

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Трибологија машинских система

Број индекса: 317/2018

Томица Д. Мутавцић

**Трибодизајн - моделирање, симулација и
анализа фрикционог контакта**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Блажа Стојановић, ванр. проф. - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- да основне информације трибомеханичких система,
- покаже који су најчешћи трибомеханички системи,
- изврши поделу трибометара и
- изврши моделирање, симулацију и анализу одговарајућег фрикционог контакта.

Препоручена литература:

- [1] Танасијевић, С. (2004). *Триболошки исправно конструисање*. Крагујевац, Србија: Машински Факултет Универзитета у Крагујевцу.
- [2] Bhushan, B. (2001). *Modern Tribology Handbook*. Columbus, Ohio: CRC Press.
- [3] Стојановић, Б. (2013). *Триболошко понашање хибридних композита са А356 матрицом* (Објављена докторска дисертација). Факултет Инжењерских Наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, Србија.

Крагујевац, октобар 2020.

Ментор:

Др Блажа Стојановић, ванр. проф.

Садржај

1. Увод.....	1
2. Трибомеханички системи.....	3
2.1 Подела трибомеханичких система	4
2.2 Основне карактеристике група ТМС-а	8
2.2.1 Трибомеханички системи за пренос кретања	8
2.2.2 Трибомеханички системи за пренос снаге	9
2.2.3 Трибомеханички системи за пренос информација	10
2.2.4 Трибомеханички системи за пренос и обраду материјала.....	11
3. Триболошка испитивања – Трибометри	12
3.1 Клин по диску (<i>Pin on disk</i>).....	13
3.2. Блок по диску (<i>Block on disk</i>)	15
3.3. Четири куглице (<i>Four ball</i>).....	16
3.4. Прстен по прстену (<i>Ring on ring</i>).....	17
3.4 Параметри који утичу на хабање.....	17
4. Моделирање трибомеханичког система	20
4.1 Нелинеарна анализа	21
4.1.1 Узроци нелинеарног понашања.....	22
4.1.2 Основне информација о нелинеарној анализи	22
4.2 Механика контакта у ANSYS-у.....	23
4.3 Лагранжова формулација контакта.....	24
4.3 Фрикциони контакт	28
5. Експеримент	29
5.1 Материјали	29
5.2 Методологија анализе.....	32
5.2.1 Креирање геометрије модела и мреже коначних елемената	33
5.2.2 Подешавање контакта и материјала.....	34
5.2.3 Гранични услови и оптерећења	36
5.2.4 Подешавања анализе	39
6. Резултати и анализа података	40
6.1 Резултујући напони.....	40
6.1.1 Зависност резултујућих напона и брзине клизања	43
6.1.2 Зависност резултујућих напона и оптерећења	45
6.2 Ширина трага хабања	47
7. Закључак	52
Литература.....	53

Изјава о ауторству мастер рада

Изјављујем да сам овај рад израдио самостално користећи стечена знања током студија и наведену литературу.

Захваљујем ментору, професору др Блажи Стојановићу, на саветима, примедбама и помоћи приликом писања овог рада.

На крају, велико хвала мојој породици и девојци на несебичној подршци и разумевању.

Томица Мутавцић 317/2018

Summary

The subject of this thesis is to show frictional contact through features, his types, simulation and analysis using appropriate software. Tribomechanical systems are depicted as a whole in which numbered contact pairs exist. A short review of tribometers is provided, that shows ways in which these types of analyses can be conducted. In addition, the complete process of modeling, simulation and analysis of block on disk tribometer is described. Finite element analysis (FEA) is accomplished with the help of „ANSYS” software. The aim of this thesis is to conclude characteristic chapters in solving statics and dynamics of wearing of a tribological pair. Based on the provided conditions and data, the complete analysis of resulting stresses is accomplished due to frictional contact of disk and block. The tested materials are hybrid aluminum composites with A356 matrix. With the analysis of the results, it is concluded that values of resulting stresses are the highest in the frame of A356+10SiC+3Gr material. Extrapolation method is included in thesis as an aid to reduce time of analysis. Using extrapolation method, similar results of wear scar width are acquired with the results gathered by real experiment.

Keywords: Tribodesign, frictional contact, wear, finite element analysis, block, disk.

Резиме

Тема овог рада је да се фрикциони контакт прикаже кроз његове карактеристике, његове типове, симулацију и анализу у оквиру одговарајућег софтвера. Приказани су трибомеханички системи као једна велика целина у којој се налазе бројни контактни парови. Дат је и кратак преглед триболошких испитивања, тј. трибометара који описује начине на који се могу извршити овакви типови анализе. Поред тога описан је комплетан процес моделирања, симулације и анализе трибометра типа блок по диску. Метода коначних елемената (МКЕ) је извршена уз помоћ софтвера „ANSYS”. Циљ овог рада је да се на једном месту дају карактеристична поглавља у решавању статике и динамике хабања једног триболошког пара. На основу датих услова и података одрађена је комплетна анализа резултујућих напона услед фрикционог контакта диска и блока. Испитивани материјали блока су хибридни композити са А356 матрицом. Анализом резултата је закључено да су вредности резултујућих напона највеће у оквиру материјала А356+10SiC+3Gr. Метода екстраполације, као представник помоћи при анализи у смислу скраћења времена исте, је такође заступљена. Помоћу методе екстраполације су добијени приближни резултати ширине трага хабања резултатима изведеним физичким експериментом.

Кључне речи: Трибодизајн, фрикциони контакт, хабање, метода коначних елемената, блок, диск.

1. Увод

Механички системи у којима површине не клизају или се окрећу једна према другој су ретки, а трибологија је стога кључна наука која омогућава веома широку примену. Напредак у разумевању површинских интеракција које стоје у средишту трибологије захтевао је вештине машинских инжењера, научника материјала, физичара и хемичара. У контексту био-трибологије која се тиче живих организама, дисциплина постаје још ширира и укључује медицинске и биолошке науке. Напредак у трибологији подржао је већи део светског инжењерског напретка. Његов домет се протеже на све аспекте савремене технологије, у најширем смислу те речи, у којима се површине крећу једна у односу на другу, од транспорта и производње електричне енергије до медицинског инжењерства, науке о храни и козметичи, [1].

Понашање и утицај међу материјалима у контакту је препознат као основни предмет у конструисању. Интеракција површина у контакту при релативном кретању не сме да буде секундарно изучавање, из простог разлога јер је подједнако важна као и познавање чврстоће материјала. Зато се може рећи да не постоји машина или механизам који не зависи од интеракције два елемента. Трибологија, као наука и технологија која описује интеракцију површина при релативном кретању, је једна од најважнијих примера приступа у инжењерству, посебно конструисању. Термин трибологија, поред општег карактера који описује области трења, подмазивања и хабања, се може користити и наукама као што је трибодизајн. Очито је, а и фундаментално да практична примена трибологије лежи у успешној употреби при конструисању машина. Најприкладнији облик примене трибологије је трибодизајн, који се сматра као грана у конструисању машина где трење, подмазивање и хабање играју важну улогу. У опширнијем смислу, трибодизајн се може интегрисати у оквир конструисања машина до те мере да се могу десити нови и много ефикаснији планови за разне типове машина, [2].

Употреба знања из трибологије у поступцима развоја пројеката, грађевинског инжењерства и процедура пројектовања била је минимална у односу на употребу осталих техничких знања. Триболошке информације нису биле потребне за употребу и експлоатацију. Конструктори су се фокусирали на побољшање поузданости током експлоатације и избегавање кварова, док се хабање сматра додатним захтевом. Прорачуни капацитета статичке и динамичке стабилности и крутости дуго су се сматрали релевантним за поуздано и ефикасно функционисање машина у експлоатацији. За специфичне експлоатационе услове машина, та калкулација може бити релативно лака. Даљи технички и технолошки развој имплицира повећање снаге, брзине и оптерећења да би се побољшала продуктивност. Машински системи функционисали су у строгим експлоатативним границама. Тада су конструктори почели да разматрају узроке кварова и врло често да режу номиналне ресурсе експлоатације. Детаљна анализа почела је да имплицира да су најчешћи узроци кварова обимно хабање и триболошки процеси на виталним елементима машине и њених делова, [3].

Pranit [4] је у свом мастер раду представио извршење анализе хабања трибометра „*pin on disk*” типа, користећи стандардне димензије делова и сопствене теоријске вредности оптерећења и коефицијената трења. Анализу прате различите варијанте понашања делова при условима без подмазивања и различити постпроцеси у виду програмских команди. Доказано је да са порастом оптерећења расте интензитет хабања и контактни притисак. Испитивање је вршено у оквиру „*ANSYS*” софтвера.

Rajesh и сарадници [5] су анализирали интензитет хабања користећи Арчардов модел методе коначних елемената. Анализа је извршена на „*pin on disk*” трибометру, са пратећим варијантама коефицијента трења, оптерећења, угаоне брзине и дужином пута

хабања. Вршено је поређење са физичким експериментом. Закључак је да аналитички резултати могу пратити резултати добијене физичким експериментима. Испитивање је вршено у оквиру „ANSYS” и „ANOVA” софтвера.

Suresh и сарадници [6] су се водили стандардом ASTM G99 који се односи на поступак испитивања „*pin on disk*” трибометру. Као материјал клина користили су легуре алуминијума са металном матрицом композита. Претпоставка је да дубина хабања није довољан параметар за промену понашања контактеног притиска, али уз употребу коефицијента хабања, добијеним физичким експериментом, извршена је предикција дубине хабања током анализе у оквиру „ANSYS” софтвера. На основу њиховог закључка резултати методе коначних елемената могу бити релевантни показатељи хабања.

Модел за анализу напона приликом присуства трења код парова као што су „*pin on disk*”, може се поредити са физичким експериментом и његовим резултатима. Yunfeng и сарадници [7] користе у раду аналогију теоријског и нумеричког прорачуна, под претпоставком да теоријски резултати су приближни стварним резултатима. Нумеричка анализа је извршена у оквиру „ABAQUS” софтвера.

Holmberg и сарадници [8] су представили нов *PPSP (Performance-Properties-Structure-Processing)* концепт више размера који се заснива на повезивању перформанси хабања и трења помоћу рачунарских модела микро метода коначних елемената са механичким својствима површине, површинском микроструктуром и параметрима обраде облоге. Методе моделирања примењене су на тврдим облогама дебљине 1–5 mm, као што су TiN, DLC и MoS₂, на челику, као и на термички распршеним WC-CoCr облогама дебљине око 200 mm, развијеним кроз „*Process-Mapping*” концепт. Нов приступ нуди потпуно нове могућности систематског и фокусираног развоја материјала отпорних на хабање и облога с ниским трењем у површинама, са циљем контроле и продужења животног века машинских компонената и индустријских алата.

Предвиђање хабања је изазов у машинског индустрији. Стога се рад [9] фокусира на нумеричко предвиђање хабања клинова од нерђајућег челика који клизи по челичном диску, користећи подешавање трибометра *pin on disk*. Експерименти се изводе за оптерећења од 10 N, 30 N и 50 N и брзину клизања од 0,4 m/s. Коефицијент хабања и коефицијент трења добијени из експеримената дати су као улаз у 2D модел еластичних метода коначних елемената помоћу комерцијално доступног софтвера „ABAQUS” заснованог на методи коначних елемената. За добијање дубине хабања на контактним чворовима користи се диференцијални облик Арчардовог закона хабања. „UMESHMOTION+” произвољна Лагранж-Ојлерова техника се користи за ажурирање контактне геометрије након сваког повећања хабања. Резултати нумеричке анализе су даље упоређени са резултатима физичког експеримента.

2. Трибомеханички системи

Развој техничких наука је повезан са производњом техничких система, њиховим проценама, модификацијама и оптимизацијама, као што су производни процеси и репарације. У раној фази машинског инжењерства развијене су техничке науке као што су теорија сечења метала, наука о металима, машински алати и технологија бродоградње. Касније су развијене методологије конструкције и инжењерског дизајна. Научне основе развоја техничких система успостављене су у производним процесима у компанијама и представљају изворе информација за различите стручњаке након преузимања серијских производних процеса. Типични примери тесне повезаности производње и науке су развој и производња електронских рачунарских система, такође и развој космичких наука и космичке технологије, [3].

Са аспекта триболошки исправног конструисања посебно су значајни извршиоци елементарних функција чије је функционисање успостављено фрикционим контактом елемената при њиховом релативном узајамном кретању. У теорији трибологије они су познати као трибомеханички системи (ТМС). У зони фрикционог контакта елемената настају сложени нестационарни физичко-хемијски и механички процеси праћени трењем и хабањем контактних површина. Проблеми трења и хабања су у највећој мери проблеми механике контактеног деловања, хемијских процеса у зони трења и физике дисипативних процеса површинског слоја, [10].

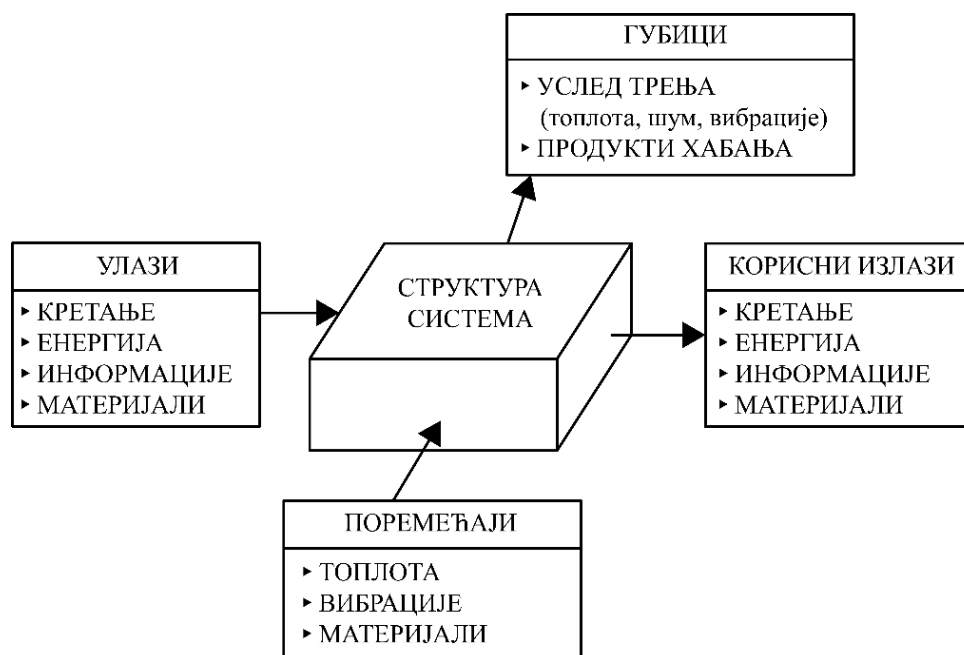
Трибомеханички системи, као динамички извршиоци елементарних функција, од посебног су значаја при конципирању и конструисању машинских система јер одређују поузданост машина у 80% случајева отказа. Шта више, квалитет многих конструкција се најчешће идентификује квалитетом њихових трибомеханичких система. Многобројна испитивања су показала да је век функционалног старења машинских система у принципу знатно дужи од века допуштеног хабања елемената система. Физичко хабање елемената ($1,5 \div 2$ године) протиче много брже од функционалног (моралног) старења ($5 \div 10$ година) машинског система. Основни задатак трибологије је минимизирање прекида између ова два временска периода до границе могућег. Зато је избор и конструисање трибомеханичких система од највећег значаја при конципирању, али и коначном формирању конструкције, [3, 10].

У теорији система системом се назива целина у којој је ред елемената узајамно везан структурно и функционално међусобно одређеним релацијама. Оваква дефиниција означава трибомеханичке системе као целине чије је функционално установљење везано са узајамним контактним деловањем површина у релативном кретању. У техничким, а посебно машинским системима функција система састоји се у преображају улазних у излазне величине. У апстрактном и јако упрошћеном опису, функција различитих трибомеханичких система састоји се углавном у преображају (трансформацији) улазних величина, на пример: кретање, механичка енергија и материјал, у корисне и употребљиве излазне величине. Функционални узрочно-последични однос између улаза и излаза праћен је губицима механичке енергије и материјала идентификованим као губици на трење и хабање, [3, 10].

Користећи основну кибернетску и системску методу за истраживање непознатих или врло сложених динамичких система, трибомеханички систем се може разматрати као „црна кутија” са улазним и излазним величинама, што је приказано на слици 2.1, [10].

Функција као једна од главних карактеристика трибомеханичких система често се може изразити као однос улазних и корисно излазних величина. Не могу сви улази бити пожељни као што ни сви излази нису пожељни. Поједини улази се могу разматрати као

поремећаји који на излазу репродукују и стварају губитке, који не припадају увек истом типу величина као на улазу или корисном излазу, [1, 3, 10].



Слика 2.1. Трибомеханички систем као „црна кутија”, [10].

Са аспекта квалитетног реализовања елементарних функција нама су посебно значајни губици у трибомеханичким системима, а нарочито губици на трење и хабање. Трење као познат процес супростављања кретању елемената система посебно утиче на степен корисног дејства. Основна дефиниција трења обухвата две битне класе релативног кретања као што су клизање и котрљање. Разлика између трења клизања и котрљања је корисна, али у пракси нису толико одвојени, зато што чак и очигледно „чисто” котрљање готово увек укључује мало клизања, [1, 10].

2.1 Подела трибомеханичких система

Деловање поремећајних величина ствара таласно кретање чији се ефекти манифестују у виду вибрације и буке.. Вибрације могу бити у виду периодичних померања елемената трибомеханичких система са већом или мањом учесталошћу, или у виду променљивих еластичних деформација елемената. Енергија ових таласања преноси се на околину, а део енергије одговарајуће учестаности и амплитуде померања преноси се на акустичну средину, стварајући шум вишег или нижег интензитета, [3, 10]

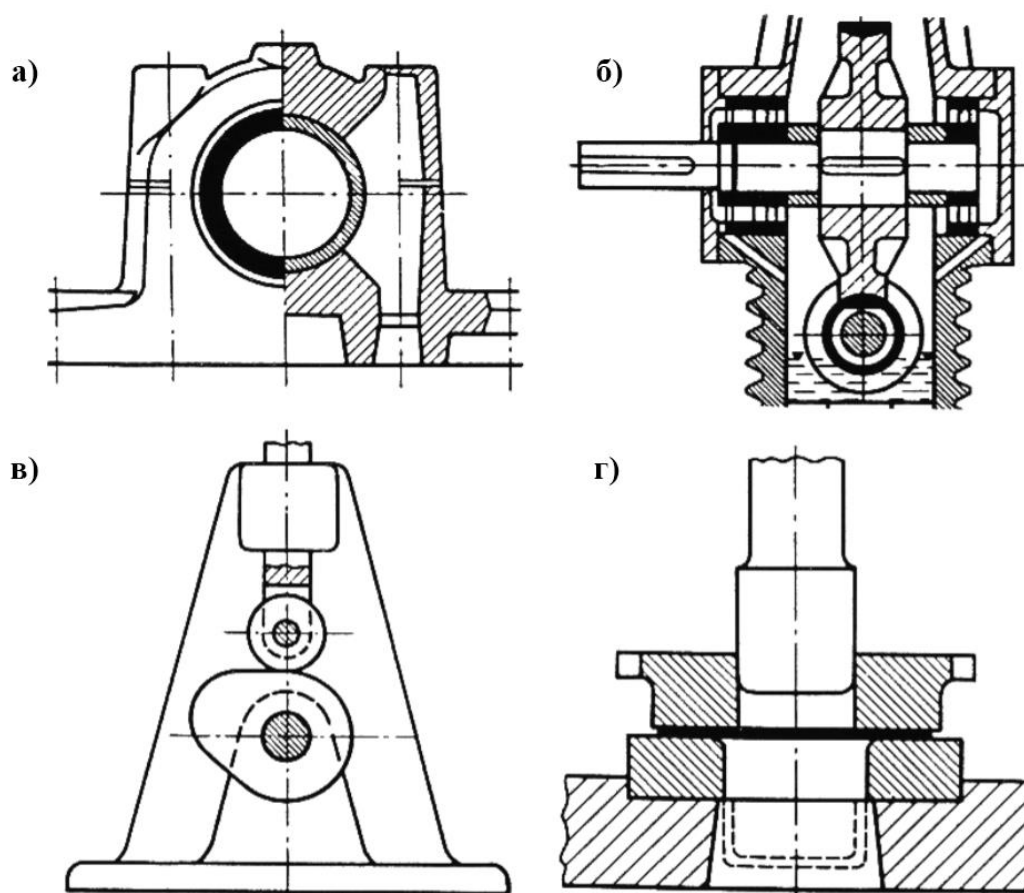
Чињеница да механичка енергија при трењу не ишчезава већ прелази у топлоту успоставља везу између топлотних процеса и трибологије, посебно уколико температурне промене мењају утицај на трење и хабање. На тај начин успоставља се однос између утицаја топлоте као поремећајне величине на процесе вибрација, трења и хабања, [1, 10].

Кретање је најважнија улазна величина сваког трибомеханичког система. Кретање прати и пренос снаге, материјала или информација. У остваривању задатих елементарних функција, трибомеханички системи могу мењати брзину кретања или је потпуно искључити. Могу ограничавати кретање, тј. смањити број могућих степени слободе елемената конструкције. У другим случајевима материјал не само да се креће већ и мења структуру или облик. Трибомеханички системи се користе и за стварање и преображај информација, [1, 3, 10].

Техничка примена елемената у контакту и кретању обухвата широки дијапазон од аерокосмичких објеката до биомеханичких састава. У том смислу је и велики број трибомеханичких система који се користе у процесу конструисања и реализовања конструкције. Да би се трибомеханички системи лакше препознавали и лакше користили као динамички извршиоци елементарних функција при конципирању и обликовању конструкције потребно их је најпре разврстати у основне групе. У зависности од функције коју врше и улазних величина које трансформишу, могућа је подела на трибомеханичке системе за, [3, 10]:

- пренос кретања,
- пренос снаге,
- пренос информација и
- пренос и обраду материјала.

Основне групе трибомеханичких система су приказане на слици 2.2.



Слика 2.2. Основне групе трибомеханичких система

а) пренос кретања, б) пренос снаге, в) пренос информација, г) обрада материјала, [3].

Са аспекта проучавања триболошких процеса и формирања систематизованих информација нама су посебно значајни основни трибомеханички системи. Триболошки процеси одвијају се у основним трибомеханичким системима које чине два елемента у контакту у присуству мазива као трећег елемента. Окружење као четврти елемент употпуњује структуру основног трибомеханичког система, [1, 10].

Набројани трибомеханички системи нису једнаки ни по својој структури ни по својој хијерархијској припадности. За њих важе следећа правила, [10]:

- системи припадају класама различитих нивоа сложености,
- све законитости (логичке и емпиријске) система нижег нивоа, примењиве су такође за сваки систем вишег нивоа, насталог обједињавањем више система ниже класе и
- са порастом нивоа система расте и број непознатих елемената и неоткривених законитости које опредељују рад конкретних система.

Претходна подела је општа и потребно је разлагати је даље, обзиром на то формирана је табела трибомеханичких система који се често користе у конструисању (табела 2.1).

Табела 2.1. Трибомеханички системи често коришћени у конструисању, [10].

Главне улазне величине	Главна излазна величина	Основна функција система	Трибомеханички системи (ТМС)
Кретање + Енергија	Кретање	Пренос обртног кретања у попречном правцу	• клизна лежишта • куглични и ваљчани лежаји • игличасти лежаји • упорни лежаји • жироскопски лежаји • вођични лежаји • куглично-навојни механизми
		Пренос обртног кретања у уздужном правцу	• прирубнице • озубљени спојеви • ожљебљени спојеви • полигонални спојеви • конусни спојеви • колутни спојеви • тракасти спојеви • зглобови
		Пренос праволинијског кретања	• клизне вођице • котрљајне вођице
		Заустављање кретања	• папучасте кочнице • тракасте кочнице • кочнице са добошем • фрикциони пригушивачи • бравасте спојеви
	Снага	Пренос снаге	• равни цилиндрични зупчасти преносници • цилиндрични зупчасти преносници • конични зупчасти преносници • хипоидни зупчасти преносници • планетарни преносници • пужни преносници • ланчани преносници

Табела 2.1. Трибомеханички системи често коришћени у конструисању, [10]. (наставак)

Кретање + Енергија	Снага	Пренос снаге	• каишни преносници • ремени преносници • фрикциони преносници • планетарни фрикциони преносници • зупчасти каишни преносници • навојни преносници • кардански преносници • варијатори • еластична вратила • ужни погони • дизалице са навојним вretenом • хидраулични преносници
	Информација	Производња информација	• сатни механизми • брегасти механизми • кривајни механизми • ексцентарски механизми • малтешки механизми • склопови штампарских машина • склопови рачунарских машина • електро-контактни механизми
		Репродуковање информација	• рачунарске магнетне главе • уређаји са контактним прстеновима • скидачи звука • скидачи видео сигнала
Кретање + Материјал	Материјал	Премештање материјала	• точак-шина • гума-пут • цевоводи • склопови конвејера • ведрице роторних багера
		Регулисање тока материјала	• заптивке • вентили • филтери • клипни склопови
		Обликовање материјала	Алат-предмет обраде за: • извлачење жице • дубоко извлачење • пробијање • просецање • савијање • екструзију • ковање • ваљање • ливење • ливење под притиском • делови предионица

Табела 2.1. Трибомеханички системи често коришћени у конструисању, [10]. (наставак)

Кретање + Материјал	Материјал	Прекид материјала	Резни елементи за: • одвајање руде • бушење бушотина • површински откоп • дробљење • копање тла
		Обрада материјала	Алат-предмет обраде за: • сечење • обраду раздвајањем • одсецање • стругање • глодање • рендисање • бушење • унутрашње стругање • брушење • леповање • полирање • хоновање • пескарење • фарбање

Претходна табела не претендује на потпуност и коначно побројавање, већ више указује на широку примену трибологије у машинским системима, [10].

2.2 Основне карактеристике група ТМС-а

За триболошки исправно конструисање неопходно је знање и поседовање бројних триболошких информација. Њих конструктор користи не само при избору трибомеханичких система за извршење елементарних функција и конципирање конструкције већ и много више при формирању конструкције и детаљном конструисању, [2, 10, 11].

2.2.1 Трибомеханички системи за пренос кретања

- Трибомеханички системи за пренос обртног кретања у попречном правцу

Основна функција трибомеханичког система ове групе је пренос обртног кретања у попречном правцу, попречном у односу на уздужне осе конструкције. Истовремено, реализују и преношење оптерећења са покретних на непокретне делове конструкције. Како је обртно кретање најчешћа врста кретања многих конструкција, несумњив је значај ових трибомеханичких система. Најтипичнији представници ове групе трибомеханичких система су клизна лежишта и котрљајни лежачеви, [10]

- Трибомеханички системи за пренос обртног кретања у уздужном правцу

Основна функција ове групе трибомеханичких система је пренос обртног кретања у уздужном правцу, односно спајање саосних елемената посебних функционалних структура. Поред ове основне функције преносе и оптерећење, односно обртне моменте. Типични трибомеханички системи за реализовање ових функција су спојнице, прирубнице и спојеви (озубљени, ожљебљени, конусни...), [10].

- Трибомеханички системи за пренос праволинијског кретања

Основна функција ове групе трибомеханичких система је пренос праволинијског кретања у циљу обезбеђивања потребног међусобног положаја покретних склопова у односу на непокретне склопове једног те истог машинског система. Реч је о својеврсном вођењу и дефинисању тачне путање кретања покретних склопова машинских система различитих општих функција. Типични представници ове групе трибомеханичких система су вођице за праволинијска кретања, које по својој конструкцији и начину обезбеђивања основне функције могу бити клизне и котрљајне вођице, [10, 11].

- Трибомеханички системи за заустављање кретања

Трибомеханички системи ове групе извршиоца елементарних функција успоравају и заустављају кретање али могу и да регулишу брзину кретања обезбеђујући кретање са успоравањем или убрзањем. Између осталог, заустављање кретања је и предуслов за измену правца кретања. Основне карактеристике трибоелемената ових система су непокретност једног од елемената и узајамна деловања у екстремно неповољним условима. При формирању структуре уграђена је и потреба свесног повећања силе и коефицијента трења као потврда вишезначног предзнака трења као природног процеса. Трибомеханички системи за заустављање кретања су кочнице различитих конструкционих решења и начина реализовања основне функције система, [10].

2.2.2 Трибомеханички системи за пренос снаге

Трибомеханички системи за пренос снаге, познати у техници као механички преносници, служе за пренос енергије механичког кретања на даљину као и за преображај њених параметара. Истовремено преносе и обртна кретања, [2, 10].

Општа намена преносника чврсто је повезана са извршењем елементарних функција, међу којима су најкарактеристичније: расподела енергије, смањење или повећање брзине, промена врсте кретања, регулисање брзине, покретање, заустављање, промена смера и друго. Пренос снаге и механичког кретања може се остварити на више различитих начина и различитим преносним механизмима, па се зато механички преносници деле у две велике групе: преносници снаге обликом и преносници снаге трењем, [10, 11].

Преносници снаге спадају у групу највише коришћених трибомеханичких система.

- Преносници снаге обликом

Преносници снаге обликом заснивају своје функционисање на специфичном облику трибоелемената и одговарајућим законима спрезања контактних површина. У ову групу спадају следећи преносници, [2, 10]:

- зупчасти,
- ланчани,
- зупчасти каишни,
- пужни,
- навојни,
- планетарни зупчасти,
- кардански,
- варијатори са спрезањем...

У зони фрикционог контакта механичких преносника и узајамног деловања елемената система настају сложени нестационарни механички и физичко-хемијски процеси, као и процеси трења и хабања. Код механичких преносника код којих се функционисање система постиже геометријским обликом присутно је спољашње трење, трење које се јавља у зонама контакта елемената система при релативним кретањима: удар, котрљање и клизање, [10, 11].

- Преносници снаге трењем

У механизму преноса снаге и кретања трењем у принципу је садржана молекуларно-механичка природа трења. Представници преносника снаге трењем су, [2, 10]:

- каишни преносници,
- ремени преносници,
- фрикциони преносници,
- планетарни фрикциони преносници и
- фрикциони варијатори.

Процес супротстављања релативном кретању тела искоришћен је за основну функцију и намену преносника. Данас се механички преносници снаге трењем највише користе у условима континуалне промене преносног односа и излазног броја обртаја. Удео ових преносника у општој продукцији континуалних преносника је највећи, [10].

2.2.3 Трибомеханички системи за пренос информација

Производња, репродукција као и сам ток информација су битни саставни део машинских система. Информација као лимитирани носилац података и сигнала је, у првом реду, управљачка величина, али и обавештење о процесу који се одвија у систему. Информације се формирају квантифицирањем параметара елемената система (димензије, положај, брзине, силе, температура, електрични напон или неке друге физичке величине). Регистровањем, повезивањем, упоређењем карактеристичних параметара формирају се информације које омогућавају управљање системом, али и регулисање процеса у систему. Понекад су информације и логично решење опште функције, [10, 11].

Формирање и управљање информацијама у машинским системима уско је повезано са степеном аутоматизације у систему, али и мера сложености и квалитета конструкције. Информације се преносе неком врстом енергије која је обично мала и коју је понекад тешко разликовати од основног тока укупне енергије као улазне величине, [10].

- Трибомеханички системи за производњу информација

Производња и формирање информација најчешће се у машинским системима остварује механизмима, различитим по структури и основној функцији. У том смислу неопходно је добро познавање теорије механизма, али не само са аспекта кинематских карактеристика, већ и са аспекта њихових триболошких својстава. Брегасти механизми као чести и одговорни чланови машинских система нарочито велику примену имају код мотора са унутрашњим сагоревањем, машина алатки, текстилних и пољопривредних машина, али и код рачунарских машина, инструмената и многих других аутоматских и полуаутоматских машина и уређаја, [10].

2.2.4 Трибомеханички системи за пренос и обраду материјала

Материјал као улазна величина трибомеханичких система може бити сировина, полупроизвод, машински део, течност, гранулат, прашина, гас и друго. Посредством трибомеханичких система материјал се може преносити и премештати, обликовати и обрађивати. Трибомеханички системи се користе и за прекид материјала, али и за регулисање тока кретања материјала. Широка лепеза основних функција система заједничке главне излазне величине удружује велики број трибомеханичких система различитих структура, [2, 10].

- Трибомеханички системи за пренос материјала

Премештање и пренос материјала се у техничком свету, али и у реалном животу, врши различитим машинским системима. Различитим по својој структури, намени, универзалности, врсти материјала који преносе итд. Са аспекта универзалности, значаја, општег коришћења у реалном животу и њиховог утицаја на развој цивилизације од посебног су значаја транспортна средства. Посебно друмска и шинска возила. Посматрајући друмска и шинска возила у равни триболошких процеса и триболошки исправног конструисања, али и поузданости, стабилности и безбедности кретања посебно су значајни ходни елементи и трибомеханички системи точак-подлога, [10].

- Трибомеханички системи за обликовање материјала

Прерада материјала и његова трансформација у полуфабрикат или готов производ остварује се применом различитих технологија машиноградње. Технологија механичке обраде, као једна од група технологија машиноградње, обухвата две основне групе поступака обраде: обраде без скидања струготине и обраде са скидањем струготине. Обрада метала деформисањем припада првој групи поступака где се под овом обрадом подразумева трајно (пластично) обликовање материјала под дејством спољних сила. У току процеса пластичног обликовања долази до значајних квалитативних промена у материјалу, тако да се његова механичка, технолошка и друга својства најчешће значајно разликују од својстава које је материјал имао пре обраде, [2, 10, 11].

- Трибомеханички системи за обраду материјала

Прерада материјала и израда различитих делова, подсклопова, склопова и производа остварује се применом различитих технологија машиноградње. Са аспекта значаја трибомеханичких система у реализовању основне функције посебно место заузима технологија механичке обраде или, још прецизније, обрада метала резањем. Обрада метала резањем је скуп поступака чији је основни задатак израда делова уклањањем вишка материјала и променом облика и димензија. При томе се мења храпавост обрађене површине као и карактеристике површинског слоја. Уклањање веће количине материјала постиже се поступцима као што су, [10]:

- стругање,
- глодање,
- бушење,
- рендисање и др.

Остваривање потребног нивоа квалитета обраде реализује се развртањем, брушењем, хоновањем и сличним поступцима, [10].

3. Триболошка испитивања – Трибометри

Реч „трибометар” је прво употребљена 1774. године као назив за инструмент предвиђен за мерење трења, док је понекад коришћен и за осталу апаратуру. Инструментација и опрема за потребе триболошких испитивања материјала могу бити комерцијални или израђени ради задовољавања анализе специфичних симулација контакта. У већини случајева комерцијално доступна испитивања могу бити релативно лако адаптирани за различите услове, [1, 11].

Разлози тестирања помоћу трибометра су, [12]:

- упоређивање материјала који се користе за исте компоненте,
- селекција материјала за нову употребу,
- општа карактеризација хабања и трења код материјала,
- тестирање механизма хабања код специфичних триболошких апликација итд.

Подела тестирања према степену реализма, од најреалнијег ка мање реалним, [12]:

- Триболошки парови:

- теренски тест (аутомобил на путу),
- лабораторијски тест,
- тестирање подсистема и
- тестирање компоненте.

- Полу-триболошки парови (испитивање поједностављене компоненте) и

- Тест модела (нумеричка анализа, теоријска анализа...).

Сваки тест може се даље поделити у зависности од њихових карактеристика. Претходно поменути тестови су настали честом потребом за унапређење постојећих материјала, испитивање нових материјала или конструисање нове машине или система, [12].

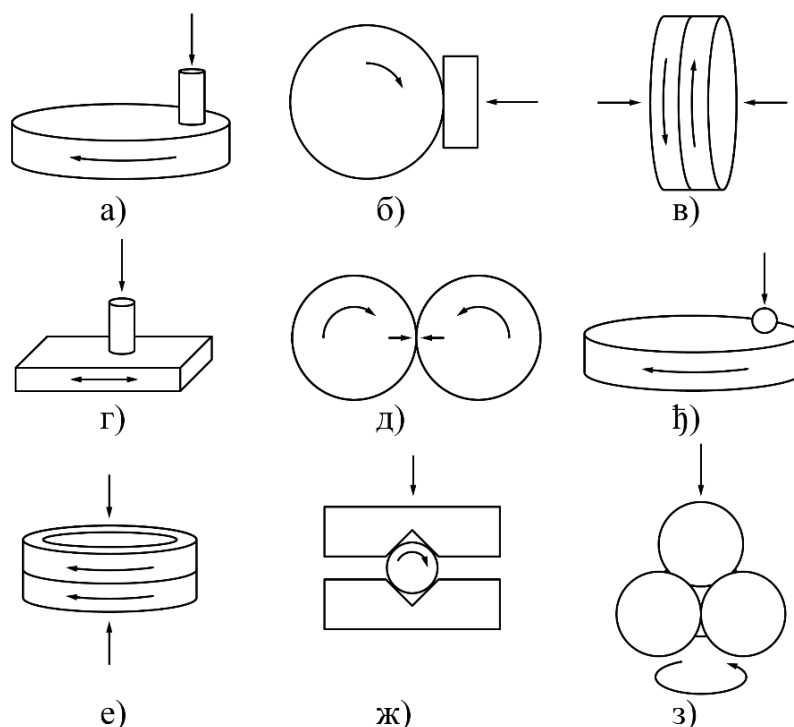
У оквиру тестирања хабања код клизања, главни аспекти који се морају узети у обзир су, [1]:

- материјали који се користе за израду два тела у контакту и у неким ситуацијама и метода обраде и припрема површина,
- геометрија узорака за тестирање - облик и димензије,
- примењено оптерећење и притисак контакта,
- брзина клизања и
- окружење тестирања (природа окружења око контакта, укључујући његову температуру).

Типичан тест може се састојати из следећих корака, [11]:

- динамички и статички елементи морају бити проверено монтирани и нивелисани,
- полуга/рука мора бити у равнотежи тако да тег одговара тачно жељеном оптерећењу. Најчешће се користе и контратегови како би се остварила савршена равнотежа,
- статички елемент се налази у контакту са узорком,
- када испитивање почне узорак почиње да се окреће унапред подешеном брзином,
- сигнал трења се бележи као функција растојања, времена или броја кругова.

Нека од испитивања трибометрима су приказана на слици 3.1.



Слика 3.1. Шематски приказ најчешће коришћених трибометра: а) клин по диску (*pin-on-disk*); б) блок по диску (*block-on-disk*); в) диск по диску - бочно (*flat-on-flat*); г) клин по плочи (*pin-on-flat*); д) диск по диску (*twin disk*); е) куглица по диску (*ball-on-disk*); е) прстен по прстену (*ring-on-ring*); ж) клин по v-блоку (*pin and vee-block*); з) четири куглице (*four-ball*), [1, 11].

Најчешће коришћени трибометри поседују клин или блок у контакту са диском, на равну страну (слика 3.1.а) или бочну страну (слика 3.1.б). Код геометрије која се користи за испитивање хабања код клизања, углавном је контакт асиметричан, природа контакта једног тела у односу на друго тело не испољава исте карактеристике. Кључна разлика је обично та да је тачка на површини једног тела у контакту са другом површином током теста, док је за друго тело тачка на његовој површини само у повременим контакту са другим телом, [1].

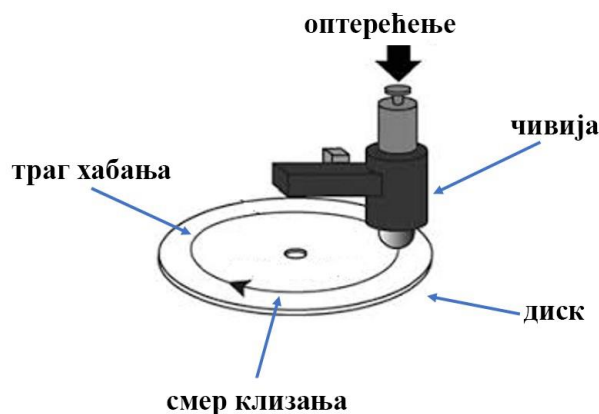
Већина трибометара користе сличну методологију испитивања, разликују их стандарди и облици делова који се испитују. Обзиром на то у даљем раду су приказани карактеристични тестови којима могу да се опишу сви њима релевантни преостали тестови.

3.1 Клин по диску (*Pin on disk*)

Популарност методе се изражава кроз њену релативну једноставност и обим триболошких контаката који се могу испитати помоћу исте. Могу се испитати контакти завртња, шине и шинског точка па све до биолошких импланта. Тест обично омогућава тестирање неколико режима кретања, као што су, [13, 14]:

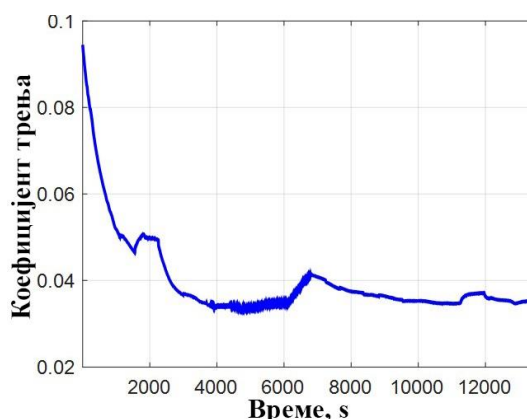
- једносмерни,
- френтинг модови и
- недавно било који други сложени правац кретања.

Типично се ови тестови изводе према следећим стандардима: ASTM G99, ASTM G133 и ASTM F732. Шематски приказ теста се налази на слици 3.2.



Слика 3.2. Шематски приказ „pin on disk” трибометра, [13].

Непомични клин је притиснут на ротирајући диск под датим оптерећењем. Клин може бити било ког облика, међутим, најпопуларнији облици су сферни и цилиндрични због лакоће поравнања (равни клинови су обично подложни одређеном неусклађивању што може довести до неуједначеног оптерећења и потешкоћа за теоријску анализу). Током испитивања непрекидно се надгледају сила трења, хабање и температура. Типично мерење криве трења забележено током оваквог тестирања је приказано на слици 3.3, [13].



Слика 3.3. Крива трења у зависности од времена при брзини клизања од 0,05 m/s, [13].

Са претходног дијаграма се може приметити да коефицијент трења временом опада. Ово понашање је типично за мерење трења и приписује се периоду уходавања. Током уходавања топографија површине се мења, хемијске реакције се одвијају све док систем не дође у стабилно стање. Након тога се коефицијент трења обично пријављује као релевантан резултат. Тест се може изводити у условима са подмазивањем и без подмазивања, обично су клин и диск потопљени у уљу, [13].

Након одређеног броја циклуса, тест се зауставља и даљи кораци обраде података укључују анализу површинске топографије за одређивање запремине хабања и еволуцију храпавости површине, скенирајућу електронску микроскопију / рендгенску анализу дисперзивне енергије за хемијски састав / анализу честица, трибофилмове, микро-структурне анализа. Ако је испитивање изведено у подмазаном стању, уље се такође може анализирати на величину честица хабања и погоршање адитива, [13].

При планирању овог теста потребно је узети у обзир следеће факторе, [13]:

- Облик клина. Типично, клин може бити било ког облика.
- Поравнање клина. Ако је клин равно завршен, треба осигурати поравнање, јер у супротном долази до неуједначеног оптерећења што доводи до неједноликог хабања и могућег преоптерећења. Ивице равних узорака не би смеле бити оштре, у супротном може доћи до уситњавања.
- Материјал клина. Избор материјала за клин је веома важан. Треба имати на уму да се триболошко понашање истог пара материјала разликује у зависности од тога који се материјал користи за клин, а који за диск. Ово се посебно односи на случај контакта између „меких” и „тврдых” материјала. Ова разлика долази из чињенице да се хабање углавном јавља на мекшем материјалу. Ако је диск мекши, тада ће се на њему створити жлеб и доћи ће до хабања.
- Локација клина. На врх диска је могуће поставити клин. Међутим, у многим случајевима диск се притиска клином са доње стране. Обично се то ради како би се избегло поновно довођење у контакт честица хабања након што се формирају или ради сакупљања честица хабања за даљу анализу. Због гравитације, честице хабања ће падати.

Модерним трибометрима се могу анализирати трагови хабања помоћу уграђених система за снимање, као што су оптички профилометри, атомски микроскопи итд. Ова анализа се такође може извршити неколико пута током теста, што даје могућност мерења брзине хабања, запремине хабања, интензитет хабања, хрпаваост површине итд. Ове информације могу се користити за развој тачних модела хабања и прелазак на предиктивну трибологију, [13].

3.2. Блок по диску (*Block on disk*)

Према стандарду ASTM G77, који се односи на триболошка испитивања помоћу блока и прстена односно диска, ово испитивање се користи за потребе одређивања отпора материјала услед хабања при клизању, рангирањем појединих парова материјала према карактеристикама хабања под различитим условима. Битна особина овог теста је да је веома флексибилан, јер се сваки материјал може тестирати, све док се може релативно лако производити у блокове или прстенове. Испитивање се може извести са или без подмазивања разним мазивима, течностима или гасовима како би се симулирали услови рада са највећом тачношћу. За контакт у тачки користи се конфигурација са куглицом и прстеном/блоком, [11, 14, 15]. Приказ „*block on disk*” теста се налази на слици 3.4.



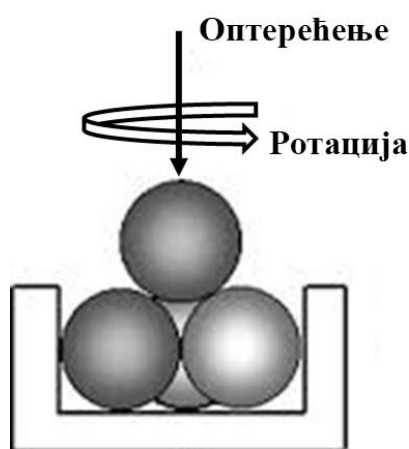
Слика 3.4. Приказ „*block on disk*” теста, [15].

Разне машине су доступне за комерцијално испитивање овог теста, мада се могу разликовати према полужном односу, распону оптерећења, контроли брзине

(променљива или фиксна), опсегу брзине и начину мерења трења (ако постоје). Поред мерења отпорности материјала на хабање услед клизања, ова метода се често користи за мерење својстава хабања и својстава екстремног притиска мазива и масти. Оваква конфигурација се такође може мењати тако да пружа различите геометрије контакта између узорака за тестирање, који су обично у виду линије, површине или тачке, [11, 14, 15].

3.3. Четири куглице (*Four ball*)

Подмазивање уљем и технологије подмазивања су кључне за смањење трења и хабања у машинама. Кључ ефикасности фрикционог система је мазиво (маст, уље или чврста мазива). Метода тестирања са четири куглице користи се за карактеризацију својстава мазива, као што су спречавање хабања, екстремни притисак и понашање трења. Шематски приказ теста се налази на слици 3.5, [16].



Слика 3.5. Шематски приказ „four ball” теста, [16].

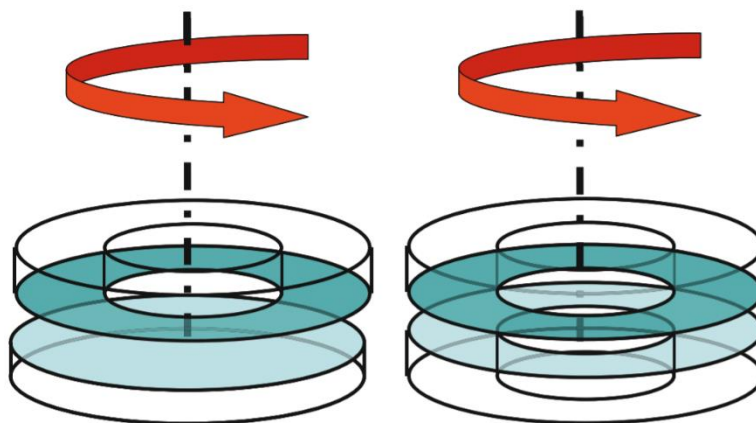
Тест се састоји од четири куглице у конфигурацији једнакоугаоног тетраедра, као што је приказано на слици изнад. Горња кугла се окреће и у контакту је са доње три куглице које се држе у фиксном положају.

Када се испитују особине мазива под екстремним притиском, утврђује се способност мазива да функционише под екстремним условима притиска. Тест започиње при „малим” оптерећењима - оптерећењима при којима мазиво добро функционише, развија се одговарајући филм мазива и не открива се траг хабања. Оптерећење се постепено повећава према испитном стандарду све док подмазивање не закаже, што значи да филм мазива више не може раздвајати површине и након тога постоји контакт површине са површином. Као последњи корак, оптерећење се повећава све док се не догоди хаварија. Ова хаварија се назива „заваривање” и карактерише га повећани ниво буке, оштре промене сигнала трења итд. На основу перформанси мазива у овом тесту могу се развити различите формулације, [16].

Тест са четири куглице такође се може користити за мерење перформанси мазива у односу на хабање. Током теста горња кугла се ротира у односу на остале куглице које су фиксирани. Оптерећење се изводи у фиксним условима (оптерећење, температура, брзина итд.), за разлику од теста екстремног притиска. После теста, мерења трагова хабања врши се, на пример, оптичком профилометријом и могу се користити за процену перформанси мазива у односу на хабање. Сила трења се такође мери током овог испитивања и стога се такође може анализирати, [16].

3.4. Прстен по прстену (*Ring on ring*)

Ротирајући прстен на непокретном диску или на другом прстену је најповољнији тест уколико је потребан контакт површине између $10\text{--}1000\text{ mm}^2$. То су случајеви у којима треба симулирати системе са познатим утицајем површинске структуре. Да би се постигли релевантни контактни притисци, потребна су велика аксијална оптерећења. Контакт подручја је потребна посебна брига како би се обезбедило реално подмазивање испитних делова, јер се обично постиже локално исцрпљивање мазива. Стога се ова поставка испитивања углавном користи за студије граничног подмазивања или за чврста мазива, [15].



Слика 3.6. Приказ „ring on disk” (лево) и „ring on ring” (десно) тестова, [15].

ASTM D 3702 описује поставку хоризонталног ring on ring теста за самоподмазујуће материјале, понекад коришћене за дебеле филмове чврстих филмских мазива. Овај тест користи ротирајући прстен спољашњег радијуса од $13,5\text{ mm}$ и ширине $1,5\text{ mm}$, дајући површину од 128 mm^2 , [15].

3.4 Параметри који утичу на хабање

Хабање као облик одвођења материјала са контактних површина утиче на измену техничких параметара и промене у функционисању система. У највише практичних примера контакт се остварује посредством трећег елемента, односно мазива. Због распрострањености у пракси, хабање услед клизања највише се испитује, па тако и у овом раду су касније објашњени стандардни типови испитивања трибомеханичких система. Природа понашања и мера хабања зависе од напона и механичких оштећења, термичких ефеката, хемијских реакција и интеракција међу површинама, [1, 10].

Деловање поремећајних величина ствара таласно кретање чији се ефекти манифестују у виду вибрације и буке. Вибрације могу бити у виду периодичних померања елемената трибомеханичког система са већом или мањом учесталосту или у виду променљивих еластичних деформација елемената. Чињеница да механичка енергија при трењу не ишчезава већ прелази у топлоту успоставља везу између топлотних процеса и трибологије, посебно уколико температурне промене мењају утицај на трење и хабање. На тај начин успоставља се однос између утицаја топлоте као поремећајне величине на процесе вибрације, трења и хабања, [10].

Добро је познато да ниједан механизам хабања не ради у широком опсегу радних услова. Прелази у доминантним механизмима хабања јављају се како се мењају услови рада. С тим у вези, учињени су напори на изради мапа механизма хабања. Мапа механизма хабања приказује различите режиме хабања у широким радним условима, [11].

Нормално оптерећење: Повећање нормалног оптерећења резултира повећањем стварне површине контакта, а тиме и броја лепљивих спојева. Генерално се наводи да је губитак хабања пропорционалан примењеном нормалном оптерећењу током клизања. Арчард је уочио прелаз са благог на озбиљно хабање, када је контактни притисак око трећине тврдоће метала. То је због интеракције пластичних зона испод контактних неравнина. У режиму великог оптерећења долази до механичких оштећења материјала услед великих површинских напрезања. Такође повећање оптерећења резултира монотоним повећањем температуре споја, што смањује напрезање течења материјала. Стога је јасно да је интензитет хабања материјала линеарна функција нормалног оптерећења. Међутим, стопа повећања брзине хабања не остаје константна током опсега нормалног оптерећења, [1, 11].

Брзина клизања: У сувом клизном стању, са повећаном брзином клизања, произведена топлота трења постаје већа што узрокује оксидацију и ствара површину оксида на површини. Овај оксидни филм служи као мазиво које смањује брзину хабања метала. У случају подмазаног стања, при већој брзини клизања, стварање хидродинамичног филма мазива у контакту минимизира интензитет хабања. Нормално, интензитет хабања метала опада са брзином клизања како у сувим, тако и у подмазаним условима клизања. Међутим, ако температура на површини досегне тачку топљења метала, то драстично смањује тврдоћу метала и узрокује велико хабање, [1, 11].

Температура: Температура је важан параметар који утиче на реакцију хабања метала убрзавајући хемијску реактивност металне површине, мењајући физичка и механичка својства метала и мењајући микроструктурни одзив метала. Да би се проучио утицај температуре, изведени су клизни тестови на пару кобалт-челик на различитим температурама. Примећено је да је стопа хабања при 380°C око 100 пута већа од оне забележене при 280°C, [1, 11].

Околина: У амбијенталним условима на површини метала лако се ствара оксидни филм, а ако је оксидни филм довољно јак да спречи директан контакт између металних површина, стопа хабања метала биће мала у поређењу са инертном атмосфером. Могло би се очекивати да је интензитет хабања метала већа у вакууму него у ваздуху због мање шансе за стварање оксидних филмова. То доводи до директног контакта метала и резултира великим хабањем [1, 11].

Тврдоћа: Арчардов модел сматра интензитет хабања метала инверзном функцијом њихове тврдоће. Тврђи материјали одолевају резању и продирању. У случају абразивног хабања, лако је повезати тврдоћу са брзином хабања, јер укључује процес продирања, [11].

Модул еластичности: Отпорност на хабање материјала директно је повезана са модулом еластичности у складу са теоријом адхезивног хабања. За метале који имају високи модул еластичности смањује се стварна површина додира што доводи до слабе адхезије и хабања. Отпорност на абразивно хабање материјала такође може да варира променом односа тврдоће/модула (тј. односа H/E). Однос показује да се абразивна отпорност на хабање материјала може повећати или повећањем тврдоће или смањењем модула еластичности, [11].

Отпорност на лом: Велика жилавост на лом повећава отпорност на хабање ломљивих материјала као што је керамика. Током интеракције асперитета, раст пукотина се јавља са критичном количином соја. Ако је напрезање мање од критичног, брзина хабања метала не зависи од жилавости лома. Једном када се постигне критично напрезање, повећана је вероватноћа раста пукотина, а интензитет хабања метала зависи од

жилавости лома. Хорнбоген је предложио модел да постоје три региона хабања у функцији жилавости лома. У првом региону на хабање не утиче жилавост у којој се поштује Арчардов закон. Друга регија укључује прелазак са благог на озбиљно хабање. Фактори који индукују прелаз су повећани притисак, брзина напрезања и смањена жилавост лома. Трећа регија је стање крхкости које показује висок интензитет хабања због ниске жилавости лома, [11].

Кристална структура материјала: Клизање метала производи велике пластичне деформације, које заузврат формирају дислокационе структуре ћелијског зида у близини површинског подручја. Будући да ћелијски зидови служе као пут за површинске пукотине, метали са ограниченим бројем клизних система показују нижи интензитет хабања од метала са великим бројем клизних система. Бакли је експериментално показао да се кубични кристали хабају отприлике двоструко брже од хексагоналних кристала, [11].

Термичка дифузивност: Ако метал има малу топлотну дифузивност, он не може одводити топлоту трења даље од контакта. Ова термичка акумулација погоршава механичку чврстоћу метала и узрокује велико хабање. Хабање је инверзна функција топлотне дифузности. Абдел-Ал повезао је способност одвођења топлоте метала са прелазом хабања. Претпоставио је да се прелазак са благог на озбиљно хабање догађа када је количина произведене топлоте већа од количине одвођене топлоте. Такође је приметио да ако количина топлотне акумулације достигне критичну вредност, деламинација оксидне љуспице резултира већи интензитет хабања, [11].

4. Моделирање трибомеханичког система

Нумеричка анализа је проучавање алгорита који користе нумеричку апроксимацију за проблеме математичке анализе. Такви проблеми углавном потичу из стварних примена алгебре, геометрије и рачуна, а укључују променљиве које се континуирано разликују, [4, 17].

Тачност података добијених аналитичком методом није обећавајућа, из простог разлога што се за прорачун користи поједностављен модел. Нумеричке методе као што је метода коначних елемената се заснива на прорачуну математичког модела са правом геометријом. Структурна анализа користећи методу коначних елемената је много прецизнија у односу на аналитичку, која такође пружа и могућност брзих поновљивих прорачуна уколико се врше модификације елемената.

Метода коначних елемената проналази примену у разним инжењерским проблемима, као што су, [17]:

- структурна анализа,
- модална анализа,
- анализа умора,
- пренос топлоте,
- пренос топлоте унутар склопова,
- анализа процеса производње,
- симулација флуида,
- структурна интеракција течности и
- анализа отказа.

Као једна од најбитнијих техника анализе, метода коначних елемената поред својих предности поседује и неке недостатке. Предности и недостаци методе коначних елемената су приказани у табели 4.1.

Табела 4.1. Предности и недостаци методе коначних елемената, [17].

Предности	Недостаци
• Осетљивост на комплексност геометрије • Могућност анализирања велике већине инжењерских проблема као што су механика чврстих тела, динамика, топлотни проблеми, ток флуида и електростатички проблеми • Могућност решавања комплексних граничних услова на примерима механике чврстих тела са много постављених ограничења • Могућност решавања комплексних услова оптерећења на примерима концентрисаних или континуалних оптерећења и временски зависних оптерећења	• Апроксимативна решења уместо затворених аналитичких решења • Постојање инхерентних грешака изазване од стране нумеричких прорачуна и идеализација модела • Ослањање на валидност и верификацију резултата симулације од стране конструктора

Анализа методом коначних елемената се заснива из следећих корака, [17]:

- **Рашчлањавање (дискретизација коначних елемената).** Континуирани домен се дискретизује у колекцију облика или елемената, чворови сваког елемента су одређени. Јасно се дефинишу везе у склоповима елемената као и везе између елемента и чворова. Због променљивог стања чворова који су дефинисани као променљиве величине елемента, интерполацијске функције су дефинисане да опишу промену било које позиције чвора унутар елемента просечном вредношћу.

- **Развијање елемената модела.** Тип анализе се бира на основу физичког понашања модела. Бирају се конструкцијске променљиве и математички модел са одговарајућим једначинама. Затим се математички модел конвертује у елементе модела апроксимацијом методама као што су директна метода, метода минималне потенцијалне енергије или метода резидуалног мерења.

- **Склапање.** Базирано на већ постављеним везама међу елементима, елементи модела у локалним координатним системима се трансформишу у елементе модела у глобалном координатном систему, затим су склопљени унутар системског модела унутар глобалног координатног система.

- **Дефиниција граничних услова и оптерећења.** Интеракције физичког система унутар своје примене су дефинисане и представљене као гранични услови и услови оптерећења на моделу.

- **Решавање примарних непознатих.** Довољан број граничних услова осигурава да се анализа одвија и да је проблем решив. Систем оваквог модела обично поседује велики број линеарних једначина. Бројни одлично програмирани алгоритми се користе за рачунање непознатих величина у оквиру система модела.

- **Рачунање зависних променљивих.** Конструкцијске променљиве величине у једном механичком систему могу бити класификоване као независне променљиве и зависне променљиве. На пример, напон и напрезање су зависне величине међусобно, дакле или напон или напрезање се могу изабрати као независна величина док ће друга величина бити решена на основу карактеристика материјала. Након што се независне променљиве величине реше, постпроцесирање покреће алгоритме за рачунање зависних променљивих.

Проблем који је представљен у овом раду се проналази у фрикционом контакту између диска и блока. За потребе решавања овог проблема коришћен је „ANSYS” софтвер, уз помоћ посебне технике (подпрограма) решавања која се назива „Newton-Raphson” техника, која је изворно Њутнова нумеричка метода за решавање нелинеарних једначина равнотеже.

4.1 Нелинеарна анализа

Нелинеарна структурна анализа је предвиђање одзива нелинеарних структура симулацијом заснованом на моделу. Симулација укључује комбинацију математичког моделирања, метода дискретизације и нумеричких техника. Дијаграм одзива променљивих карактерише само грубо понашање конструкције, јер се то може тачније посматрати спровођењем експеримента на физичкој машини за тестирање. Даљи увид у извор нелинеарности потребан је да би се такво физичко понашање забележило математичким и рачунским моделима за рачунарску симулацију, [4, 17].

4.1.1 Узроци нелинеарног понашања

Нелинеарно структурно понашање настаје услед бројних узрока, који се могу груписати у 3 главне категорије и то:

- промена статуса (контакта),
- геометријске нелинеарности и
- нелинеарности материјала.

Промена статуса (контакта)

Многе уобичајене структурне карактеристике показују нелинеарно понашање које зависи од статуса. Промене статуса могу бити директно повезане са оптерећењем или их може одредити неки спољашњи фактор односно узрок. Ситуације у којима долази до контакта заједничке су многим различитим нелинеарним апликацијама. Контакт чини препознатљив и важан подскуп категорије нелинеарности, [4, 17].

Геометријске нелинеарности

Ако структура доживи велике деформације, њена променљива геометријска конфигурација може проузроковати нелинеарни одговор структуре. Геометријску нелинеарност карактеришу „велика” померања или ротације, [4, 17].

Нелинеарности материјала

Нелинеарни односи напона и деформација чест су узрок нелинеарног структурног понашања. Многи фактори могу утицати на својства напона и деформација материјала, укључујући историју оптерећења (као у еластопластичном одговору), услови околине (као што је температура) и време током ког се оптерећење примењује, [4, 17].

4.1.2 Основне информација о нелинеарној анализи

„ANSYS” користи „Newton-Raphson” приступ за решавање нелинеарних проблема. У овом приступу оптерећење се дели на низ повећања оптерећења. Повећања оптерећења могу се применити у неколико корака читавања.

Пре сваког решења „Newton-Raphson” метода процењује вектор равнотежног оптерећења, што је разлика између сила обнављања (оптерећења која одговарају напрезањима елемената) и примењених оптерећења. Затим програм изводи линеарно решење, користећи равнотежна оптерећења и проверава конвергенцију. Ако критеријуми конвергенције нису задовољени, вектор оптерећења ван равнотеже се поново процењује и матрица крутости се ажурира и добија се ново решење. Овај итеративни поступак се наставља све док се проблем не конвергира. Бројне функције за побољшање конвергенције и опоравак, попут претраживања линија, аутоматског корака оптерећења и бисекције, могу се активирати како би се проблем приближио програму. Ако се конвергенција не може постићи, програм покушава да реши са мањим прираштајем оптерећења. У неким нелинеарним статичким анализама, ако се користи „Newton-Raphson” метода, тангентна матрица крутости може постати сингуларна (или нејединствена), што узрокује озбиљне потешкоће у конвергенцији. Такве појаве укључују нелинеарне анализе извијања у којима се структура или потпуно урушава или „ускаче” у другу стабилну конфигурацију. У таквим ситуацијама могу се активирати алтернативна шему понављања, метод дужине лука, како би се избегле тачке рачвања. Метода дужине лука доводи до тога да се „Newton-Raphson” итерације равнотеже конвергирају дуж лука, чиме се често спречава дивергенција, чак и када нагиб криве

оптерећења у односу на скретање постане нула или негативан. Програм „ANSYS” даје низ избора код одређивања критеријума конвергенције. Проверу конвергенције се могу заснивати на силама, моментима, померањима или ротацијама или на било којој комбинацији ових предмета. Поред тога, свака ставка може имати различиту вредност толеранције конвергенције. За проблеме са вишеструким степеном слободе такође постоји избор норми конвергенције, [4, 18].

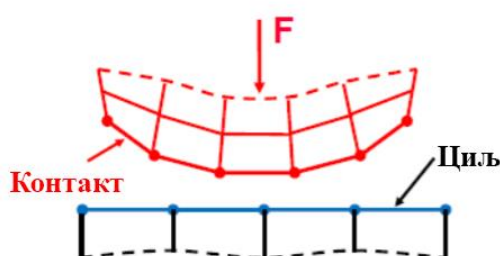
4.2 Механика контакта у ANSYS-у

Када се две одвојене површине додирују тако да постану међусобно тангентне, каже се да су контакту. У уобичајеном физичком смислу, површине које су у контакту имају следеће карактеристике, [4]:

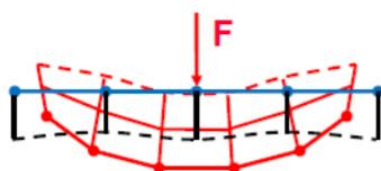
- површине се међусобно не пенетрирају,
- могу преносити нормалне силе притиска и тангенцијалне силе трење и
- често не преносе вучне нормалне силе затезања.

Тела која се физички додирују не продиру међусобно једно у друго, односно не пенетрирају међусобно. Због тога програм мора успоставити однос између две површине како би се спречило да пролазе једно кроз друго током анализе. Када програм спречава међусобно продирање, кажемо да намеће компатибилност контакта. „Workbench Mechanical” нуди неколико различитих формулација контаката како би се постигла компатибилност, [4, 18].

За нелинеарни контакт површина могу се користити две формулације: „Pure Penalty” и „Augmented Lagrange”, обе користе принцип контакта заснованог на спречавању продирања. На слици 4.1 се може приметити да настаје продирање једног тела (*contact*) у друго (*target*) уколико једва од претходно поменутих формулација није искоришћена.



Преклоп се дешава кад
компатибилност није спроведена



Слика 4.1. Продирање једног тела у друго, [4].

Једначина (4.1) представља директну зависност фактора силе k и параметра x који одређују равнотежну силу приликом анализе, [4].

$$F_{normal} = k_{normal} \cdot x_{penetration} \quad (4.1)$$

Главна разлика између „Pure Penalty” и „Augmented Lagrange” формулација јесте да „Augmented Lagrange” формулација увећава контактну силу приликом рачунања, и то, [4, 18]:

$$\text{Pure Penalty: } F_{normal} = k_{normal} \cdot x_{penetration} \quad (4.2)$$

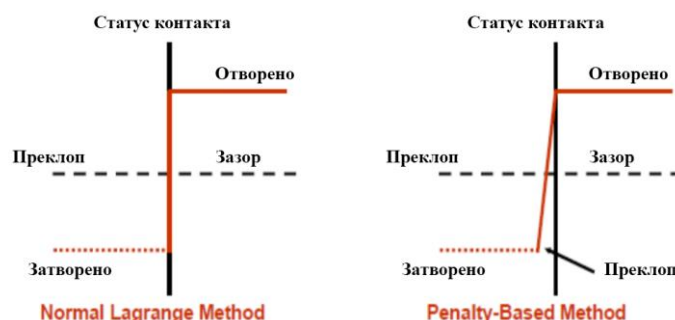
$$\text{Augmented Lagrange: } F_{normal} = k_{normal} \cdot x_{penetration} + \lambda \quad (4.3)$$

Због појављивања нове величине λ , „Augmented Lagrange” метода је мање осетљива на промену контактне крутости k_{normal} , [4].

4.3 Лагранжова формулација контакта

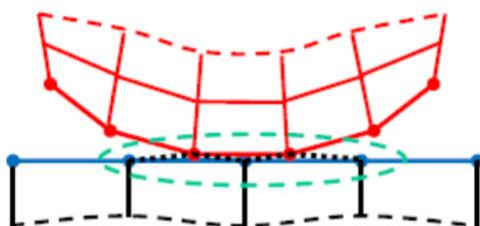
Нормална Лагранжова једначина додајте додатни степен слободе (контактни притисак) како би се задовољила компатибилност контаката. Према томе, уместо да се контактна сила решава као крутост и продирање контакта, контактна сила (контактни притисак) се експлицитно решава као додатни степен слободе. Дрхтање односно вибрације при додиру су веома чест проблем при коришћењу нормалне Лагранжове методе, [4, 18]:

- Ако није дозвољено продирање (слика 4.2.а), тада је статус контакта отворен или затворен (функција корака). То понекад може отежати конвергенцију јер контактне тачке могу осцилирати између отвореног и затвореног статуса.
- Ако је дозвољен неки благи продор (слика 4.2.б), то може олакшати конвергенцију, јер контакт више није промена у кораку.



Слика 4.2. Без продирања а) и са продирањем б), [4].

За специфичне случајеве контакта типа „Bonded” и „No Separation”, доступна је формулација ограничења у више тачака (MPC). „MPC” интерно додаје једначине ограничења како би „везао” померања између додирних површина. Овај приступ се заснива на Лагранжовим мултипликаторима. То је директан и ефикасан начин повезивања површина контактних региона који су повезани (слика 4.3), [4, 18].

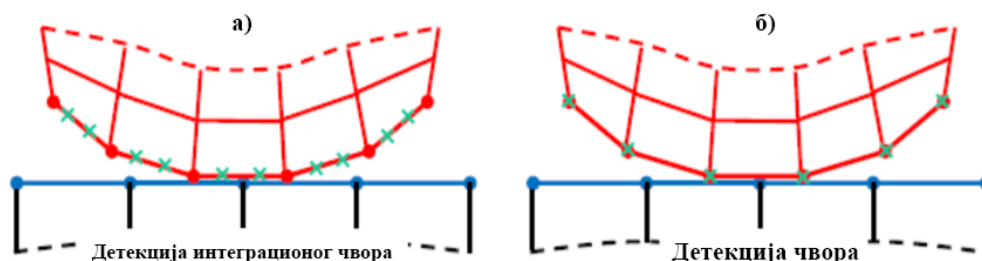


Слика 4.3. Шематски приказ „MPC” формулације, [4].

Ефекти великих деформација такође су подржани везаним контактом на бази MPC-а.

Контакт се детектује различито, у зависности од формулације која се користи, [18]:

- Формулације „*Pure Penalty*” и „*Augmented Lagrange*” користе детекцију тачке интеграције. То резултира откривањем више тачака (слика 4.4.а),
- „*Normal Lagrange*” и „*MPC*” формулације користе детекцију чворова елемената нормално ка предмету продирања, што резултира откривањем мање тачака од претходно поменутих формулација (слика 4.4.б)



Слика 4.4. Детекција тачака интеграције а) и чворова б), [4].

Откривање чворова може мало боље поднети контакт на ивицама, али локализована, финија мрежа ублажиће ову ситуацију откривањем тачака интеграције.

Сажетак формулација контаката доступних у оквиру „*Workbench Mechanical*” окружења се налази у табели 4.2.

Табела 4.2. Формулације контакта, [4].

Формулација	Нормалан контакт	Тангенцијални контакт	Нормална крутост	Тангенцијална крутост	Тип
Augmented Lagrange	Augmented Lagrange	Penalty	Да	Да	Било који
Pure Penalty	Penalty	Penalty	Да	Да	Било који
MPC	MPC	MPC	-	-	Bonded, No Separation
Normal Lagrange	Lagrange Multiplier	Penalty	-	Да	Било који

Метода „*Normal Lagrange*” је тако названа јер се формулација мултипликатора Лагранжа користи у нормалном смеру, док се „*penalty*” метода користи у тангенцијалном смеру, [4].

„*Augmented Lagrange*” се препоручује за уобичајене фрикционе и нефрикционе контакте за нелинеарну анализу. Ова формулација додаје контроле за аутоматско смањење продирања. Нормална крутост контакта k_{normal} се користи у оквиру „*Augmented Lagrange*” и „*Pure Penalty*” методама, релативан је фактор и употребљују се вредности 0,1 за проблеме код којих доминирају опште деформације, док за ситуације у којима доминира савијање, мања вредност од 0,1 може бити корисна ако се наиђе на потешкоће у конвергенцији, [4].

У оквиру табеле 4.3 се налазе смернице када се која метода користи и њихове поједине карактеристике.

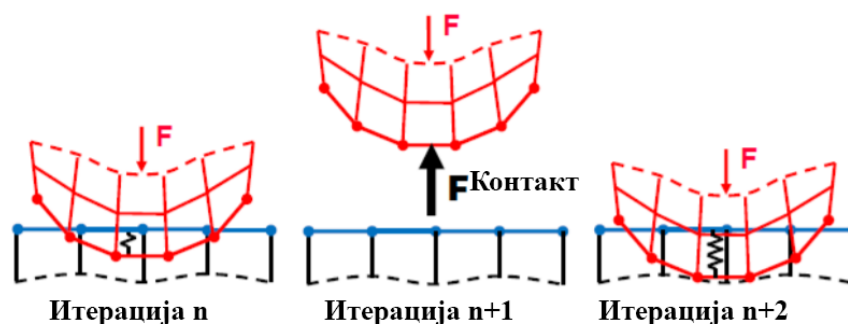
Табела 4.3. Карактеристике формулација контакта, [4].

Pure Penalty		Augmented Lagrange		Normal Lagrange		MPC	
+	Добро понашање конвергенције (пар равнотежних итерација)	-	Могуће додатне равнотежне итерације ако су продирања велика	-	Могуће додатне равнотежне итерације ако је осцилација присутна	+	Добро понашање конвергенције (пар равнотежних итерација)
-	Осетљива на селекцију нормалне крутости контакта		Мање осетљив на селекцију нормалне крутости контакта	+	Нормална крутост контакта није потребна	+	Нормална крутост контакта није потребна
-	Продирање контакта је укључено и неконтролисано		Продирање контакта је укључено и контролисано до неке мере	+	Обично је продирање близу нуле	+	Без продирања
+	Корисна за било које понашање контакта	+	Корисна за било које понашање контакта	+	Корисна за било које понашање контакта	-	Само за „Bonded“ и „No Separation“ понашања
+	Итеративни или директни солвери се могу користити	+	Итеративни или директни солвери се могу користити	-	Само директни солвери се могу користити	+	Итеративни или директни солвери се могу користити
+	Симетрични или асиметрични контакти доступни	+	Симетрични или асиметрични контакти доступни		Асиметрични контакт		Асиметрични контакт
+	Детекција контакта у интеграционим тачкама	+	Детекција контакта у интеграционим тачкама		Детекција контакта у чворовима		Детекција контакта у чворовима

Нормална крутост контакта је најважнији параметар који утиче на тачност и понашање конвергенције. Велика вредност крутости даје бољу тачност, али проблем може постати тежи за конвергенцију. Ако је крутост контакта превелика, модел може осцилирати, при чему се контактне површине међусобно одбијају (слика 4.5). Подразумевану нормалну крутост аутоматски одређује „Workbench Mechanical“. Корисник може унети фактор нормалне крутости (*Normal Stiffness Factor - FKN*) који је множитељ у коду израчунатој крутости. Што је фактор мањи, контактна крутост је нижа, [18].

Неке опште смернице за избор нормалне крутости за контактне проблеме, [4]:

- за проблеме у којима доминирају расуте масе користи се „Program Controlled” начин или ручно уношење фактора у вредности 1 и
- за проблеме у којима доминира савијање ручно се уноси фактор нормалне крутости у вредности од 0,01 до 0,1.



Слика 4.5. Шематски приказ понашања нормалне крутости, [18].

Нормална крутост се такође може аутоматски прилагодити током анализе. Ако се појаве потешкоће, крутост ће се аутоматски смањити. „Each Iteration” поставља програм да ажурира крутост на крају сваке равнотежне итерације. Овај избор се препоручује ако не постоји сигурност што се тиче вредности фактора нормалне крутости како би се постигли добри резултати. „Each Iteration, Aggressive” такође поставља програм да ажурира крутост на крају сваке равнотежне итерације, али ова опција омогућава шири опсег прилагођених вредности, [4].

У табели 4.4 се налазе смернице за избор понашања контакта у зависности од избора формулације.

Табела 4.4. Избор понашања контакта у зависности од формулације, [18].

	Опције	Pure Penalty	Augmented Lagrange	Normal Lagrange	MPC
Избор пре анализе	Симетрично понашање	Симетрично	Симетрично	Ауто-Асиметрично	Ауто-Асиметрично
	Асиметрично понашање	Асиметрично	Асиметрично	Асиметрично	Асиметрично
	Ауто-Асиметрично понашање	Ауто-Асиметрично	Ауто-Асиметрично	Ауто-Асиметрично	Ауто-Асиметрично
Преглед резултата	Симетрично понашање	Заједнички	Заједнички	Засебни	Засебни
	Асиметрично понашање	На контакт телу	На контакт телу	На контакт телу	На контакт телу
	Ауто-Асиметрично понашање	Засебни	Засебни	Засебни	Засебни
Напомене	Симетрично понашање	Лако подешавање	Лако подешавање	Аутоматски	Аутоматски
	Асиметрично понашање	Ефикасност и контрола	Ефикасност и контрола	Корисник има контролу	Корисник има контролу
	Ауто-Асиметрично понашање	Аутоматски	Аутоматски	Аутоматски	Аутоматски

4.3 Фрикциони контакт

Фрикциони контакт је доступан у оквиру „ANSYS” пакета. Генерално, тангенцијално понашање или клизање између два тела у контакту могу бити без присуства трења или са трењем. Фрикциони контакт без присуства трења омогућава телима у контакту да клизе једно по другом без отпора, док код фрикционог контакта тангенцијалне силе се могу јавити између два тела. Фрикциони контакт се може употребити у анализи са великим и малим извијањима.

Француски физичар *Amontons* (1699. год) је поставио емпиријски закон линијске зависности силе трења од оптерећења, који у савременим записима има облик, [1, 19]:

$$F_T \leq \mu \cdot F_N \quad (4.4)$$

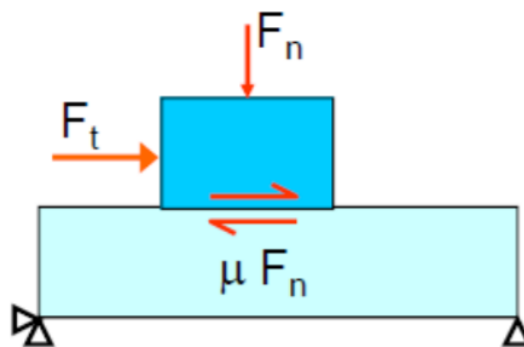
где је:

F_t - сила трења,

F_n - нормално оптерећење на површину трења и

μ - статички коефицијент трења.

У тренутку када тангенцијална сила превазиђе горе наведену вредност изражава се појава клизања. Шематски приказ трења се налази на слици 4.6.



Слика 4.6 Шематски приказ трења, [4].

Француски научник, *Charles Coulomb*, се сматра оснивачем науке о трењу. *Coulomb* је уопштио закон *Amontons*-а на случај када део трења не зависи или слабо зависи од оптерећења, записавши га у облику, [1, 19]:

$$F_T = \mu \cdot F_N + A \quad (4.5)$$

где је:

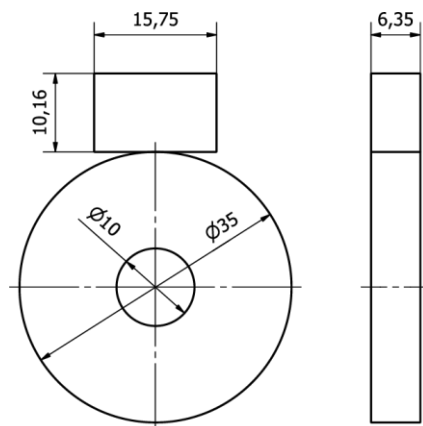
A - члан који узима у обзир спрегнуте површине и пропорционалност површина додира.

За фрикциони контакт коефицијент трења се ручно уноси. За коефицијент трења од 0, контакт има исто понашање као у опцији без трења. Препорука је користити „*Augmented Lagrange*” формулацију када је фрикциони контакт у питању, [18].

Ако је трење присутно у контакту онда је могуће пратити параметре на излазу као што су фрикциони напон контакта и дужина клизања контакта, као и статус контакта.

5. Експеримент

Испитивање се врши симулацијом контакта диска и блока. Димензије диска и блока су дефинисане стандардом ASTM G77 које су приказане на слици 5.1.



Слика 5.1. Димензије блока (а) и диска (б) у mm.

Пре почетка анализе потребно је дефинисати претпоставке које ће помоћу при самом решавању симулације, као што су:

- контакт између диска и блока је фрикциони, односно са присуством трења,
- за вредности коефицијента трења изнад 0,2 анализа се сматра нелинеарном,
- оба дела су подложна деформацијама,
- понашање контакта је симетрично и
- диск има један степен слободе и то ротацију око своје цилиндричне осе, док блок има такође један степен слободе и то translацију нормално на осу диска.

Поред основних претпоставки за даљу анализу потребни су нам поједини параметри материјала као и параметри испитивања. У раду [20] Стојановић врши триболошко испитивање хибридних композита са А356 матрицом и то управо помоћу „disk on block” теста. На основу претходно поменутог рада издвајају се потребни параметри као што су:

- брзина клизања,
- нормално оптерећење,
- пут клизања и
- коефицијент трења.

5.1 Материјали

Према препорукама стандарда ASTM G77, што се тиче материјала користи се контакт између метала. Материјал диска је генерични конструкциони челик у оквиру „ANSYS” окружења, док материјали који се користе за блок у овом раду су следећи:

- А356,
- А356+10SiC,
- А356+10SiC+1Gr и
- А356+10SiC+3Gr.

Основне карактеристике материјала блока, које су потребне за даљу анализу се налазе у табели 5.1.

Табела 5.1. Карактеристике материјала блока

	E [MPa]	Re [MPa]	Rp [MPa]	R _{0,2} [MPa]	ν
A356	64344	162	182	255	0,33
A356+10SiC	16223	46	60	92	0,33
A356+10SiC+1Gr	33124	85	90	122	0,33
A356+10SiC+3Gr	40523	67	80	118	0,33

Карактеристике материјала блока, представљене у претходној табели, добијене су путем испитивања на притисак. Блокови израђени од одговарајућих материјала и димензија су подвргнути испитивању на притисак на сервохидрауличном пулзатору марке „Shimadzu” са ознаком EHF-EV101K3-070-0A. Сервохидраулични пулзатор „Shimadzu” поседује велику флексибилност, односно могућност прилагођавања циљевима тестирања. На сервохидрауличном пулзатору „Shimadzu” могу се испитати узорци различитих величина са великим распоном силе од 10 N до 100 kN. Распон амплитуде се може кретати од 1 μm до 100 mm. Поред тога омогућен је велики број контрола: сила, померања, ход клипа, микро померања, унутрашњи притисак, брзина, убрзање итд. На слици 5.2 је приказан изглед „Shimadzu” сервохидрауличног пулзатора, [21].

SHIMADZU Servo-hydraulic Test System

Статичка тестирања



Примери тестова

- » Zatezanje
- » Pritisak
- » Savijanje u tri i u četiri tačke

Parametri mehanike loma



Примери тестова

- » Zamorna čvrstoća
- » Zamorni rast prsline
- » Propagacija prsline
- » K_{Ic} , J_{Ic}

Testiranje na zamor



Примери тестова

- » Konstantne amplitude
- » Promenljive amplitude
- » Blokova opterećenja
- » Niskociklični zamor
- » Visokociklični zamor

Ispitivanja na povišenim temperaturama



Примери тестова

- » Testiranje na zamor kompozitnih materijala
- » Određivanje zamornih karakteristika
- » Zatezanje

EHF - EV101K3-070-0A

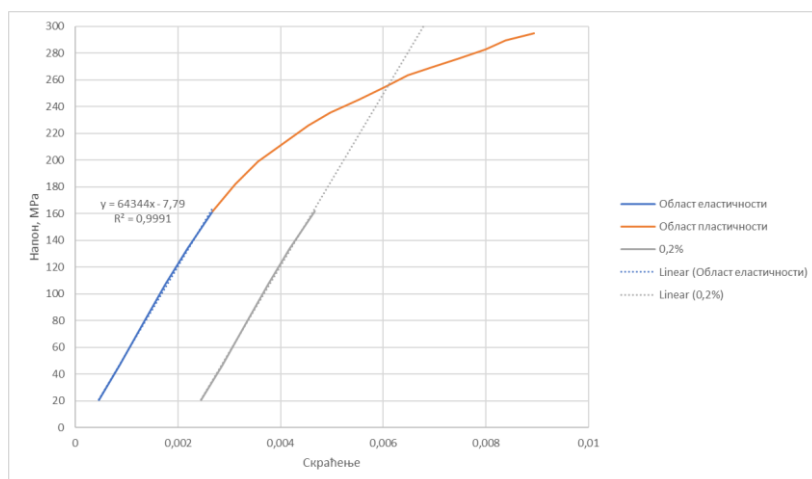


- 1 E-type Loading Frame
- 2 V model of Controller
- 3 Controller 4830
- 4 Actuator Capacity 100kN (mark 101)
- 5 Stroke $\pm 100\text{mm}$ (mark 3)
- 6 Hydraulic Power Supply Flow Rate QF-70B (mark 070)
- 7 Additional mark for special type of Testing System

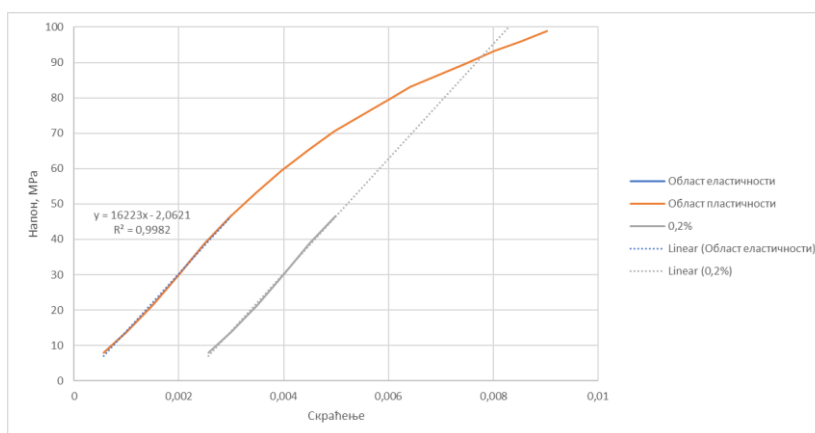
Слика 5.2. „Shimadzu” сервохидраулични пулзатор, [20].

За материјал A356, као и за остале материјале, постоји по 4 припремка за испитивање, истих димензија са одступањима реда десетих или стотих у mm. За потребе овог рада узети су у обзир само примери највећег модула еластичности.

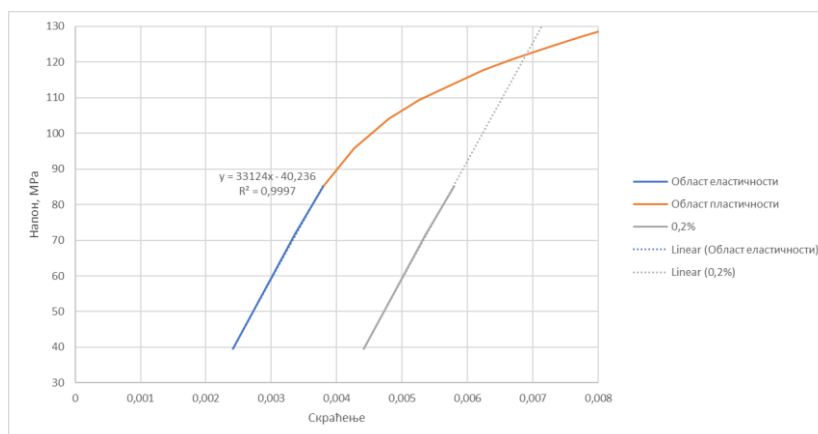
На сликама 5.3÷5.6 су приказани дијаграми зависности напона и скраћења.



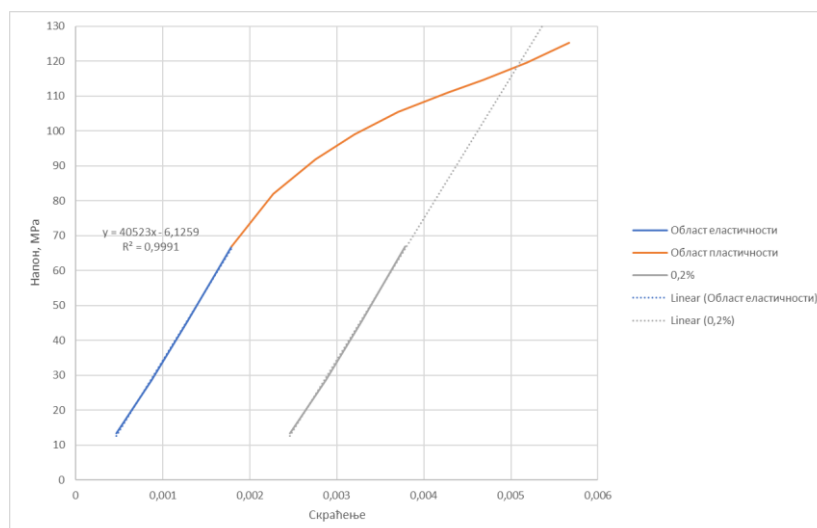
Слика 5.3. Дијаграм зависности напона и скраћења - А356.



Слика 5.4. Дијаграм зависности напона и скраћења - А356+10SiC.



Слика 5.5. Дијаграм зависности напона и скраћења - А356+10SiC+1Gr.



Слика 5.6. Дијаграм зависности напона и скраћења - A356+10SiC+3Gr.

Основне карактеристике материјала диска су приказане у табели 5.2.

Табела 5.2. Карактеристике материјала диска

	E [MPa]	R _{0,2} [MPa]	ν
Челик	210000	250	0,3

5.2 Методологија анализе

Анализа као и моделирање делова у контакту је одрађена комплетно у оквиру „ANSYS” пакета. „ANSYS” је увелико познат као прави избор у методи коначних елемената (МКЕ) за симулацију реалних инжењерских проблема. Софтвер ради у три различите фазе и то:

- предпроцесирање,
- решавање и
- постпроцесирање.

Фаза предпроцесирања обухвата моделирање геометрије и припрему МКЕ модела, дефинисање типа елемената, карактеристика материјала и интеракције. У фази решавања „ANSYS” софтвер генерише мрежу коначних елемената која дефинише понашање сваког чвора и елемента, рачуна одговарајуће вредности непознатих величина као што су деформација, фрикционо понашање, напоне, расподела притиска итд. У фази постпроцесирања је у суштини визуализација резултата.

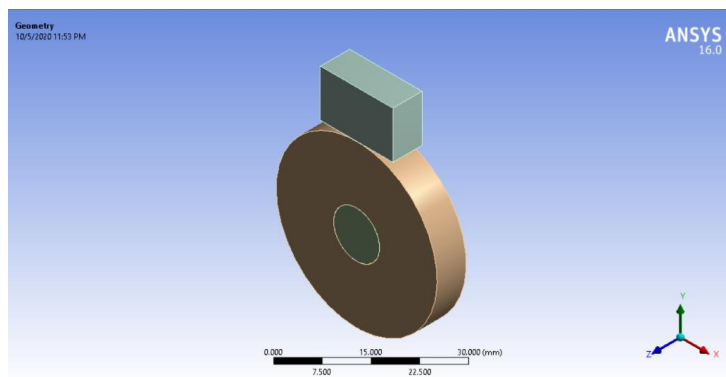
У оквиру овог рада се анализа изводи у оквиру „Workbench Mechanical” окружења, па се у наставку приказује поступак извођења анализе.

На основу претходно постављених претпоставки прилази се следећим корацима и то:

- моделирању геометрије делова блока и диска,
- креирању мреже коначних елемената,
- идентификацији контактних површина,
- увођењу свих материјала који су предвиђени за тестирање,
- дефинисању формулације за решавање проблема,
- постављању граничних услова, оптерећења и угаоне брзине и
- решавању анализе контакта.

5.2.1 Креирање геометрије модела и мреже коначних елемената

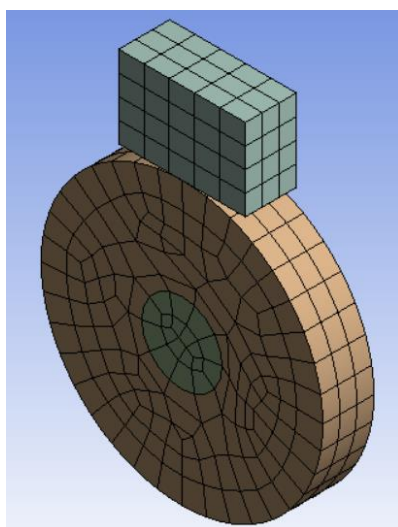
Моделирање геометрије модела је обављено у оквиру „ANSYS” пакета у модулу „Design Modeler”. За потребе овог рада моделирани су блок, диск и штап. Штап односно вратило постоји из потребе да се обезбеди правилна ротација диска око своје цилиндричне осе. На слици 5.7 је приказан склоп претходно поменутих делова у „Mechanical” окружењу.



Слика 5.7. Склоп блока и диска.

Генерисање мреже је пракса генерисања полигоналне или полиедарске мреже која се приближава геометријском домену. Израз „креирање мреже” често се користи наизменично. Уобичајена употреба је за приказивање на рачунарски екран или за физичку симулацију као што је анализа коначних елемената. Тродимензионалне мреже створене за анализу коначних елемената треба да се састоје од тетраедра, пирамида, призми или хексаедра. Мрежа је иначе дискретизација домена који постоји у једној, две или три димензије.

У оквиру подешавања за креирање мреже блок и диск су узети као засебни елементи, како би се и сама мрежа генерисала засебно. Као тип елемента изабран је шестоугао у линеарном геометријском реду. Величина елемента је 3,15 mm, што је идеална вредност као однос утрошеног времена за решавање анализе и валидности резултата. На слици 5.8 је приказан генерисана мрежа склопа.



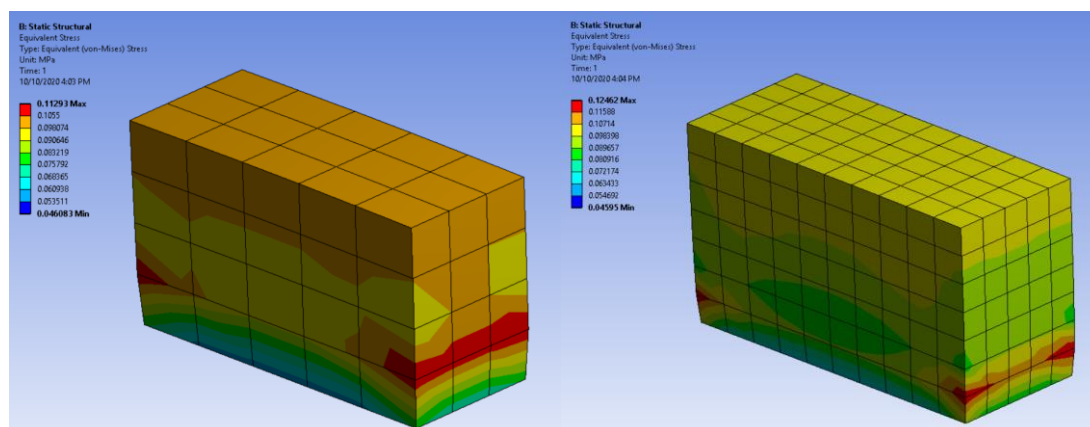
Слика 5.8. Генерисана мрежа.

Блок се састоји од 406 чворова тј. 60 елемената, док се диск састоји од 2312 чворова тј. 414 елемената.

На слици 5.9 се могу приметити резултујући напон на примеру блока. Класичан приступ провери резултата се огледа у калибрацији софтвера, ако генерисана мрежа омогућава приближне резултате теоријским онда се може рећи да је густина мреже правилно одабрана.

Резултујући напон, у овом случају, теоријским путем се добија као:

$$\sigma = \frac{F_N}{A} = \frac{10}{15,75 \cdot 6,35} = 0,0999 \text{ МПа} \quad (5.1)$$



Слика 5.9. Поређење резултата у зависности од густине мреже. Величина елемента 3,15 mm (лево) и 1,575 mm (десно).

Са претходне слике се може закључити да обе густине мреже поседују приближне вредности теоријским. Резултати крупније мреже у овом случају дају приближније резултате, па за потребе овог рада изабрана је мрежа са величином елемента 3,15 mm.

5.2.2 Подешавање контакта и материјала

Подешавање контакта је у овом случају лако, из разлога што већ постоји физички експеримент и врло је лако пресликати такав случај. На слици 5.10 се могу видети сва подешавања контакта.

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	БЛОК
Target Bodies	ДИСК
Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0.441
Scope Mode	Manual
Behavior	Symmetric
Trim Contact	Off
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Each Iteration
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Adjust to Touch
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Слика 5.10. Подешавања фрикционог контакта у програму.

Тела су подешена да буду деформабилна, у смислу да програм на основу карактеристика материјала одлучи расподелу напона, деформација итд. Користећи се претходним претпоставкама формулација контакта се изводи „*Augmented Lagrange*” методом и симетричним понашањем контакта. Поред тога крутост се ажурира при свакој итерацији ради бољег препознавања крајње расподеле напона. Опција „*Trim Contact*” је искључена док су остала подешавања остала подразумевана, што омогућава брзу конвергенцију равнотежне силе.

Вредности коефицијента трења су преузете из литературног извора [20], и оне су следеће:

Табела 5.3. Вредности коефицијента трења, [20].

Материјал	Коефицијент трења								
A356	0,624	0,595	0,559	0,539	0,487	0,441	0,467	0,37	0,337
A356+10SiC	0,703	0,69	0,65	0,689	0,655	0,621	0,64	0,623	0,579
A356+10SiC+1Gr	0,724	0,71	0,68	0,694	0,677	0,66	0,657	0,652	0,646
A356+10SiC+3Gr	0,733	0,743	0,824	0,712	0,717	0,771	0,69	0,708	0,75

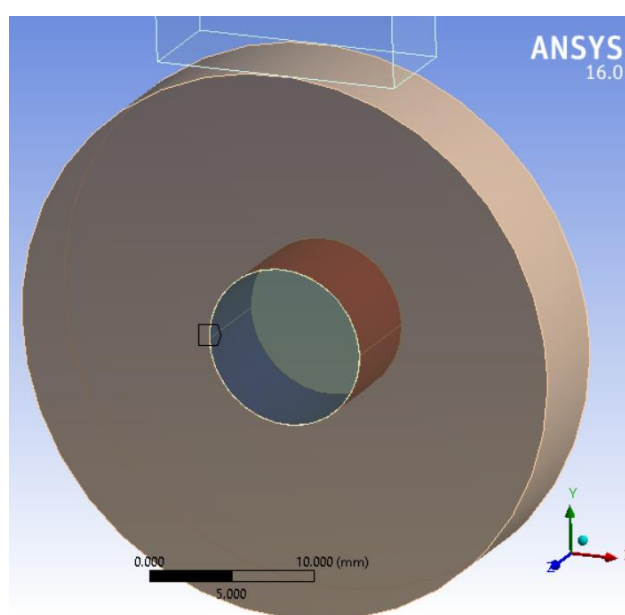
Ове вредности одговарају одређеним оптерећењима и брзинама клизања, што је у наставку рада приказано табеларно.

С обзиром да програм не препознаје коефицијент трења као динамичку вредност потребно је користити се ручним командама, односно писањем једноставне скрипте програмским језиком, у овом случају је то „*PYTHON*” програмски језик. Садржај APDL команде је следећи:

```
„et, cid, 174
```

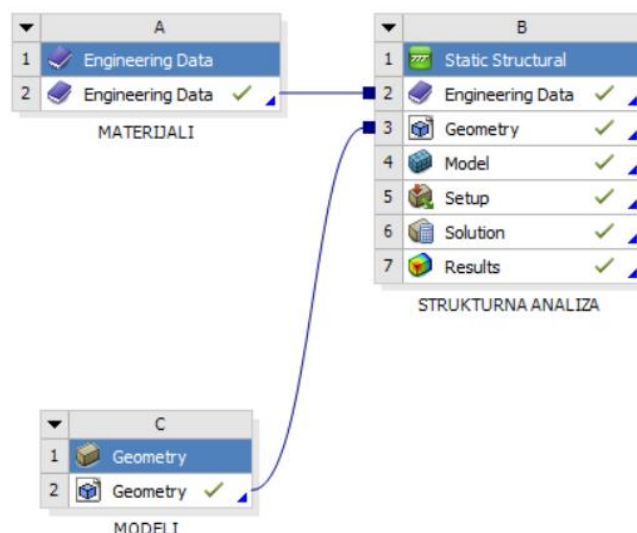
```
mycid = cid”
```

Контакт између диска и вратила је „*bonded*” типа, ради лакшег представљања граничних услова што је приказано на слици 5.11.



Слика 5.11. „*Bonded*” контакт.

Што се тиче материјала, све поменуте карактеристике у овом поглављу су унете у базу података пројекта. Подаци о материјалима су касније додати шематски у оквиру „Workbench” окружења као што је приказано на слици 5.12.



Слика 5.12. Шематско повезивање базе материјала и геометрије делова.

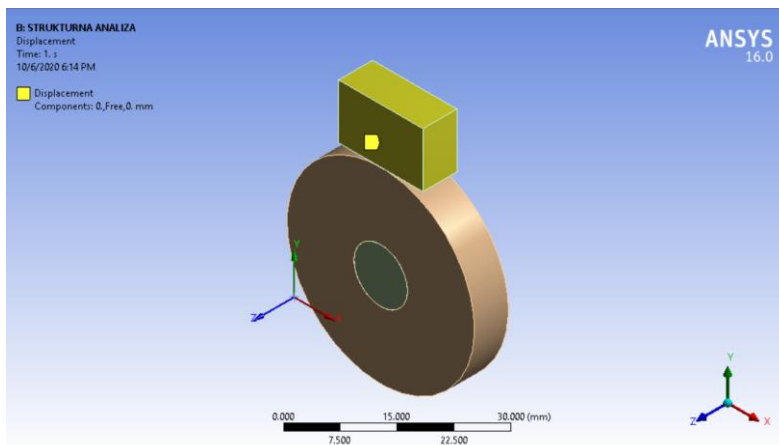
Овакав приступ повезивања има своје предности у смислу каснијег повезивања базе материјала са осталим анализама или пак повезивања анализа међусобно.

5.2.3 Гранични услови и оптерећења

Граничним условима се постиже тачност и компатибилност са стварним условима. У овом случају гранични услови су следећи:

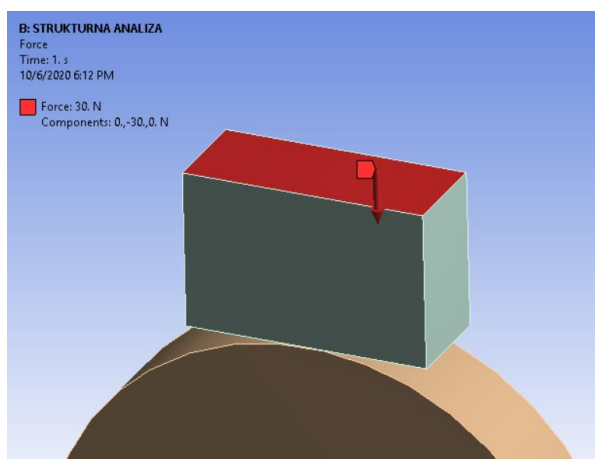
- блок се може кретати само у правцу Y осе,
- диск поседује један степен слободе и то ротацију око Z осе и
- бочне површине штапа такође поседују само ротацију око Z осе.

Блок се може кретати само у правцу Y осе (слика 5.13) из разлога што у истом правцу делује и нормална сила која се ручно уноси (слика 5.14). Тангенцијална сила односно сила отпора трења се додаје као посебно оптерећење како би солвер успео да препозна додатно оптерећење (слика 5.15).



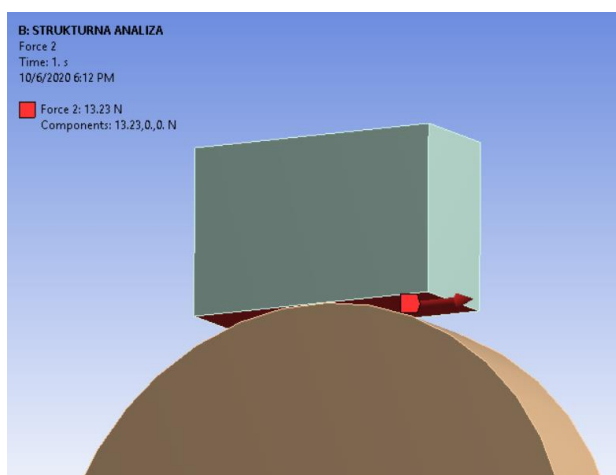
Слика 5.13. Степени слободе блока.

Вредности нормалног оптерећења су у вредностима од 10, 20 и 30 N, [12].



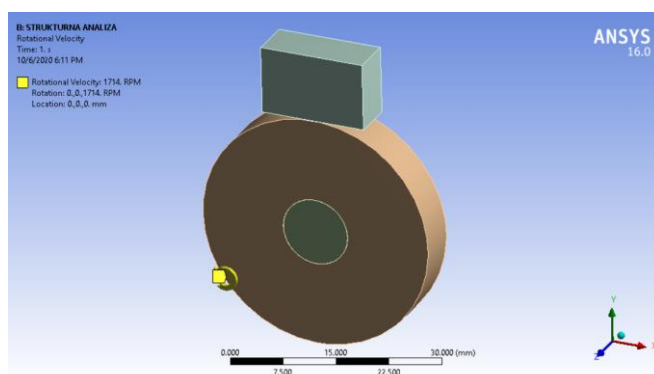
Слика 5.14. Нормално оптерећење на горњу површину блока.

Тангенцијална сила се добија тако што нормалну силу помножимо коефицијентом трења за дату варијанту и смер силе је супротан од смера окретања диска.



Слика 5.15. Сила отпора трења у контакту.

Угаона брзина се дефинише селекцијом тела и подешавањем његове слободе кретања као и вредности угаоне брзине, као што је приказано на слици 5.16.



Слика 5.16. Дефинисање угаоне брзине.

Угаона брзина диска, нормална оптерећења као и варијанте коефицијента трења су приказане у табелама 5.4 - 5.7, [20].

Табела 5.4. Коефицијент трења за материјал А356 на путу клизања од 900 m без подмазивања, [20].

V, m/s	F _N , N	Коефицијент трења	Ширина трага хабања, mm
0,25	10	0,624	2,991
	20	0,595	3,737
	30	0,559	4,020
0,5	10	0,539	3,094
	20	0,487	3,903
	30	0,441	4,283
1,0	10	0,467	3,198
	20	0,370	4,112
	30	0,337	4,731

Табела 5.5. Коефицијент трења за материјал А356+10SiC на путу клизања од 900 m без подмазивања, [20].

V, m/s	F _N , N	Коефицијент трења	Ширина трага хабања, mm
0,25	10	0,703	2,925
	20	0,690	3,872
	30	0,650	4,144
0,5	10	0,689	3,059
	20	0,655	3,945
	30	0,621	4,230
1,0	10	0,640	3,155
	20	0,623	4,107
	30	0,579	4,420

Табела 5.6. Коефицијент трења за материјал А356+10SiC+1Gr на путу клизања од 900 m без подмазивања, [20].

V, m/s	F _N , N	Коефицијент трења	Ширина трага хабања, mm
0,25	10	0,724	1,878
	20	0,710	3,451
	30	0,680	3,992
0,5	10	0,694	2,135
	20	0,677	3,649
	30	0,660	4,194
1,0	10	0,657	2,398
	20	0,652	3,751
	30	0,646	4,341

Табела 5.7. Коефицијент трења за материјал A356+10SiC+3Gr на путу клизања од 900 m без подмазивања, [20].

V, m/s	F _N , N	Коефицијент трења	Ширина трага хабања, mm
0,25	10	0,733	1,979
	20	0,743	3,549
	30	0,824	4,436
0,5	10	0,712	2,148
	20	0,717	3,735
	30	0,771	4,575
1,0	10	0,690	2,535
	20	0,708	3,936
	30	0,750	4,816

5.2.4 Подешавања анализе

Релевантно време анализе се контролише додавањем броја корака. За сваки корак или подкорак, брзина ротације се може мењати као и остали параметри. Почетни временски корак постављен је на 0,2 s, а минимални временски корак је постављен на 0,1 s (слика 5.12). Минимални временски корак зависи од самог корисника, што мања вредност временског корака то је већи број итерација конвергенције равнотежне силе.

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	0.2 s
Minimum Time Step	0.1 s
Maximum Time Step	1. s
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson O...	Unsymmetric
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Conve...	Program Controlled
Rotation Convergen...	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off

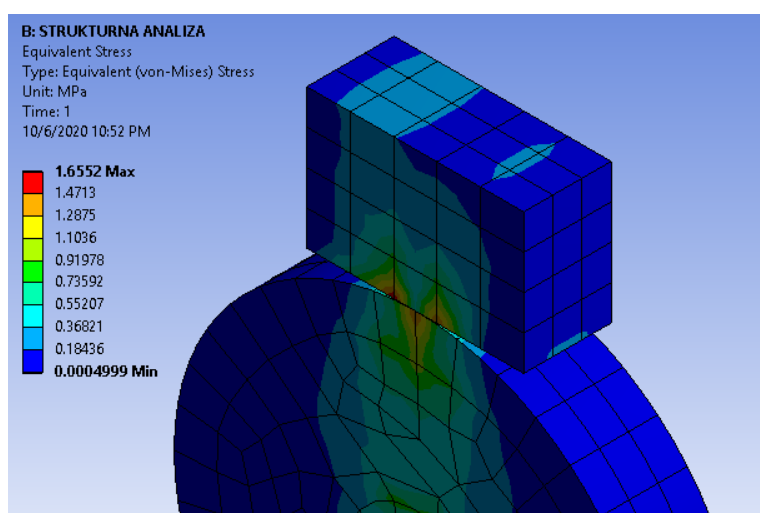
Слика 5.12. Подешавање анализе у „ANSYS” окружењу.

Са слике 5.11 се такође могу приметити и остала подешавања. Пошто је проблем нелинеаран онда је потребно активирати „Newton-Raphson” методу избором асиметричног решавања. За вредности коефицијента трења мање од 0,2 активирање ове опције није неопходно. Такође су активирана и велика извијања.

6. Резултати и анализа података

Гранични услови, контактено понашање система и примена различитих случајева оптерећења такође су изведени на овом делу МКЕ анализе. Завршна фаза анализе је утврђивање максималних еквивалентних напона и максималних еквивалентних локација напона. *Von Mises*-ови конструктори често користе да би проверили постојећу или нову конструкцију, њено дато стање оптерећења и да ли ће та конструкција издржати дато оптерећење, што произилази из теорије промене енергије изобличења. Тада се бележе максималне и минималне вредности, нпр. резултујућих напона, и добија се сликовито и ком делу анализираних елемената се јављају те вредности. Један од примера постпроцесирања резултујућег *Von Mises*-ових напона је приказан на слици 6.1. У стварности, део површине ког одликују максимални напони је похабан и узима се као вредност дубине или ширине хабања.

Након покретања прве варијанте анализе, провере валидности њених резултата и уноса вредности резултата у одговарајућу табелу приступа се осталим варијантама. У оквиру овог рада постоји 36 различитих варијанти параметара за уношење.



Слика 6.1. Графички приказ резултујућих напона у оквиру „ANSYS” софтвера.

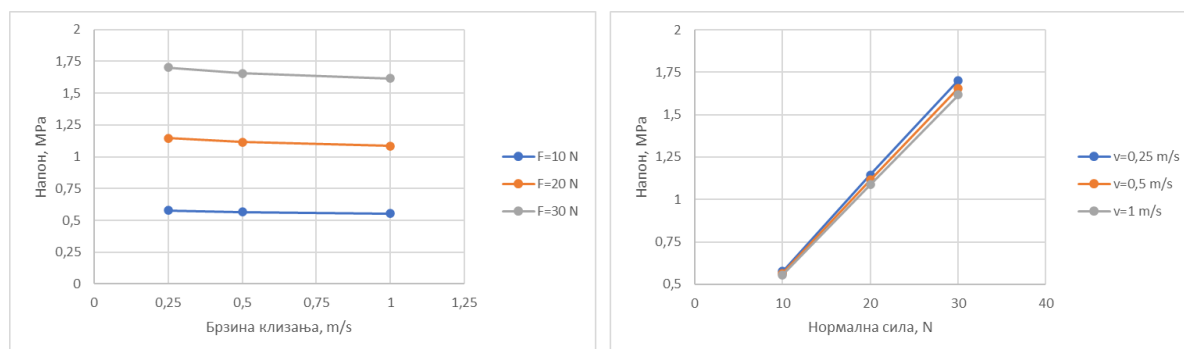
Вредности резултујућег напона, следе у наставку рада у виду табеларног приказа и као лакша визуализација понашања напона у односу на одређене параметре у виду дијаграма.

6.1 Резултујући напони

Добијене вредности резултујућих напона су експортиране након једног циклуса оптерећења. Са више циклуса не долази до промене резултујућих напона.

Табела 6.1. Резултујући напони код материјала блока - A356.

A356 - Напон, МПа		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
Брзина клизања, m/s	0,25	0,57714	1,1457	1,7029
	0,5	0,56488	1,1155	1,6552
	1	0,55532	1,0862	1,6177

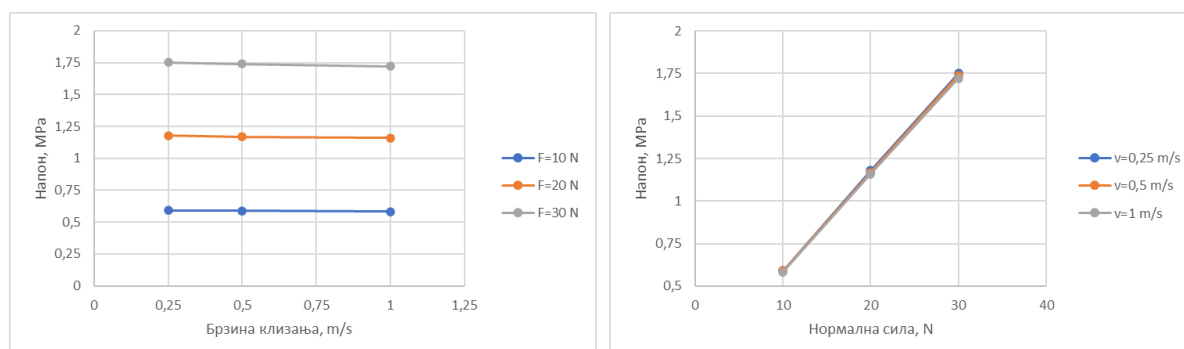


Слика 6.2. Дијаграм зависности напона и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - A356.

У табели 6.1 дате су вредности резултујућих напона у зависности од брзине клизања и оптерећења за основни материјал A356. Резултујући напон се креће у границама од $0,55 \div 1,7\text{ MPa}$. Вредност резултујућег напона опада са повећањем брзине клизања и расте са повећањем оптерећења (слика 6.2).

Табела 6.2. Резултујући напони код материјала блока - A356+10SiC.

A356+10SiC - Напон, MPa		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
Брзина клизања, m/s	0,25	0,59158	1,1793	1,7516
	0,5	0,58955	1,1692	1,7394
	1	0,5826	1,1602	1,7221



Слика 6.3. Дијаграм зависности напона и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - A356+10SiC.

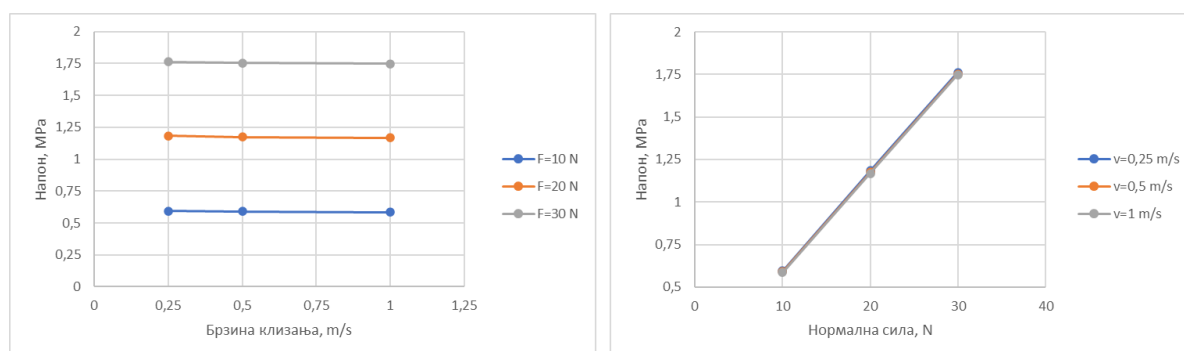
Заменом основног материјала A356 материјалом A356+10SiC, након анализе се примећује промена вредности резултујућег напона у зависности од брзине клизања и оптерећења, што је приказано на слици 6.3. Један од разлога је тај што материјал A356+10SiC поседује слабије механичке карактеристике у односу на основни материјал A356. Вредности резултујућег напона се крећу у границама од $0,58 \div 1,75\text{ MPa}$.

Резултујући напони основног материјала A356 и материјала A356+10SiC опадају са повећањем брзине клизања и расту са повећањем оптерећења. Тренд понашања резултујућег напона код овог материјала се разликује у односу на основни материјал.

Резултати описују мање разлике резултујућих напона у зависности од брзине клизања као и у случају зависности од оптерећења.

Табела 6.3. Резултујући напони код материјала блока - A356+10SiC+1Gr.

A356+10SiC+1Gr - Напон, МПа		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
Брзина клизања, m/s	0,25	0,59431	1,1843	1,7627
	0,5	0,58974	1,1743	1,7537
	1	0,58435	1,167	1,7477

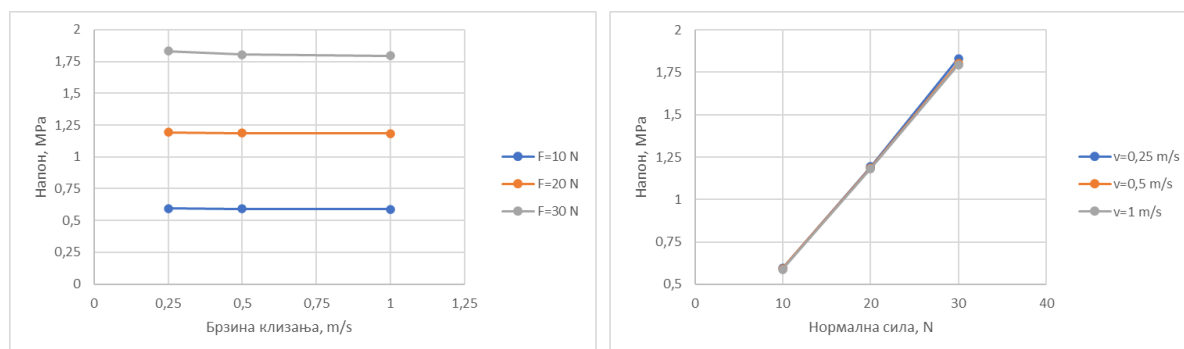


Слика 6.4. Дијаграм зависности напона и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - A356+10SiC+1Gr.

Са додавањем графита у новоформираним хибридним композитима долази до промене фрикционих карактеристика, [20]. С обзиром на веће вредности коефицијента трења у односу на претходна два материјала и мањим опсегом промене коефицијента трења ($0,65 \div 0,72$), долази до скоро идентичног понашања тренда промене напона (слика 6.4). Резултујући напони на материјалу A356+10SiC+1Gr су већи у односу на претходно поменути материјал A356+10SiC, без обзира на боље механичке карактеристике. Вредности напона се крећу у границама од $0,58 \div 1,76$ МПа. Резултати су такође добијени варирањем три оптерећења, три брзине клизања и 9 вредности коефицијента трења. Код овог, као и код претходних материјала, резултујући напон расте са повећањем оптерећења и опада са порастом брзине клизања (табела 6.3).

Табела 6.4. Резултујући напони код материјала блока - A356+10SiC+3Gr.

A356+10SiC+3Gr - Напон, МПа		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
Брзина клизања, m/s	0,25	0,59569	1,194	1,8306
	0,5	0,59216	1,1858	1,8045
	1	0,58897	1,1832	1,7946



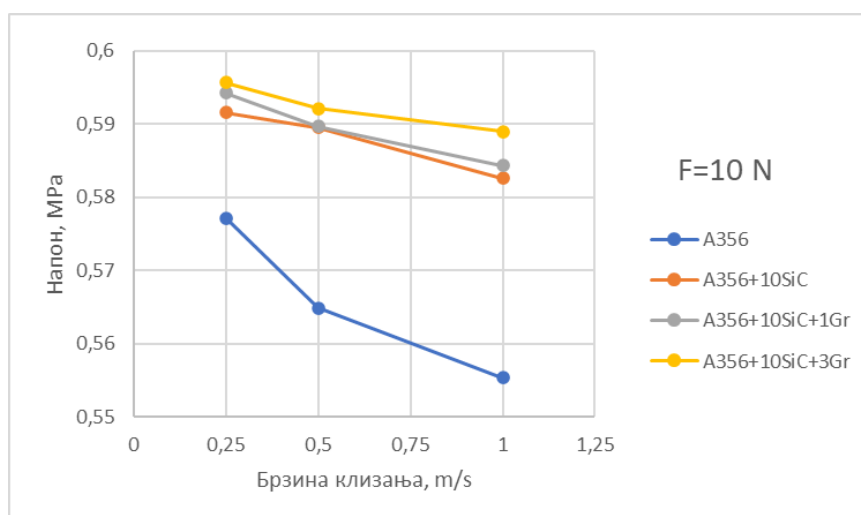
Слика 6.5. Дијаграм зависности напона и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - A356+10SiC+3Gr.

Вредности резултујућих напона последњег испитиваног материјала A356+10SiC+3Gr дате су у табели 6.4. Тренд понашања резултујућег напона код овог материјала је готово идентичан са понашањем резултујућег напона код материјала A356+10SiC. Вредности напона се крећу у границама од $0,58 \div 1,83$ МПа. Као и код претходних материјала, резултујући напон расте са повећањем оптерећења и опада са порастом брзине клизања (слика 6.4).

Највеће вредности резултујућег напона код свих материјала се јављају при малим брзинама и великим силама, нпр. при брзини 0,25 m/s и оптерећењу од 30 N. С обзиром на разлике у резултујућим напонима, што је и очекивано судећи по карактеристикама материјала, потребно је упоредити напоне свих материјала међусобно. У наставку рада су приказане зависности резултујућих напона са брзинама клизања и оптерећења.

6.1.1 Зависност резултујућих напона и брзине клизања

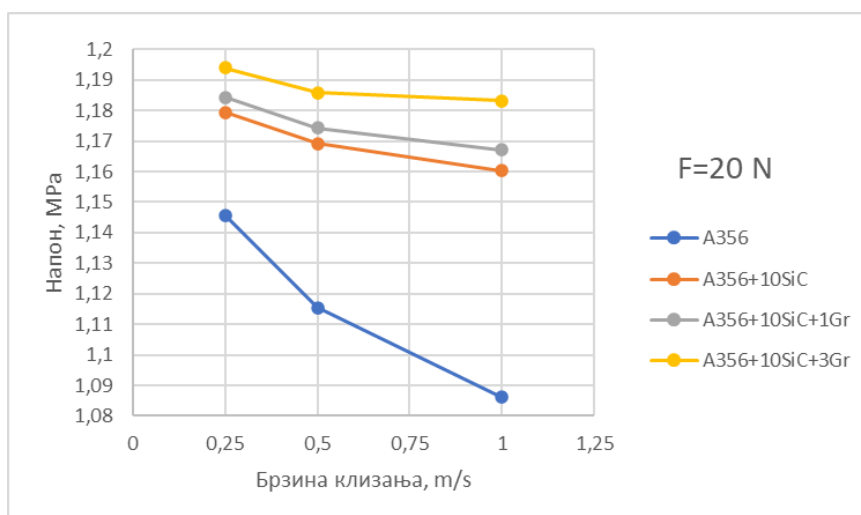
Ради лакшег прегледа добијених резултата и увида у разлике материјала, на сликама 6.6÷6.11 приказани су резултати резултујућих напона свих материјала у зависности од брзине клизања, а касније и у зависности од оптерећења.



Слика 6.6. Дијаграм зависности напона и брзине клизања при оптерећењу од 10 N.

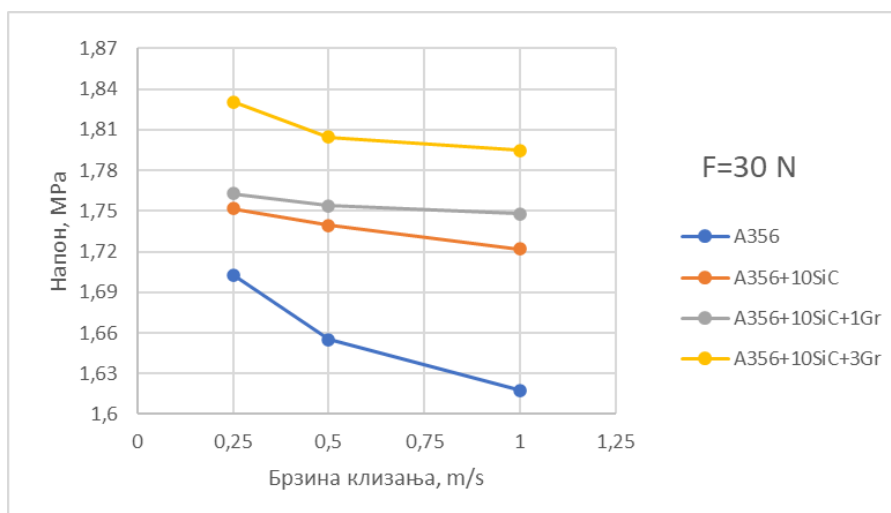
Са слике 6.6 се јасно могу видети разлике у резултујућим напонима између свих испитиваних материјала. Основни материјал А356 при оптерећењу од 10 N одликује највећи релативни пад резултујућег напона у зависности од брзине клизања. Остале материјале прати скоро исти тренд понашања резултујућег напона са благим преклапањем резултата. Највећи напони при оптерећењу од 10 N се јављају код материјала А356+10SiC+3Gr са максималном вредношћу од 0,59569 МПа, док се најмањи напони јављају код основног материјала А356 и то у вредности од 0,55532 МПа.

На основу слике 6.7 могу се приметити разлике у резултујућим напонима између свих материјала. При оптерећењу од 20 N, основни материјал А356 одликује највећи релативни пад резултујућег напона у зависности од брзине клизања, као и при претходном оптерећењу. Тренд понашања резултујућег напона код осталих материјала је и даље сличан, али овај пут без благог преклапања резултата. Најмање вредности напона се јављају код основног материјала А356 и то у вредности од 1,0862 МПа, док се највећи напони при оптерећењу од 20 N и овај пут јављају код материјала А356+10SiC+3Gr са максималном вредношћу од 1,194 МПа.



Слика 6.7. Дијаграм зависности напона и брзине клизања при оптерећењу од 20 N.

При оптерећењу од 30 N, највећи пад резултујућег напона у зависности од брзине клизања се такође јавља у основном материјалу А356, али овај пут уз не толику велику разлику у односу на остале материјале (слика 6.8). Највећи напони при оптерећењу од 30 N се јављају код материјала А356+10SiC+3Gr са максималном вредношћу од 1,8306 МПа, док се најмањи напони јављају код основног материјала А356 и то у вредности од 1,6177 МПа. Такође, тренд понашања резултујућег напона се видно разликује за сваки материјал.

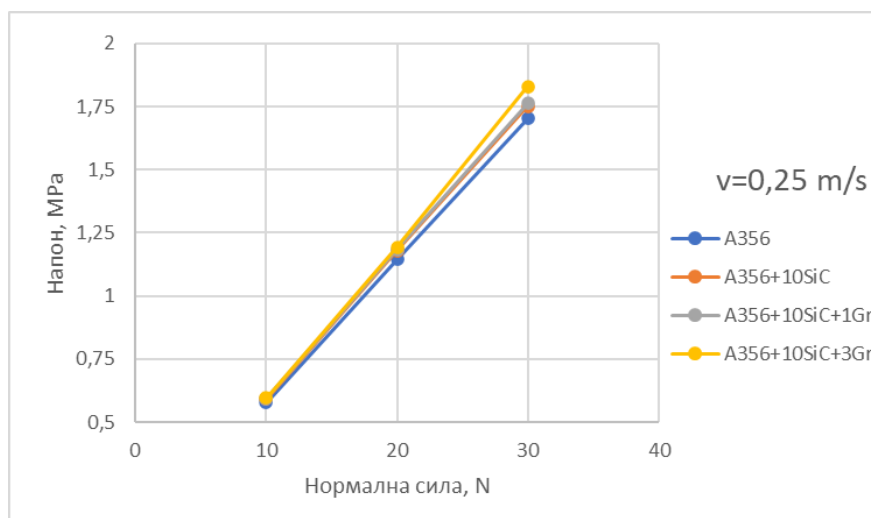


Слика 6.8. Дијаграм зависности напона и брзине клизања при оптерећењу од 30 N.

На основу претходних дијаграма могу се закључити две ствари:

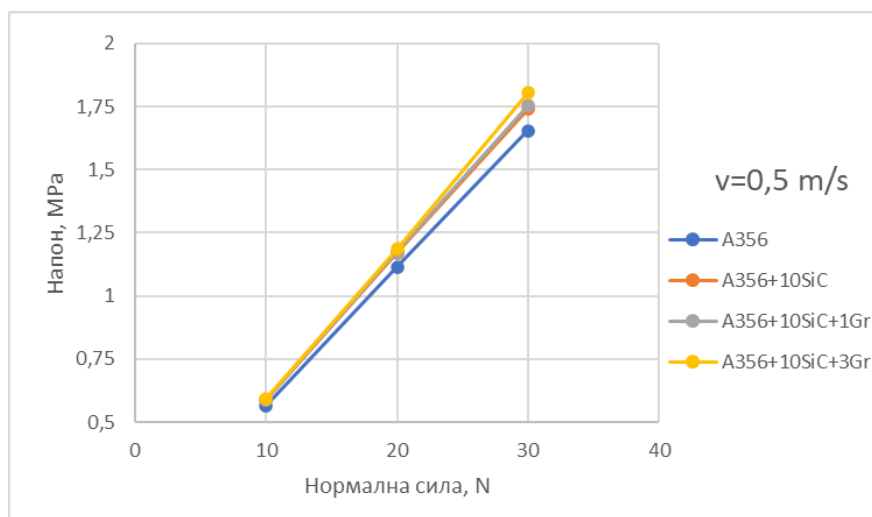
- са порастом оптерећења расте и разлика између минималног и максималног резултујућег напона и
- при оптерећењима од 10 и 20 N ови материјали имају сличан тренд понашања резултујућег напона, што се касније мења при оптерећењу од 30 N.

6.1.2 Зависност резултујућих напона и оптерећења



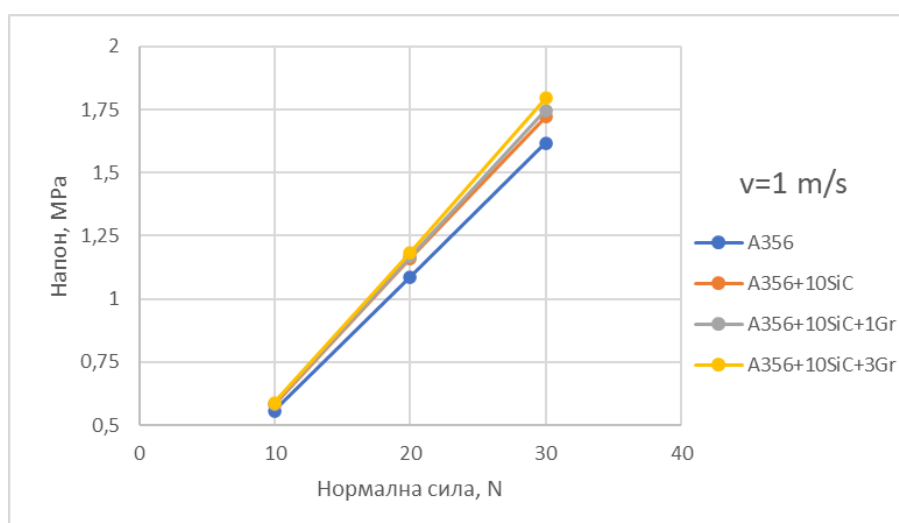
Слика 6.9. Дијаграм зависности напона и оптерећења при брзини клизања од 0,25 m/s.

На основу слике 6.9 могу се приметити разлике у резултујућим напонима између свих материјала, у односу на задато оптерећење. При нормалном оптерећењу од 10 N напони су скоро идентични, што је карактеристика при брзини клизања од 0,25 m/s. Са порастом нормалног оптерећења резултујући напони такође расту код свих материјала уз малу разлику тренда понашања. Основни материјал A356 има најмањи скок резултујућих напона у односу на остале материјале, док највиши скок има материјал A356+10SiC+3Gr.



Слика 6.10. Дијаграм зависности напона и оптерећења при брзини клизања од 0,5 m/s.

При брзини клизања од 0,5 m/s следе слични резултати резултујућих напона само са мало већом разликом при порасту оптерећења (слика 6.10). При нормалном оптерећењу од 20 N напони су скоро идентични као и код претходног случаја, а са порастом оптерећења резултујући напони такође расту. Материјал A356+10SiC+3Gr одликује највиши скок резултујућих напона, његов опсег при брзини клизања од 0,5 m/s се креће од 0,59÷1,8 МПа.



Слика 6.11. Дијаграм зависности напона и оптерећења при брзини клизања од 1 m/s.

Са слике 6.11 може се приметити да при нормалном оптерећењу од 10 N напони су слични при брзини клизања од 1 m/s. Са порастом нормалног оптерећења резултујући напони такође расту код свих материјала уз малу разлику тренда понашања. Основни материјал A356 и даље има најмањи скок резултујућих напона у односу на остале материјале, док највиши скок има материјал A356+10SiC+3Gr.

На основу претходних дијаграма могу се закључити две ствари:

- са порастом оптерећења расте и разлика између минималних и максималних резултујућих напона и
- ови материјали имају сличан тренд понашања, једина разлика је та да са порастом брзине клизања расте и разлика резултујућих напона између материјала.

6.2 Ширина трага хабања

На основу литературног извора [9] главни недостатак симулације хабања је велики рачунски временски захтев. Да би се ово решило, користе се три технике екстраполације:

- константна екстраполација,
- линеарна екстраполација и
- техника екстраполације константног притиска.

Технике екстраполације узимају у обзир развој контактнoг притиска и контактне геометрије током клизног хабања. Анализира се ефикасност ових техника заснованих на рачунском времену и тачности. На основу тачности утврђено је да је техника линеарне екстраполације најефикаснија, док је техника екстраполације константним притиском најкориснија за смањење рачунског времена.

Због недостатка података о материјалима за потребе овог рада користи се константна екстраполација. За принцип константне екстраполације током целе анализе користи се константни фактор екстраполације. На пример, да би се симулирао пут клизања од 500 m са кораком циклуса од 4 mm, било би потребно $500/0,004=125000$ МКЕ циклуса. Али када се користи константни фактор екстраполације од 200, број циклуса који се симулирају смањује се на $125000/200=625$ циклуса. Поред смањења рачунског времена, фактор екстраполације такође треба да одржи стабилност и тачност симулације хабања, [9].

На тренутном примеру где је пут хабања 900 m, са кораком циклуса 3,5 mm и познатим следећим параметрима:

- време целе анализе за брзину клизања од 0,25 m/s - 3600 s,
- једна дужина у површини контакта - 6,35 mm,
- нормално оптерећење - 10 N и
- корак циклуса 35 mm (материјал А356).

Добија се формулација облика приказаног у једначини 6.1.

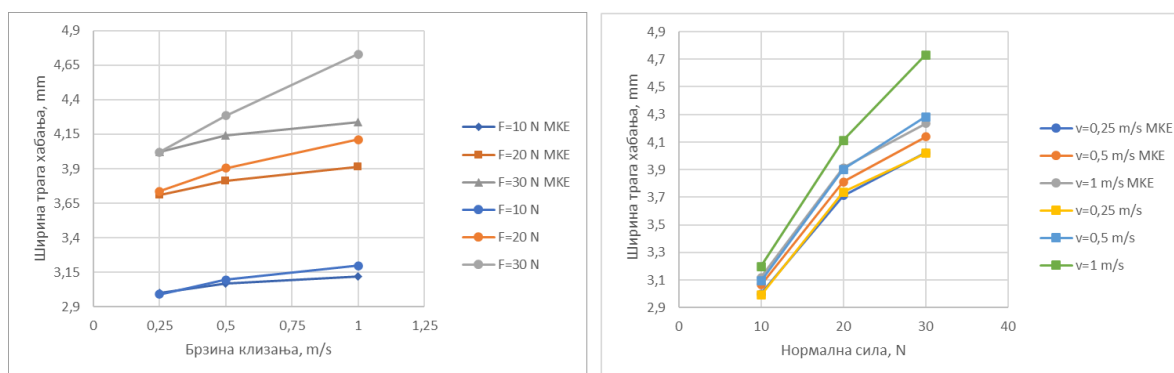
$$F_p = \frac{900}{3600 \cdot 6,35 \cdot 0,035} = 1,09 \quad (6.1)$$

Техником константне екстраполације могу се добити оптимални фактори екстраполације за остале случајеве оптерећења. Поступак се понавља за свако оптерећење и сваки материјал има другачије факторе којима увеличава одређену вредност, у овом случају ширину трага хабања, на основу претходно поменутих величина. У литературном извору [9] је откривено да како се фактор екстраполације повећава, грешка се повећава док се број потребних циклуса смањује.

У наставку су приказане табеле и дијаграми поређења вредности ширине трага хабања добијених нумеричком анализом и физичким експериментом.

Табела 6.5. Ширина трага хабања код материјала блока - А356.

А356 - Ширина трага хабања, mm		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
МКЕ резултати				
Брзина клизања, m/s	0,25	3,001	3,711	4,022
	0,5	3,066	3,811	4,138
	1	3,119	3,914	4,234
Резултати физичког експеримента				
Брзина клизања, m/s	0,25	2,991	3,737	4,02
	0,5	3,094	3,903	4,283
	1	3,198	4,112	4,731



Слика 6.12. Дијаграм зависности ширине трага хабања и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - А356.

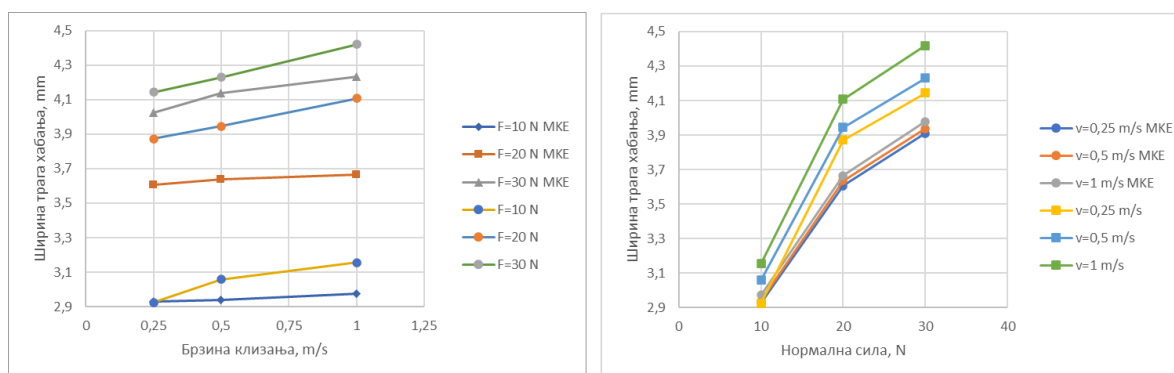
У табели 6.5 дате су вредности ширине трага хабања у зависности од брзине клизања и оптерећења за основни материјал А356. Ширина трага хабања се креће у границама од $3 \div 4,23$ mm за вредности добијене методом коначних елемената и од $2,99 \div 4,73$ mm за вредности добијене физичким експериментом. Вредност ширине трага хабања расте са повећањем брзине клизања и расте са повећањем оптерећења такође (слика 6.12).

Са претходне слике се може приметити да екстраполација резултата МКЕ анализе даје поприлично добре резултате, поготово за ширину трага хабања при брзинама клизања од 0,25 m/s. Са порастом брзине клизања и порастом нормалног оптерећења расте и грешка процене екстраполације, са највећом грешком при највећем оптерећењу и брзини клизања од 1 m/s. Један од разлога је тај што се користи константна екстраполација, која не узима у обзир фактор хабања и остале карактеристике материјала битне за праћење хабања.

Код материјала А356+10SiC, ширина трага хабања се креће у границама од $2,92 \div 3,97$ mm за вредности добијене методом коначних елемената и од $2,92 \div 4,42$ mm за вредности добијене физичким експериментом. Вредност ширине трага хабања расте са повећањем брзине клизања и расте са повећањем оптерећења (табела 6.6). За разлику од претходног материјала А356, материјал А356+10SiC има другачији тренд понашања процене. Једина релативно приближна вредност се дешава при брзини клизања 0,25 m/s и нормалном оптерећењу од 10 N, што је приказано на слици 6.13.

Табела 6.6. Ширина трага хабања код материјала блока - A356+10SiC.

A356+10SiC - Ширина трага хабања, mm		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
МКЕ резултати				
Брзина клизања, m/s	0,25	2,928	3,605	3,91
	0,5	2,938	3,636	3,938
	1	2,973	3,664	3,977
Резултати физичког експеримента				
Брзина клизања, m/s	0,25	2,925	3,872	4,144
	0,5	3,059	3,945	4,23
	1	3,155	4,107	4,42

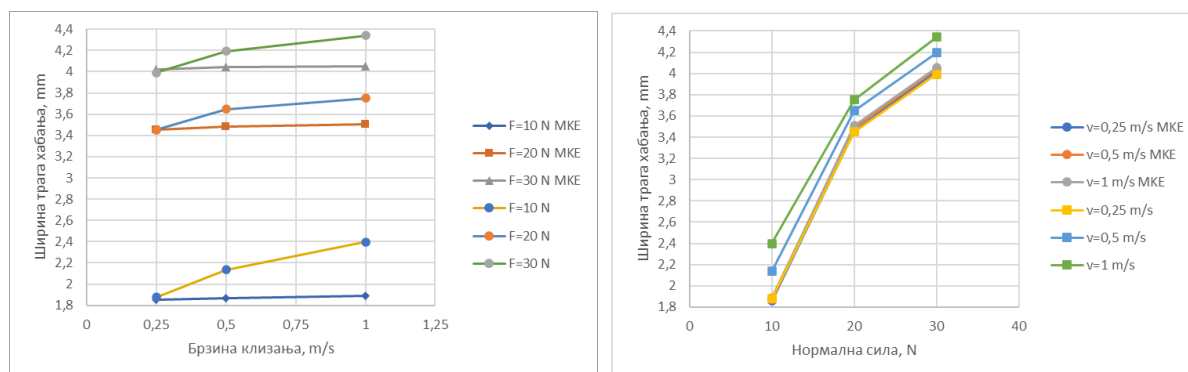


Слика 6.13. Дијаграм зависности ширине трага хабања и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - A356+10SiC.

Ширина трага хабања у случају материјала A356+10SiC+1Gr прати сличан тренд понашања само са већим вредностима у зависности од оптерећења (табела 6.7). Као и код претходних материјала, са порастом брзине клизања и порастом нормалног оптерећења расте и грешка процене екстраполације, са највећом грешком при брзини клизања од 1 m/s. За вредности ширине трага хабања при брзини од 0,25 m/s, процена константном екстраполацијом даје поприлично приближне резултате, док то није случај за остале вредности, као што је приказано на слици 6.14. Код материјала A356+10SiC+1Gr, ширина трага хабања се креће у границама од 1,85÷4,05 mm за вредности добијене методом коначних елемената и од 1,87÷4,34 mm за вредности добијене физичким експериментом.

Табела 6.7. Ширина трага хабања код материјала блока - A356+10SiC+1Gr.

A356+10SiC+1Gr - Ширина трага хабања, mm		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
МКЕ резултати				
Брзина клизања, m/s	0,25	1,854	3,457	4,02
	0,5	1,869	3,486	4,04
	1	1,886	3,508	4,054
Резултати физичког експеримента				
Брзина клизања, m/s	0,25	1,878	3,451	3,992
	0,5	2,135	3,649	4,194
	1	2,398	3,751	4,341

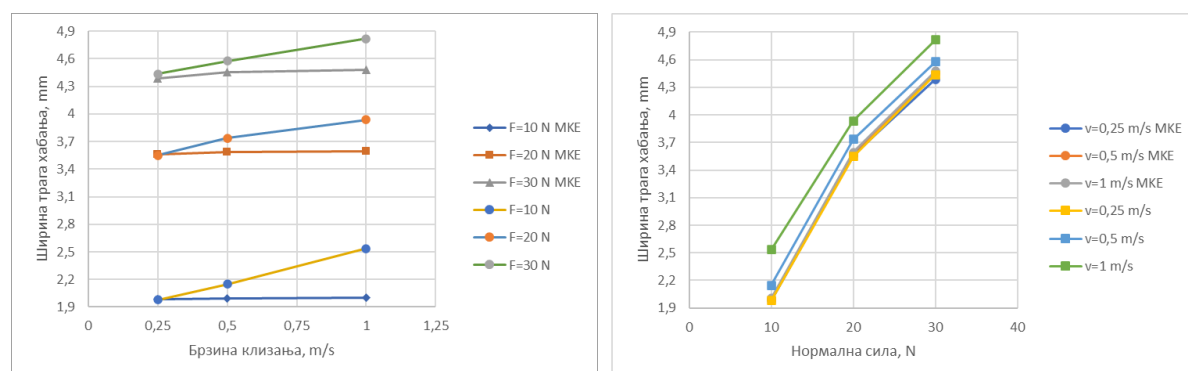


Слика 6.14. Дијаграм зависности ширине трага хабања и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - A356+10SiC+1Gr.

У табели 6.8 дате су вредности ширине трага хабања у зависности од брзине клизања и оптерећења за материјал A356+10SiC+3Gr. Ширину трага хабања се креће у границама од $1,98 \div 4,47$ mm за вредности добијене методом коначних елемената и од $1,97 \div 4,81$ mm за вредности добијене физичким експериментом. И у овом случају за вредности ширине трага хабања при брзини од 0,25 m/s, процена константном екстраполацијом даје поприлично приближне резултате, док то наравно није случај за остале вредности, због претходно поменутог разлога да се не узима у обзир фактор хабања и остале карактеристике материјала. Дијаграм зависности ширине трага хабања, брзине клизања и оптерећења је приказан на слици 6.15.

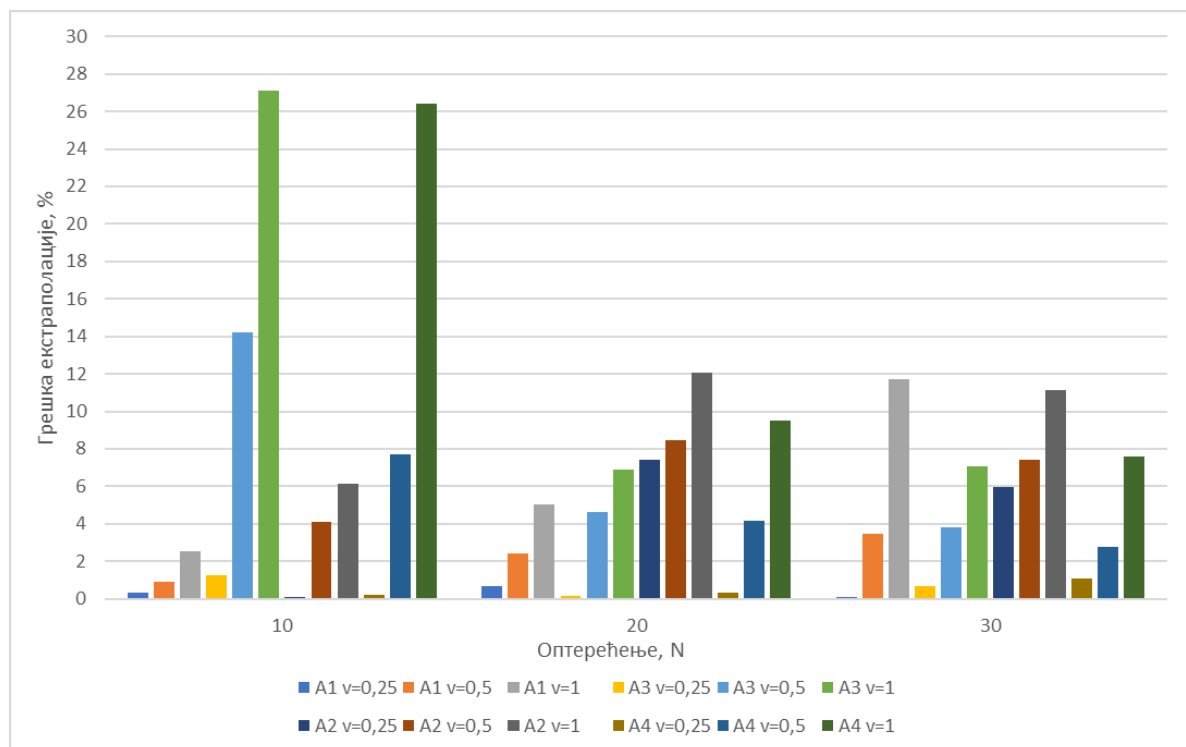
Табела 6.8. Ширину трага хабања код материјала блока - A356+10SiC+3Gr.

A356+10SiC - Ширину трага хабања, mm		Нормално оптерећење, N		
		10	20	30
МКЕ резултати				
Брзина клизања, m/s	0,25	1,982	3,561	4,387
	0,5	1,994	3,585	4,45
	1	2,005	3,593	4,475
Резултати физичког експеримента				
Брзина клизања, m/s	0,25	1,979	3,549	4,436
	0,5	2,148	3,735	4,575
	1	2,535	3,936	4,816



Слика 6.15. Дијаграм зависности ширине трага хабања и брзине клизања (лево) и оптерећења (десно) код материјала блока - A356+10SiC+3Gr.

Због постојања грешака у екстраполацији у оквиру дијаграма на слици 6.16 су приказане исте грешке изражене у процентима.



Слика 6.16. Грешка екстраполације у процентима.

Са претходног дијаграма може се приметити да већина грешака не прелази 10%. Највеће грешке екстраполације се налазе у материјалима A356+10SiC+1Gr и A356+10SiC+3Gr, при најмањем нормалном оптерећењу од 10 N и брзином клизања од 1 m/s. Грешке које се дешавају за ова два материјала прелазе 26%.

С обзиром да је већина вредности екстраполације са релативно ниским процентом грешке, може се рећи да је овакав тип предикције хабања довољан за неке основне проблеме, поготово ако се узме у обзир да ова метода скраћује изузетно време испитивања. За потребе неког озбиљнијег испитивања ова метода није препоручљива.

7. Закључак

Циљ овог рада је био да се на једном месту дају карактеристична поглавља у решавању статике и динамике хабања једног триболошког пара (фрикционог контакта).

Као бољи увод у тему објашњени су основни појмови трибологије, касније трибомеханичких система, трибометара као и поделе трибомеханичких система и трибометара. Трибомеханички системи, као динамички извршиоци елементарних функција, од посебног су значаја при конципирању и конструисању машинских система јер одређују поузданост машина у 80% случајева отказа. Главни разлози тестирања помоћу трибометара јесу упоређивање материјала који се користе за исте компоненте, селекција материјала за нову употребу, општу карактеризацију хабања и трења код материјала и тестирање механизма хабања код специфичних триболошких апликација. Тежиште рада приписано је моделирању трибомеханичког система - блок по диску и његовој даљој симулацији и анализи. Комплетна методологија моделирања блока по диску је обухваћена, као и приказ поступка анализе резултата у оквиру „ANSYS” софтвера. У оквиру методологије анализе укључено је: креирање геометрије модела и мреже коначних елемената, подешавање контакта и материјала и постављање граничних услова и оптерећења. Доказано је да вредности резултујућих напона опадају са повећањем брзине клизања и расту са повећањем оптерећења. Такође је доказано да са порастом оптерећења расте и разлика између минималног и максималног резултујућег напона, да при оптерећењима од 10 и 20 N испитивани материјали имају сличан тренд понашања резултујућег напона, што се касније мења при већем оптерећењу и да са порастом брзине клизања расте и разлика резултујућих напона између материјала. Промена материјала доноси нова сазнања о њиховим карактеристика при одређеним оптерећењима и режимима рада. Испитати реалне услове уз помоћ рачунара у којима функционише триболошки пар блок по диску је могуће, али уз пар поједностављења. Самим тим што је овакав тип испитивања простији од реалног физичког експеримента, не могу се очекивати релативно тачни резултати. У таквим случајевима целисходно је касније понављање испитивања користећи реалне трибометре.

Из свега поменутог, закључује се да је могуће остварити задовољавајуће резултате резултујућих напона као и задовољавајуће резултате у погледу хабања, али уз опрезност коришћења одређених фактора, јер неправилно постављање предуслова или недовољно познавање познатих параметара, може довести до грешака у резултатима од преко 25%. Премда је експеримент рађен помоћу софтвера новијег датума, због процене тачности резултата, препоручљиво је користити и друге релевантне софтвере из области методе коначних елемената за нелинеарне анализе. Најбољи избор софтвера за оваква испитивања су специјализовани софтвери који се заснивају на рачунању умирања и рађања материјала односно умирање коначних елемената. Даља истраживања би се сводила на структурну анализу осталих типова фрикционих контаката, а касније и употребу једног од специјализованих софтвера.

Литература

- [1] Hutchings, I., и Shipway, P. (2017). *Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials* (друго издање). Oxford, United Kingdom: Elsevier Ltd.
- [2] Stolarski, T. A. (2000). *Tribology in machine design*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- [3] Stojanovic, B., и Ivanovic, L. (2014). Tribomechanical Systems in Design. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 20(3), 25-34. Преузето са [researchgate.net/publication/261059637 Tribomechanical systems in design](https://researchgate.net/publication/261059637_Tribomechanical_systems_in_design).
- [4] Pranit, K. S. (2017). *Finite Element Modeling and Simulation of Wear on Pin on Disk*. (Објављени мастер рад). Delhi Technological University, Delhi, India.
- [5] Rajesh, A. M., Doddamani, S., Kaleemulla, M., и Bharath, K. N. (2020). Dry sliding wear simulation of hybrid aluminum metal matrix composites. *Adv Compos Hybrid Mater*, 3, 120–126. doi: [10.1007/s42114-020-00133-9](https://doi.org/10.1007/s42114-020-00133-9).
- [6] Amit, K. S., Vinayak, R., Rajnesh, T., и Baij, N. S. (2019). Numerical analysis of temperature distribution in sliding contacts of pin on disk model. *Vibroengineering PROCEDIA*, 29, 274-278. doi: [10.21595/vp.2019.21139](https://doi.org/10.21595/vp.2019.21139).
- [7] Yunfeng, Z., Zhan, J. S., и Zhe, Y. (2012). Wear Characteristics Analysis of Pin-on-disk Pairs based on Finite Element Model. *Applied Mechanics and Materials*, 148-149, 806-809. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.148-149.806](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.148-149.806).
- [8] Holmberg, K., Turunen, E., Ronkainen, H., Laukkanen, A., & Wallin, K. (2009). Computer modelling and simulation approach to developing wear resistant materials. *Tribologia*, 29(3-4), 38-43. Преузето са journal.fi/tribologia/article/view/69638/30804.
- [9] Kunal, K. B., и Ramkuman, P. (2019). Finite element method based sliding wear prediction of steel-on-steel contacts using extrapolation techniques. *Journal of Engineering Tribology*, 233(10), 1446-1463. doi: [10.1177/1350650119836813](https://doi.org/10.1177/1350650119836813).
- [10] Танасијевић, С. (2004). *Триболошки исправно конструисање*. Крагујевац, Србија: Машински Факултет Универзитета у Крагујевцу.
- [11] Menezes, P., Ingle, S., Nosonovsky, M., Kailas, S., и Lovell, M. (2013). *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*. New York, NY: Springer Science.
- [12] Bhushan, B. (2001). *Modern Tribology Handbook*. Columbus, Ohio: CRC Press.
- [13] Tribonet. (2019). Pin on Disk Test. Преузето са tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test.
- [14] Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology* (друго издање). Columbus, Ohio: John Wiley & Sons Ltd. doi: [10.1002/9781118403259](https://doi.org/10.1002/9781118403259).
- [15] Mang, T. (2014). *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Berlin, Germany: Springer.
- [16] Tribonet. (2019). Four Ball Tester. Преузето са tribonet.org/wiki/four-ball-tester.
- [17] Bi, Z. (2018). *Finite Element Analysis Applications*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-809952-0.00001-7.
- [18] Ansys. (2020). Ansys Help Workbench. Преузето са ansyshelp.ansys.com.

- [19] Танасијевић, С. (1989). *Основи трибологије машинских елемената*. Београд, Србија: Научна књига.
- [20] Стојановић, Б. (2013). *Триболошко понашање хибридних композита са А356 матрицом* (Објављена докторска дисертација). Факултет Инжењерских Наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, Србија.
- [21] Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. (2020). Центар за инжењерски софтвер и динамичка испитивања. Преузето са fink.rs/sr/fakultet/centri/303-centar-za-inzenjerski-softver-i-dinamicka-ispitivanja.