



## О Т Ч Е Т

По изпълнението на научно-изследователски проект

### МОДЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕМЕТАЛНИ ЗЪБНИ КОЛЕЛА С МЕТАЛЕН БАНДАЖ НА ЗЪБНИЯ ПРОФИЛ

съгласно договор № I Н-600/09.08.04 в ТУ София – филиал Пловдив

Водещо звено на ТУ София - филиал Пловдив	Катедра МУ	Лаборатория 4401	Факултет ФМУ
Ръководител на проекта	Гл.ас. Д-р инж. Димитър Гогов Петров		
Участници в проекта:	1. Любен Илиев Ламбов – студент IV курс, МУ, 13а група 2. Йордан Киров Киров – студент IV курс, МУ, 13а група 3. Божидар Желев Колев – студент IV курс, МУ, 13а група		
Продължителност на проекта:	10.12.2004 г. Отчет пред ФС до 28.11.2004г. /Крайните срокове са съгласно календарния план/		
Стойност на проекта	580 лева		
Дата: Подпис на ръководителя	29.11.2004 г.		

## Съдържание

№	Страница
1. Предпоставки	3
2. Предлагани конструкции	4
3. Осъществяване на триизмерното компютърно моделиране	6
4. Осъществяване на компютърна симулация на натоварването	7
5. Съпоставяне на резултатите от компютърно симулираното натоварване на различните конструктивни варианти	9
6. Резултати от моделното изследване на VI-ти конструктивен вариант	10
7. Заключение и насоки за понататъшни изследвания	11
8. Литературни източници	11

# 1. Предпоставки

Предавките със неметални (и по-конкретно с пластмасови) зъбни колела продължават за изместват тези с метални във все по-разширяваща се територия на приложение. Техните специфични характеристики освен това са в процес на непрекъснато подобряване с нови разработки както в материалите, така и в дизайна и технологията. Във връзка с това предавките с неметални зъбни колела се различават драматично от тези с метални, понеже последните материали и тяхната технология в основни линии е почти напълно разработена и следователно е в един сравнително статичен стадий на развитие.

Всред характеристиките, които съдействат за бързото нарастване на употребата на предавките с неметални и по-специално пластмасови зъбни колела, може би най-основните, са:

- Евтина технология (особено при използване на шприц-формоване).
- Елиминиране на редица машинни операции при изработването им.
- Ниска плътност, малко тегло, ниска инертност.
- Възможности за поемане на удари и погасяване на вибрациите, поради по-голямата им еластична податливост.
- Възможност да работят с минимално или никакво смазване, поради присъщата хлъзгавост (самосмазване) на пластмасите.
- Относително нисък коефициент на триене при плъзгане.
- Устойчивост на корозия, елиминиране на необходимостта от нанасяне на антикорозионни или защитни покрития.
- Нисък шум при работа.
- Точността на размерите и разположението на повърхнините не от такова критично значение, както при металните, поради по-голямата еластичната податливост.
- Съгласуваност с тенденцията на все по-голяма употреба на пластмасови корпуси и други компоненти.
- Възможност за производство на една стъпка, т.е. без необходимост от предварителни и довършителни технологични операции.

В същото време всеки един инженер-конструктор трябва да е наясно и с ограничените възможности на неметалните (и по-специално пластмасовите) зъбни предавки спрямо тези от метал. Най-важните от тях са:

- По ниска товароносимост поради по-ниските стойности на допустимите напрежения; по-голямата им еластична податливост може освен това да предизвика концентрация на напреженията;
- Пластмасови зъбни колела не могат като цяло да се формоват със същата точност както високо точните машинно изработени метални зъбни колела.
- Неметалните зъбни колела се характеризират с по-голямо разсейване на размерите поради техния по-голям коефициент на температурно разширение и на абсорбция на влагата.
- Намалена способност да работят при повишени стойности на температурата; температурните условия на работа трябва да са за температури по-ниски от 120°C. Освен това те с ограничена работоспособност и при ниски температури;
- Високи първоначални разходи за проектиране и изработка на шприц формите с коректни стойности на размерите и зъбния профил;
- Някои химикали или дори смазки могат да им въздействат негативно;

-Неподходящи шприц-форми или процеси могат да предизвикат вътрешни напрежения в основата на зъбите и изкривявания.

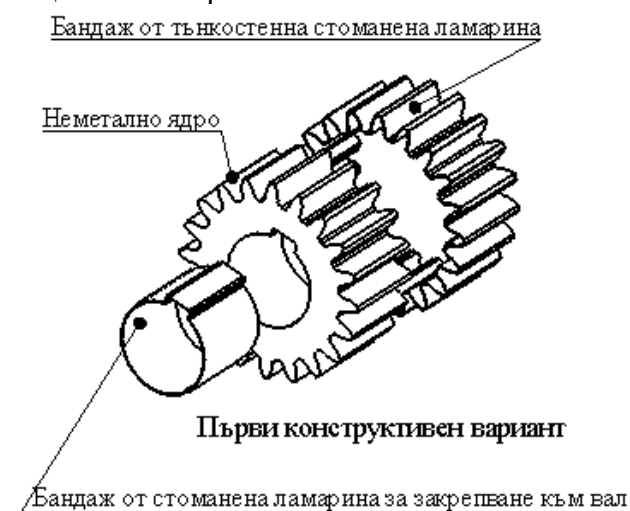
-Цените на пластмасите следват тези на нефта и затова са по-неустойчиви и нарастват по отношение на цените на металите.

Като цяло използването на детайли от неметален материал цели най-вече намаляването на общата маса на изделието, опростяване на технологичната подготовка, снижаване на себестойността. Пластмасови зъбни колела все по-широко се прилагат в средно и леко натоварени зъбни предавки. Като основни предимства на предавките с пластмасови зъбни колела се сочат безшумността и плавността на движението. При правилно избрано натоварване тези предавки се характеризират и с голяма дълготрайност. Отлетите под налягане пластмасови зъбни колела се отличават с добра технологичност, малка относителна маса, увеличен коефициент на припокриване вследствие на еластичната им податливост, малък коефициент на триене и не на последно място по важност – с висока демпферираща способност и шумозаглушаване [Белчев, 1988]. Но поради по-ниската си контактна якост и якост при огъване, употребата на такива зъбни колела е сравнително по-ограничена, особено в натоварени зъбни предавки [Орлов, 1988].

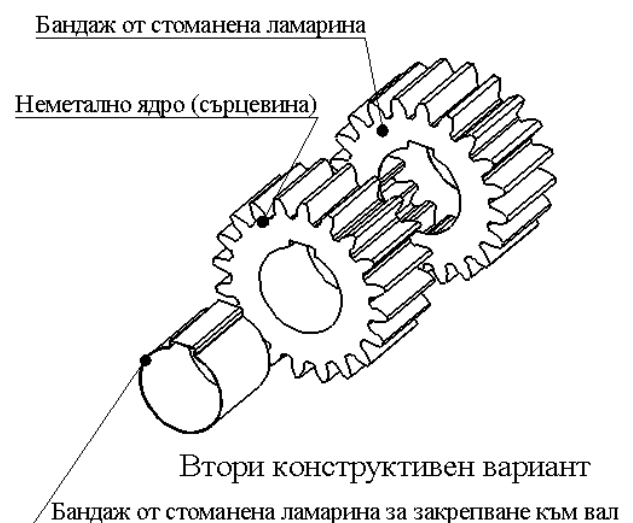
Изследванията в направление на използване и усъвършенстване на зъбните предавки с пластмасови зъбни колела продължават. Като принос в тази насока могат да се разглеждат и изследванията върху тук предложената конструкция на неметални цилиндрични зъбни колела, чийто зъбен профил е покрит с бандаж от стоманена ламарина. Стремежът е да се съчетаят плавността, безшумността, демпферирането, доброто припокриване на пластмасовите зъбни колела с по-високата якост на тези от стомана.

## 2. Предлагани конструкции.

В [Петров,2004] са публикувани резултатите от моделните изследвания по отношение на товароносимост и деформационна податливост на два конструктивни варианта на тази идейна конструкция. При първия конструктивен вариант (фиг.1) с тънкостенна стоманена ламарина е покрит само зъбния профил на неметалното ядро. В отвора на това ядро се влага също вътрешен бандаж от стоманена ламарина. При втория конструктивен вариант (фиг.2) неметалното ядро е капсулирано с тънкостенна стоманена ламарина и неметалното ядро е изцяло в затворен обем.



**Фиг.1. Конструктивен вариант с бандажиране само по зъбния профил.**



**Фиг.2. Конструктивен вариант с пълно затваряне на неметалното ядро.**

Резултатите от моделните изследвания от [Петров, 2004 г] показват, че и в двата варианта първите гранични стойности на вътрешните напрежения се достигат при приблизително еднакви натоварвания, като все пак товароносимостта на вторият вариант е малко по-голяма. За сметка на това първият вариант има деформационна податливост по-близка до тази на чисто неметалните. Като недостатък на първия вариант може да се изтъкне това, че металният бандаж на зъбния профил не е добре осигурен срещу отлепване от неметалното ядро при претоварване. Недостатък на втория вариант е нееднаквата деформационна податливост по дължина на зъба.

За да се съчетаят предимствата и редуцират недостатъците на споменатите два конструктивни варианта в рамките на настоящия научно-изследователски проект се изследваха моделно на товароносимост освен първите два, още 4 конструктивни варианта. За намаляване на общото машинно време необходимо за извършване на необходимите изчисления бяха генерирани 3-D модели по пет зъба. Така моделите на първите два конструктивни варианта от фиг.1 и фиг.2 се измениха във вида показан на съответно на фиг.3 и фиг.4.



Фиг. 3. Първи конструктивен вариант.



Фиг.4. Втори конструктивен вариант.

Всички изследвани модификации имат бандаж от стоманена ламарина на зъбния профил и отворът на неметалното ядро е усилен със стоманена втулка. Различията в модификациите се състоят основно в начина на захващане на бандажа на зъбния профил. Чрез това захващане се цели от една страна да се намали нееднаквата деформация по дължината на зъба и обезпечаване на прилягането на бандажа покриващ зъбите срещу отлепване при евентуално претоварване, а от друга - да осигури достатъчно голяма еластична податливост на зъбите, което е една от характерните особености на пластмасовите зъбни колела.

Разликата между III-ти и IV-ти вариант е във външния диаметър на страничния укрепващ стоманен бандаж, който откъм вътрешния си диаметър е захванат твърдо към стоманената втулка в отвора за закрепване към вал. При III-тия вариант (фиг.5) този външен диаметър е по основната окръжност на зъбното колело, а в IV-тия вариант (фиг.6) – по петовата.

При V-ти конструктивен вариант (фиг.7) захващането на бандажа на зъбите става по петовата окръжност чрез звездообразен страничен бандаж, който също е захванат твърдо към стоманената тънкостенна втулка в отвора. В VI-тия конструктивен вариант (фиг.8) захващането на тънкостенния стоманен бандаж става отново по петовата окръжност с

помощта на стоманен ринг, който за разлика от IV-ти вариант не е свързан с втулката в отвора.



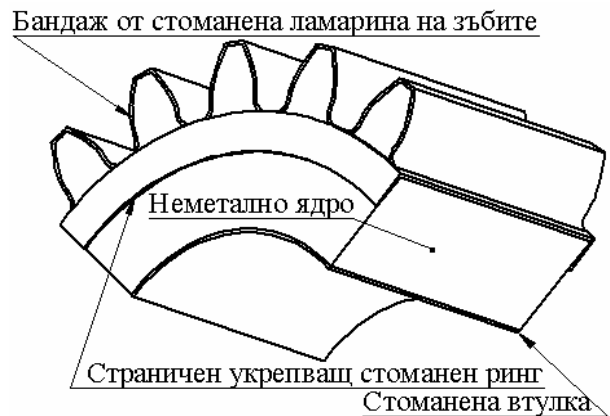
Фиг. 5. III-ти конструктивен вариант.



Фиг. 6. IV-ти конструктивен вариант.



Фиг. 7. V-ти конструктивен вариант.



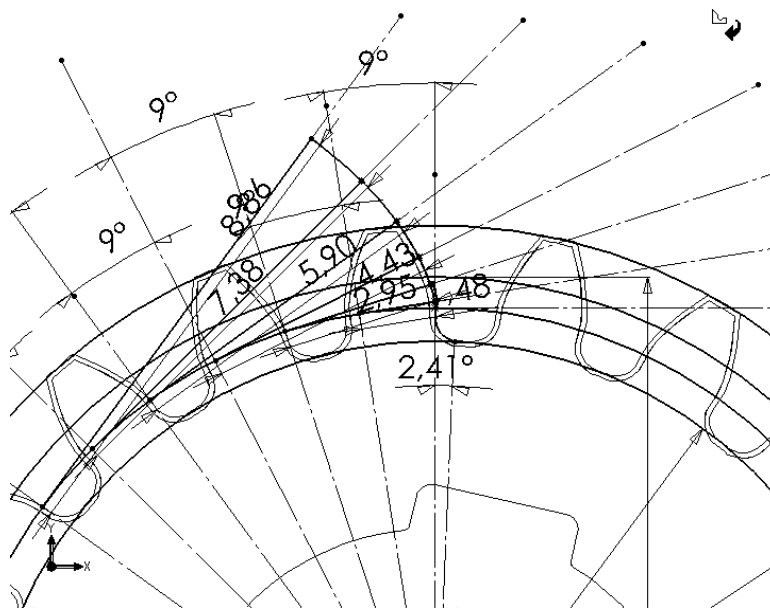
Фиг. 8. VI-ти конструктивен вариант.

### 3. Осъществяване на триизмерното компютърно моделиране.

Моделното изследване се осъществи чрез изграждане на тримерни модели на различните конструктивни модификации като сглобени единици (assemblies) в средата на софтуерния продукт за компютърно подпомогнато проектиране (CAD продукта) - SolidWorks'2004.

Интегрираният към SolidWorks пакет MechSoft Knowledge Center предлага библиотека от готови модели на зъбни колела, но техният зъбен профил не е коректен в смисъл на еволвентен профил. За да бъдат моделите максимално съответстващи на реалните при изграждането им първо се генерира еволвентен профил (фиг.9) чрез сплайн по точки от развиваща се от основната окръжност допирателна. След това чрез наличните техники за копиране, огледално пренасяне, многократно полярно размножаване на графични елементи бе създадена скица на зъбния профил за зъбно колело с модул  $m = 1$  [mm] и 20 броя зъби.

От тази скица по нататък се изтегля по-нататък триизмерния модел на монолитно зъбно колело. От този модел след това чрез техники за отместване на графични елементи или създаване на модели на тънкостенни черупки се създават сглобените единици на изследваните конструктивни варианти – от фиг.3 до фиг.8.



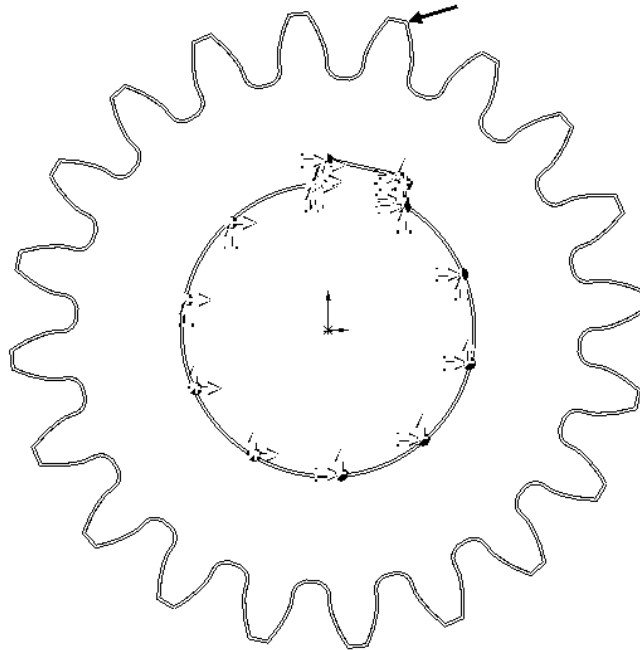
Фиг.9. Изграждане на зъбния профил

#### 4. Осъществяване на компютърна симулация на натоварването.

За осъществяване на компютърно симулирано натоварване се използва напълно интегрирания с SolidWorks продукт CosmosWorks за прилагане на метода на крайните елементи при определяне на вътрешните напрежения и деформации на триизмерни модели на детайли или сглобени единици. Изследвани са геометрично еднаквите модели, както на старите I-ви и II-ри и новите от III-ти до VI-ти конструктивни варианти с вариране на дебелина на стоманената ламарина обвиваща зъбния профил, така и на монолитни зъбни колела, като за намаляване машинното време за пресмятане се разглеждат само 5 зъба от общо 20 на целите зъбни колела. Изследването на моделите се осъществи при следните задавания:

- моделът е на зъбно колело с модул  $m = 1$  [mm], брой зъби  $z = 20$ , ширина на зъбния венец  $b = 10.m$ ;
- моделът се фиксира по вътрешната повърхност на отвора (фиг.10);
- натоварващата сила се прилага (фиг.10) в най-неблагоприятната по отношение якостта на огъване точка и се увеличава до достигане на граничните напрежения за някой от материалите;
- допиращите се повърхности на детайлите за сглобените единици се задават да бъдат залепени – *bonded*;
- за мрежата от крайни елементи се задават следните основни характеристики : размер на елементите – 0,8 [mm], вид на мрежата – за тяло (solid), качество на мрежата - високо (всеки елемент има 10 възела), тип на мрежата – стандартна, брой итерационни точки за проверка на нивото на изкривяването на тетраедричните елементи – 4;
- използва се итерационен изчислителен метод FFEPlus;

Използваните при моделирането материали са от вградените към надстройката CosmosWorks библиотеки с материали. Механичните им характеристики са според табл1.



**Фиг.10.** Задаване на ограничаващите движения връзки (по вътрешния отвор) и начина на прилагане на силата

Табл.1. Механични характеристики на материали

Материал	Гранично напрежение $\sigma_{limit}$ [MPa]	Модул на линейните деформации E [Pa]	Коефициент на Поасон $\mu$	Модул на ъгловите деформации G [Pa]
Обикновена въгл. стомана	220,59	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,28	$7,9 \cdot 10^{10}$
Найлон 9/10	139	$8,3 \cdot 10^9$	0,28	$3,2 \cdot 10^9$
Полиамид PA6	90	$2,62 \cdot 10^9$	0,34	$9,7 \cdot 10^8$
Твърд ПВХ	40,7	$2,41 \cdot 10^9$	0,38	$8,67 \cdot 10^8$
Гума	9,23	$6,1 \cdot 10^6$	0,49	$2,9 \cdot 10^6$



**Фиг.11.**

За осигуряване на необходимото бързодействие на изчислителния процес бе използван компютър (фиг.11), който след направения ремонт за подобряване (upgrade) на неговите характеристики има следните основни параметри:

1. Процесор - Intel<sup>®</sup> Celeron<sup>®</sup> CPU 2.00 GHz
2. RAM памет – 512 MB
3. Видеокарта – Nvidia GeForce2 MX/MX400
4. Hard disk – 40 GB, ExcelStor Technology J340
5. Chipsets: Intel<sup>®</sup> 845GV, FSB@533/400Mhz
6. Операционна система: MS Windows XP Professional, SP 1



## 5. Съпоставяне на резултатите от компютърно симулираното натоварване на различните конструктивни варианти.

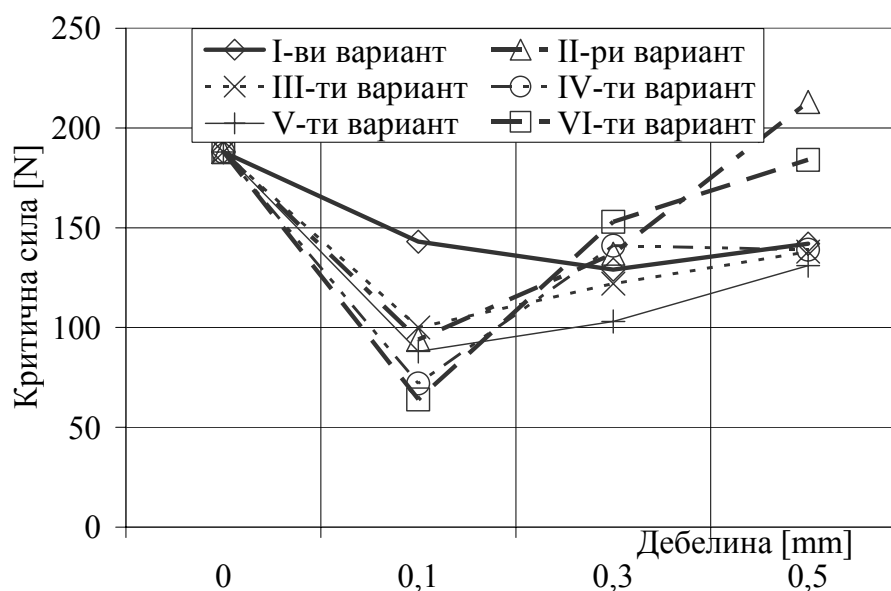
На фиг.11 са показани за шестте различни конструктивни варианта получените при моделирането зависимости на стойността на критичната сила от дебелината на бандажа от стоманена ламарина. Под критична сила тук се разбира онази сила, при която в някой (независимо кой) от материалите (неметал или стомана) на композицията от неметално ядро и метален бандаж вътрешните напрежения достигат гранични стойности.

За показаните графики неметалът е найлон 6/10), а дебелината на стоманената ламарина е 1/10 от модула  $m = 1[\text{mm}]$ . Точката от графиката отговаряща на нулева дебелина на бандажа отговаря на монолитно зъбно колело от найлон 6/10.

По отношение на товароносимост най-добри показатели показват II-ри и VI-ти вариант. Средни са показателите за товароносимост на I-ви и IV-ти вариант, а най-слаби на III-ти и V-ти вариант.

Освен това бе изследвана и зависимостта на податливостта на зъбите при натоварване за различните конструктивни варианти. Тук под податливост се разбира отношението на деформацията към предизвикващата я критична сила в  $[\text{m/N}]$ . Графиките на зависимостите за различните варианти (по специално за случая на използван неметал за сърцевината – найлон 6/10) практически са толкова близки и се сливат, поради което не са показани на отделна фигура. Така че по отношение на показателите за податливостта на зъбите различните конструкции имат приблизително еднакви характеристики.

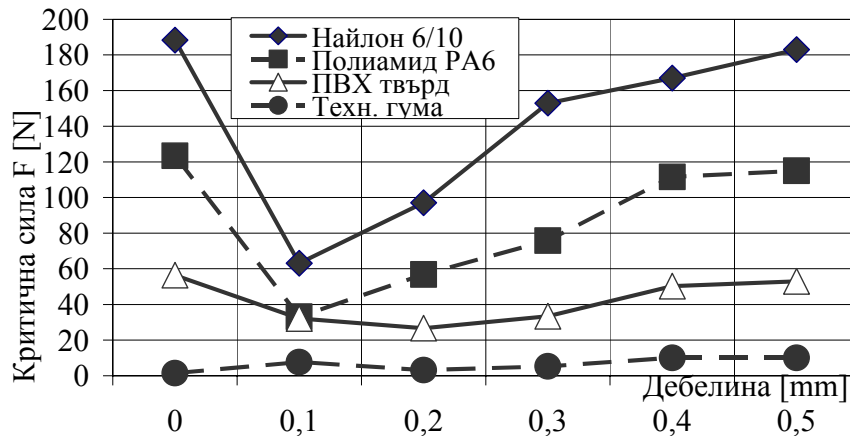
Като най-обещаващ бе избран за по-нататъшно изследване VI-тия вариант (фиг.8), който показва сравнително по-висока товароносимост, при запазване на една добра еластична податливост на зъбите.



Фиг.11. Зависимост на критичната сила от дебелината на бандажа за различните конструктивни варианти.

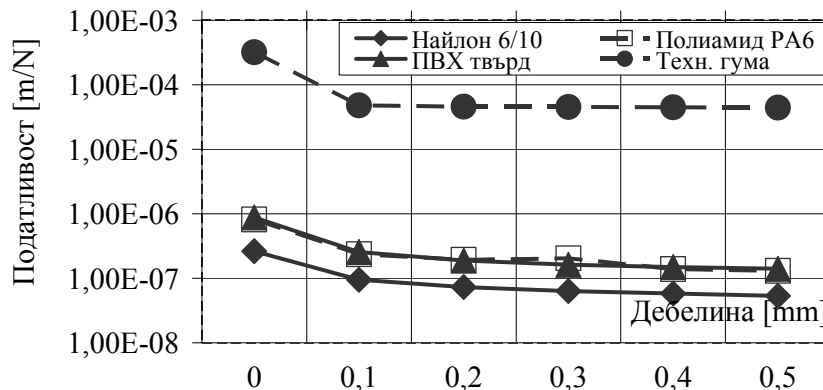
## 6. Резултати от моделното изследване на VI-ти конструктивен вариант.

На фиг.12 и фиг. 13 съответно са показани моделно получените зависимости на критичната сила и на еластичната податливост на зъбите от дебелината на стоманената ламарина за различни използвани материали за неметалното ядро.



Фиг.12. Зависимост критична сила – дебелина на стоманения бандаж.

При използване на полиамид PA6 (за дебелини на металния бандаж под 0,3[mm]) и на найлон 6/10 за материал на неметалното ядро, първите граничните напрежения се появяват в металния бандаж, докато за другите неметали - те се зараждат в точки от ядрото. Според получените резултати монолитното неметално колело (на фиг.12 и фиг.13 за дебелина на бандажа равна на 0 [mm]) има по-голяма сила за достигане на граничните напрежения. Едва при дебелина равна на 1/2 от модула  $m = 1$ [mm], граничната сила за композицията неметално ядро – метален бандаж става по-голяма от тази на монолитното. Това се обяснява, както и за I-ви и II-ри конструктивни варианти, с голямата разлика в стойностите на коефициентите на линейните деформации  $E$  за залепените едни за други стоманена лента и неметален материал. Товароносимостта на композициите неметално ядро – метален бандаж е всъщност по-голяма от тази на монолитните, но при достигане на посочените в графиките стойности на натоварващата сила в определени точки от неметала (обикновено в близост до повърхността на бандажа) граничните напрежения се надвишават и материалът се къса от залепения към него метален бандаж.



Фиг.13. Зависимост податливост – дебелина на стоманения бандаж.

## **7. Заключение и насоки за понататъшни изследвания.**

Като най-сполучлив от изброените по-горе конструктивни варианти на неметални зъбни колела с метален бандаж на зъбите се очерта VI-тия (фиг.8). Той съчетава в себе си (фиг.13) податливостта на деформиране на чисто неметалните със сравнително добра товароносимост, като при това металният бандаж на зъбите конструктивно е осигурен против отделяне от неметалното ядро. Получените от моделирането резултати сочат, че за да има този вариант категорично по-добри показатели по отношение на товароносимостта спрямо това на чисто неметалното зъбно колело, дебелината на бандажа или трябва да е над  $\frac{1}{2}$  от модула на зъбите или бандажът трябва да има характера на тънко метализиращо покритие.

На база на дотук направените моделни изследвания могат да се дадат следните насоки за по-нататъшни търсения:

1. Товароносимост и деформационна податливост на неметални зъбни колела с тънки метализиращи покрития нанесени примерно по метода на катодното разпрашване.
2. Товароносимост и деформационна податливост на метални зъбни колела с неметални покрития нанесени примерно по метода на електростатичното нанасяне.

## **8. Литературни източници.**

1. Белчев Б.П., Арнаудов К.Б. Козлова А.М., “Зъбни предавки с пластмасови колела”, София, Техника, 1988.
2. Орлов П.И., «Основы конструирования» – Книга I, Москва, Машиностроение, 1988.
3. Дамянов Й.Г., Гизова В.Г., Дамянов Т.Д., Халеба Д.А., Митев М.К., “Справочник на машиностроителя”, Техника, София, 1981.
4. Петров Д.Г., “Изследване на неметални зъбни колела с метален бандаж на зъбния профил”, Национален семинар по „Синтез и анализ на механизми’2004”, секция „Машиностроене”, Сливен, 25-27 юни 2004 г.