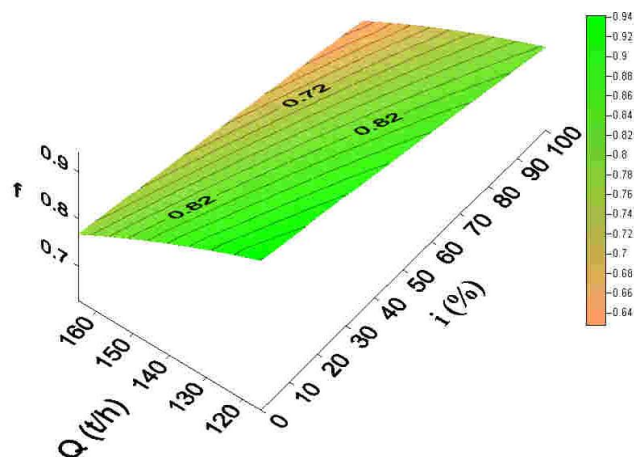
Фигура 7.4. $\phi = f(M_t, i, Q = 115t / h)$



Фигура 7.6. $\phi = f(M_t, i, Q = 165t / h)$



Фигура 7.7. $\phi = f(i, Q, M_t = 120t)$



Фигура 7.9. $\phi = f(i, Q, M_t = 175t)$

7.5 Изводи

След анализ на получения математичен модел на обобщената функция на полезност и графиките показващи влиянието на отделните фактори върху тази функция, могат да бъдат направени следните изводи:

1. Мелниците от този тип, работещи в условията на „Елаците мед” - АД имат оптимален режим на работа при нови облицовки, минимално натоварване с руда и максимален топков товар в диапазона на направените измервания.
2. Количеството топки в барабана на мелницата в никакъв момент не трябва да е по малко от 140 тона.
3. С износването на облицовките на мелницата т.е. с увеличаване на вътрешният диаметър и дължина на барабана, пропорционално трябва да се увеличават и количеството топки в барабана, което значи да се поддържа постоянен коефициент на запълване със смилащи тела.
4. Количеството преработена руда от моментът на поставяне на нови облицовки до всеки следващ момент, дава необходимата информация за вътрешният диаметър и дължина на барабана, което свързано с известната зависимост на износването на топките от тази преработка са достатъчни условия за управление на процеса на дозиране на добавяните топки така, че да бъде поддържан технологичен режим близък до оптималния.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГЛАВА VIII. Приноси, публикации и бъдещи задачи

8.1. Научно-приложни приноси:

1. Въз основа на експерименталните данни от пасивен факторен експеримент е предложен нов математичен модел на процеса смилане в барабанна топкова мелница.
2. При целева функция „износване на облицовките на барабана на мелницата”, прилагайки теориите на експеримента, регресионния и дисперсионен анализи, са изведени и оценени адекватни регресионни уравнения със значими за целевата функция коефициенти.
3. Изведени са нови аналитични зависимости за целевите функции относителен енергоразход, относителна производителност по готов продукт и изходна суровина при смилане на руда в барабанна топкова мелница.
4. Получените регресионни уравнения за целевите функции са използвани за създаване на обобщена целева функция на полезност, която показва връзката между конструктивните и технологични параметри.
5. Създадена е методика за симулационно компютърно изследване на 3D модел на барабанна топкова мелница.

8.2. Приложни приноси на дисертационния труд.

1. Проектиран и изработен е модел на барабанна топкова мелница, който ще бъде предоставена за използване в съответните лабораторни упражнения със студенти.

2. Създаден е три размерен пространствен компютърен модел на барабанна топкова мелница, посредством който могат да бъдат реализирани симулационни изследвания.

3. Резултатите от проведените съгласно целите и задачите на настоящата дисертация изследвания са внедрени за определяне необходимият топов товар и натоварване с руда на барабанните мелници в действащата флотационна фабрика „Елаците“. Същите са приложени и в учебния процес за обучение на студенти по дисциплина ТТОПИ.

8.3. Перспективи и направления за бъдещи изследвания по основната цел на дисертационния труд

1. Чрез създаденият лабораторен образец на барабанна топкова мелница да се проведе активен факторен експеримент включващ нови управляващи фактори като ъглова скорост на барабана, диаметър на използваните топки, форма на топовия товар /кълбо, яйцевидна форма, призма, тетраедър и др./ .

2. Адаптиране на създадената методика за избор на конструктивните параметри на барабанна топкова мелница и към други конструкции смилащи апарати.

3. Разширяване областта на приложение на създадената методика и прилагането им в практиката (приложение IV).

8.4. Публикации по дисертационния труд

1. Дамянов Ц. и И. Минин, „Подобряване на експлоатационните и ремонтни показатели на задвижващия механизъм на барабанните мелници в минните обогатителни комплекси“, Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Свитък III, Том 47, София, 2004г.

2. Минин И, „Създаване на математичен модел на процеса смилане на материали в барабанни топови мелници с цел изследване на относителният им енергоразход в промишлени условия“, Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Свитък III, Том 49, София, 2006г.

3. Минин И. и П. Недялков, „Изследване на относителната производителност на барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5х6 работеща в условията на фабрика „Елаците““, Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Свитък III, Том 53, София, 2010г.

4. Минин И, „Симулационно моделиране и изследване на барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5х6.“, Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, Свитък III, Том 53, София, 2010г.

Съдържание

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	3
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	4
ГЛАВА I. АНАЛИЗ НА СЪВРЕМЕННОТО ТЕХНИЧЕСКО НИВО НА ПРОЦЕСА СМИЛАНЕ (ТОПКОВО СМИЛАНЕ)	4
ГЛАВА II. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	6
ГЛАВА III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИЗНОСВАНЕТО НА ОБЛИЦОВКИТЕ НА БАРАБАННИ ТОПКОВИ МЕЛНИЦА В УСЛОВИЯТА НА ОБОГАТИТЕЛНИ ФАБРИКИ „ЧЕЛОПЕЧ“ И „ЕЛАЦИТЕ“	8
3.1 Теоретична обосновка	8
3.2. Описание на експеримента проведен във фабрика „Челопеч“	8
3.3 Статистически анализ на резултатите получени във фабрика „Челопеч“	8
3.4. Описание на експеримента проведен във фабрика „Елаците“	9
3.5 Статистически анализ на резултатите получени във фабрика „Елаците“	9
3.6. Изводи.....	11
ГЛАВА IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАБОТАТА НА БАРАБАННА ТОПКОВА МЕЛНИЦА ТИП МТЦ 4,5Х6 В УСЛОВИЯТА НА „ЕЛАЦИТЕ МЕД“ – АД.	12
4.1. Математически модел на процеса смилане в барабанна топкова мелница	12
4.2. Провеждане на пасивен факторен експеримент на барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5х6 работеща в условията на фабрика „Елаците“	14
4.3. Статистическо изследване на резултатите от пасивния експеримент на барабанна топкова мелница тип МТЦ 4,5х6.	15
ГЛАВА V. ЛИНЕЕН СТРУКТУРЕН ДЕФОРМАЦИОННО-НАПРЕЖЕНОВ FE АНАЛИЗ НА CAD-CAE МОДЕЛ НА МЕЛНИЦА ТИП МТЦ 4,5х6	19
5.1. Особенности на обекта на изследване.....	19
5.2. Структурни елементи и системи	20
5.3. Цел на компютърното изследване.....	20
5.4. Същност и особености на методиката за провеждане на симулационното компютърно изследване	21
5.5. Компютърно моделиране на триизмерен CAD-модел на барабанна мелница тип МТЦ 4,5х6	21
5.6. Гранични условия, механично натоварване и работни режими за провеждане на структурния МКЕ анализ.....	21
5.7. Резултати от пресмятането на основните технологични и силови параметри на барабанна топкова мелница МТЦ 4,5х6.....	22
5.8. Граничните условия и натоварване на CAE-модела в програмната среда на COSMOS Works	22
5.9. Дефиниране на резултатите от CAE-изследването.....	23
5.10. Резултати и анализ от проведения структурен линеен анализ на мелницата	24
5.11. Резултати и анализ от проведения структурен линеен анализ на зъбната двойка на мелницата.....	25
5.12. Изводи	29
ГЛАВА VI. СЪЗДАВАНЕ МОДЕЛ НА ЛАБОРАТОРЕН ОБРАЗЕЦ.....	30
6.1 Създаване на критерии на подобие на барабанна топкова мелница	30
6.2 Създаване на CAD и физически модел на лабораторен образец.....	31
6.3. Изводи.....	31
ГЛАВА VII. МНОГОЦЕЛЕВА ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСА СМИЛАНЕ В БТМ ПО ОБОБЩЕНА ФУНКЦИЯ НА ПОЛЕЗНОСТ.....	32
7.1 Теоретична постановка.....	32
7.2 Избор на обобщена функция на полезност описваща процеса смилане в БТМ за условията на фабрика „Елаците“	33
7.3 Статистическа оценка на обобщената функция на полезност	34
7.4. Намиране на оптимално отношение между управляващите фактори действащи на процеса смилане в БТМ за условията на фабрика „Елаците“	34
7.5 Изводи.....	38
III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
ГЛАВА VIII. ПРИНОСИ, ПУБЛИКАЦИИ И БЪДЕЩИ ЗАДАЧИ.....	38
8.1. Научно-приложни приноси	38
8.2. Приложни приноси на дисертационния труд.....	38
8.3. Перспективи и направления за бъдещи изследвания по основната цел на дисертационния труд.....	39
8.4. Публикации по дисертационния труд	39