



MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Zsugorkötés vizsgálata Research of shrink-fitting

Budai Dávid
IV. éves gépészmérnök hallgató

Konzulens:
Dr. Deszpoth István
mérnöktanár
Gépgyártástechnológiai Tanszék

Miskolc, 2011

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
2. Szilárd illesztésű kötések, zsugorkötések.....	5
2.1. Szilárd illesztésű kötések.....	5
2.2. A sajtolt és zsugorkötés-fajták.....	7
2.3. Az erőzáró sajtolt kötések fajtái.....	8
2.4. Zsugorkötés szilárdsági méretezése.....	9
3. Zsugorkötés vizsgálata.....	11
3.1. Téma leírása.....	11
3.2. A kötésben résztvevő alkatrészek.....	11
4. Számítások.....	15
4.1. A helyettesítő modell.....	15
4.2. A helyettesítő modell helyességének vizsgálata.....	16
4.3. Szükséges sajtolóerők meghatározása különböző esetekre.....	18
4.3.1. Szerelés csak hevítéssel.....	18
4.3.1.1. Vizsgálat az 1. esetre (tengely 20°C, fogaskerek 180°C).....	19
4.3.1.2. Vizsgálat a 2. esetre (tengely 32°C, fogaskerek 180°C).....	25
4.3.1.3. Vizsgálat a 3. esetre (tengely melegszik, fogaskerék 165°C).....	28
4.4. A sajtolóerő csökkentésének lehetőségei.....	30
4.4.1. Tengely hűtése.....	31
4.4.2. Fogaskerek tovább melegítése.....	32
4.4.3. Fedés csökkentése.....	33
4.5. Számítások a csökkentett sajtolóerőre.....	34
4.5.1. Vizsgálat a 4. esetre (tengely melegszik, fogaskerék továbbmelegítve).....	34
4.5.2. Vizsgálat az 5. esetre (tengely hűtve, fogaskerek tovább melegítve).....	36
4.6. Eredmények összesítése.....	38
4.7. Összefoglalás.....	38
5. Felhasznált irodalom.....	39

1. Bevezetés

A ZF által gyártott sebességváltók a magas technológiai színvonal, a korszerű és termelékeny gyártás, valamint a modern szerelőüzemnek köszönhetően jelentős piaci szerepet töltenek be. A cég új technológiák bevezetésével (keményesztergálás alkalmazása köszörülés helyett, automatizált raktár, modern szerelősor kiépítése) igyekszik növelni hatékonyságát és gazdaságosságát.

Néhány sebességváltó típus szerelésénél időközönként túlzottan megnövekszik az erőszükséglet. Ez a dolgozat e probléma vizsgálatával foglalkozik keresve a lehetséges okokat, illetve a kapott eredmények alapján javaslatot téve a megoldásra, esetleg a szerelési folyamat gazdaságosabbá tételére.

A dolgozat első részében ismertetem a szilárdan illesztett kötések fajtáit, az alapvető méretezési összefüggéseket, valamint a számításaimnál használt helyettesítő modellt, melynek helyességét mérésekkel ellenőriztem.

A második részben a sajtolóerőre hatással lévő tényezőket vizsgálom. Ezek a következők:

- A környezet levegője miatt csökken az elméletileg meghatározott hőmérsékletkülönbség.
- A fogaskerekek a hevítőből kivéve hűlnek, amíg a tengelyre kerülnek.
- A felsajtolott fogaskerekek melegítik a tengelyt, ezzel csökkentve az érkező fogaskerekek és a tengely közötti hőmérsékletkülönbséget.

A harmadik fejezet a kapott eredmények értékelésével foglalkozik. A számítások alapján jól látható, hogy a befolyásoló tényezők miatt a szükséges erő akár kétszerese is lehet a számítottnak. A sajtolóerő csökkentésére az eredmények után javaslatot teszek.

TDK dolgozatomat a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt "Befejező precíziós megmunkálások kutatása" elnevezésű részprojekt támogatta.

2. Szilárd illesztésű kötések, zsugorkötések

2.1. Szilárd illesztésű kötések [3]

Szilárd illesztésű kötést általában kétféle konstrukciós elgondolásból készítenek.

- Valamilyen nagy fordulatszámú nyomatékvivő gépelem (fogaskerék, lánckerék, ékszíjtárcsa, stb.) hengeres agyának az adott tengely megfelelően kialakított hordozó felületére történő felerősítésére.
- Nagyobb méretű tárcsaszzerű alkatrészek erős kopásnak kitett futófelületeit alkotó abroncsszerű alkatrészek (vasúti kerékpár kerékabroncsának szerelése a kerékvázra, csigakerekek fogazott bronzkoszorújának szerelése, dugattyús belsőégésű motorok lendkerekeire erősített fogaskoszorú stb.) tárcsára szerelésére.

A szilárd illesztésű kötések alkalmazásának célja az első esetben az, hogy az ékelésnek, illetve a reteszelésnek a dinamikus kiegyensúlyozottságára kifejtett kedvezőtlen hatását kiküszöböljék, amíg a második esetben gyorsan kopó alkatrészek cserélhetősége, és a jó minőségű, tehát drága anyaggal való takarékoskodást

A szilárd illesztésű kötések alkalmazásának célja, hogy az összeszerelendő csap és az agy furatát túlfedéssel készítjük. Az összeszerelést csak úgy lehet elvégezni, hogy a kötésben résztvevő alkatrészek ideiglenesen, vagy véglegesen alakváltozást szenvednek. Összeszerelés után a túlfedés függvényében az érintkező hengeres felületek egymáshoz szorulnak. Az alkatrészek összeszerelését a következők szerint végezhetjük.

Szerelés sajtolással

A túlfedéssel készített alkatrészeket hideg állapotban, hossztengelyük irányában kifejtett, megfelelő nagyságú erővel egymásba sajtolják, rendszerint kenőanyag alkalmazásával. Az eljárás során az érintkező felületek kiálló egyenetlenségei kis mértékben elkenődnek. Az alkatrészek egymásba sajtolásakor különösen ügyelni kell arra, hogy a sajtolóerő hatásvonala mindig egy egyenesbe essen az összeszerelendő forgástestek közös geometriai tengelyével, máskülönben az agy megszorul a tengelyen és eleve feszültség ébred benne.

Nagyobb terhelésű kapcsolatoknál, például a vasúti kerékpárok tengelyvég-kerékagy kapcsolatánál a tengely hordozófelületét és a kerékagy furatát 1:300-as kúposágúra készítik el és a kerékvázat nagy erővel sajtolják a tengelyre.

Szerelés olajnyomással

Hengeres furatú gördülőcsapágyak belső gyűrűjének tengelyről való leszerelése, valamint kúpos furatú belső gyűrűk fel- és leszerelésére alkalmazzák ezt az eljárást. Ilyenkor az illeszkedő felületek közé nagy nyomással olajt juttatnak. A keletkező olajfilm az illeszkedő felületeket egymástól elválasztja, és így a súrlódóerőt nagymértékben csökkenti. Az olajnyomást olajszivattyú állítja elő. Az olajt általában a tengelyben kialakított furatokon, esetleg olajelosztó hornyokon keresztül vezetik az illeszkedő felületek közé.

A gördülőcsapágyak belső gyűrűjének tengelyszereléséhez a csapágyakat olajfürdőben kb. 120-130°C-ra melegítik, hogy az illeszkedésből adódó túlfedés csökkenjen, illetve megszűnjön. Így kisebb sajtolóerővel a hengeres furatú csapágyak is feszültségmentesen szerelhetők a tengelyre.

Szerelés hőmérséklet-különbséggel

A túlfedéssel készített alkatrészek túlfedését hőmérséklet-különbség létrehozásával ideiglenesen megszüntetik, így az alkatrészek egymásba viszonylag kis erővel sajtolhatók. A hőmérséklet kiegyenlítődése után a két felület egymásra feszül és így hozza létre a szilárd kötést. A kívánt hőmérséklet-különbséget az agy felmelegítésével és a tengely esetleges lehűtésével, vagy a kettő együttes alkalmazásával lehet elérni. Kísérletek megállapították, hogy az összekötendő két alkatrész között megfelelő nyomtatékvitel jöhet létre, ha a túlfedést azt átmérők egy ezrelékére alakítják ki, vagyis az úgynevezett relatív túlfedés $\varepsilon=0,001$.

Az így szerelt elemek között a kapcsolat erőzáró lesz, ami azt jelenti, hogy bizonyos forgatónyomatékot vagy axiális terhelést üzembiztosan tud átvinni a kötési felületek között ébredő súrlódás révén.

Az erőzáró kötéseknek mindig van egy olyan határterhelése, amelyet túllépve a kötés megcsúszik. Ez feltétlenül előnyt jelent az olyan, úgynevezett alakzáró kötésekkel szemben, amilyen kötést a két elem közé iktatott kötőelem (pl. ék, vagy retesz) létesít, vagy a két elem nem hengeres kialakítása (bordás, vagy poligon szelvény).

Alakzáró kötések esetén a túlterhelés vagy maradó alakváltozást vagy törést okoz, amely természetesen nemcsak a kötés, hanem a kapcsolódó két elempár tönkremenetelét is jelenti. Meg kell azonban jegyezni, hogy nagymértékű megcsúszás esetén az erőzárás is tönkremegy.

A sajtoló és zsugorkötések szerkezeti jelentősége az anyagmegtakarításban, egyszerűbb gyártásban és a különféle erőátvivő szerkezetek mellőzésében van. Ilyen elemek alkalmazása esetén a gyengített kedvezőtlen alakú tengelykeresztmetszet csak kisebb nyomaték átvitelét teszi lehetővé, mint a sajtoló

és zsugorkötés, ahol a teljes keresztmetszetet ki lehet használni. A sajtolt és zsugorkötés megengedhető igénybevétele nagyobbra választható, mivel a feszültségtorlódás kisebb. Az alakzáró kötések készítése során alkalmazott marás, üregelés, gyalulás elmarad, helyette a csapot és a furatot a lényegesen egyszerűbb hengeres vagy kúpos formára kell elkészíteni.

Természetesen a sajtolt és zsugorkötésekben is kerülni kell az éles feszültségnövekedést. Ilyeneket például az élnyomás okozhat az agyfurat szélénél. Ez elkerülhető a furat enyhén kúpos kifutásával.

Nehézséget jelent, hogy ezekhez a kötésekhez besajtoló berendezés (és adott esetben a kisajtoló, illetve a lehúzóberendezés) továbbá melegen szerelt nagyobb darabok esetén hevítőberendezés kell. Ezért újabban egyre kiterjedtebben használják a kúpos kötések.

2.2. A sajtolt és zsugorkötés-fajták [2]

A szakirodalom a külső elem vizsgálatával foglalkozik behatóbban, mert általában ebben alakul ki hamarabb veszélyes feszültségi állapot.

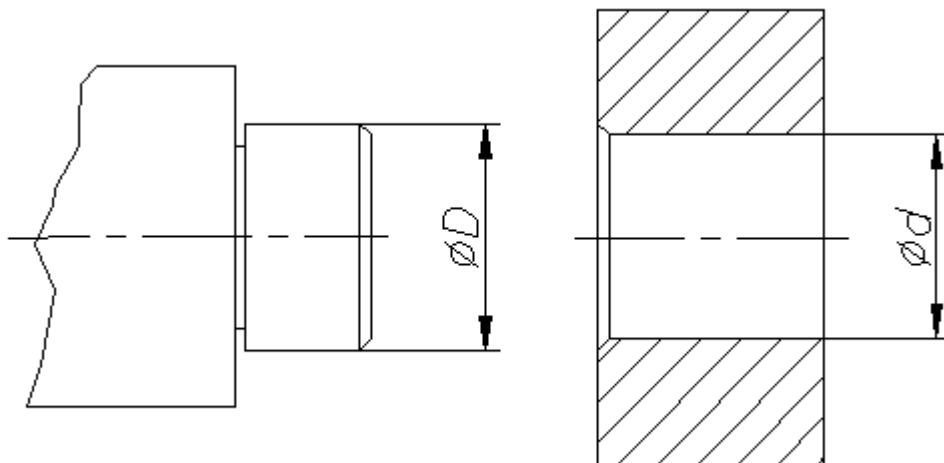
A klasszikus méretezési eljárások csak tiszta rugalmas igénybevételt engednek meg. Elhanyagolják a tengelyirányú feszültségeket és a méretváltozásokat, csak síkbeli feszültségi állapottal számolnak. A kötésben ébredő σ_t tangenciális és σ_r radiális feszültség főfeszültség, legnagyobb értékét mindkettő a kötési felületen éri el. Az igénybevétel nagyságát az ezekből számítható σ_{red} redukált feszültség határozza meg.

Az újabb méretezési eljárások bizonyos előnyök miatt vékony képlékeny réteg kialakulását is megengedik az agyban, a kötési felület környezetében. A képlékeny réteg nagyságát illetően az irodalom nem foglal állást. Ezt minden esetben mérlegelni kell. Általános elv, hogy a képlékeny rétet ne legyen nagyobb a kötési átmérő 5...10%-ánál.

A kötés elve azon alapszik, hogy a csap vagy a tengely illesztett átmérője F (fedés) méretkülönbséggel nagyobbra készül a furat átmérőjénél. Összeszerelés után ez a méretkülönbség olyan feszített állapotú kötést hoz létre, amelyben a két felület nagy erővel egymáshoz nyomódik, mikrostruktúrálisan belső érintkezésbe kerül, és nagy tangenciális vagy axiális erők átvitelére képes. A két elemet az összeszerelés előtti állapotban az 1. ábra szemlélteti.

A kísérleti eredmények $F=0,001D$ fedésig a rugalmassági elmélet szerinti lineáris összefüggéseket igazolják. Rugalmas-képlékeny kötés esetén nem kívánatos, hogy a képlékeny réteg vastagsága bizonyos értéket túlhaladjon, nehogy szétszereléskor a felületi érdesség simításától eltekintve maradó alakváltozás lépjen fel. Vastag képlékeny réteg esetén ugyanis a külső rugalmas tartománynak már nem lenne

elegendő potenciális energiája ahhoz, hogy a képlékeny réteget az eredeti méretig visszanyomja.



1. ábra

A fedés meghatározása:

$$F = D - d$$

Az 1. Táblázat a fedés nagyságától függő négy lehetséges alakváltozási kombinációt tartalmazza.

Eset	Belső elem	Külső elem
1	Rugalmas	Rugalmas
2	Rugalmas-képlékeny	Rugalmas
3	Rugalmas	Rugalmas-képlékeny
4	Rugalmas-képlékeny	Rugalmas-képlékeny

1. Táblázat

2.3. Az erőzáró sajtoló kötések fajtái [2]

Hidegen sajtoló kötések

Az olyan kötések, amelyeknek a két eleme összesajtoláskor szobahőmérsékletű. Ezeket axiális irányban egymásba sajtolják. A szereléshez sajtoló berendezés kell, amelyek növelik a költségeket. Alkalmazásuk elsősorban tömeggyártásban történik, ott is elsősorban kisméretű alkatrészek esetén indokolt.

Zsugorkötés

A tárcsát vagy gyűrűt kb. 250...350°C-ra melegítjük, rendszerint olajban, de lehet forró levegőben, gázban, kemencében vagy forró tűzhelylapon is. A felmelegített és kitágult furatos elemet külön erő nélkül lehet a csapra, illetve a tengelyre szerelni. A csap bevezetése a furatba kényelmes és biztos, az eljárás nem költséges. A furatos elem lehűlésekor radiális irányban rázsugorodik a csapra, s az érintkezési felületek között kialakuló nagy nyomás következtében a kötés alkalmas erő és nyomaték átvitelére is. A melegítés gyakorlatilag nem rontja az acél szilárdsági tulajdonságait, mert a szokásos 400°C felső határig nem okoz szövetszerkezeti változásokat. A zsugorkötésben esetleg létrejövő képlékeny alakváltozás így szénacélokra és ötvöztött acélokra is, hideg alakításnak számít. E hőmérséklet fölé melegíteni viszont nem ajánlatos.

Táguló kötések

Ez esetben a csap lehűtésével hozzák létre az összeszerelhetőséget. Az esetek nagy részében -193°C-ú folyékony levegőben hűtik a tengelyt. Kisebb fedések esetén száraz jeget, folyékony nitrogént is alkalmaznak melyek párolgási hőmérséklete magasabb, mint a folyékony oxigéné. A táguló kötéssel szerelhető fedés felső határa 1,5‰.

Ez a kötésfajta erőátvitel tekintetében kedvező tulajdonságú, mert azonos fedés esetén mintegy 10%-kal nagyobb kötőerőt ad, mint az olajban melegített zsugorkötés. Alkalmazhatóságának azonban gátat szab az a fizikai tény, hogy -273°C alá elméletileg is lehetetlen lehűteni, gyakorlatban pedig kb. -200°C a mélyhűtés alsó határa.

Bizonyos esetekben, nagy fedésű kötések szereléséhez zsugor-táguló kötések is alkalmaznak, vagyis a mélyhűtött csapra húznak fel forró levegőben melegített kereket.

2.4. Zsugorkötés szilárdsági méretezése [1]

Zsugorkötések szilárdságát az érintkező felületeket összeszorító erő és az anyagminőségtől függő súrlódási tényező szorzataként adódó súrlódóerő biztosítja.

$$F_s = \mu \cdot F_N$$

A felületeket összeszorító F_N erő nagyságát az érintkező felületek nagyságán kívül az érintkező felületek között kialakuló palástnyomás ismeretében számíthatjuk ki.

$$F_N = p \cdot d \cdot \pi \cdot L$$

Az egyenletben szereplő p palástnyomás értékét több tényező is befolyásolja:

- Az egymásba helyezett anyagok rugalmassági tényezőivel egyenes arányban áll.
- A kötés előtt kialakított túlfedés nagyságával egyenes arányban áll.
- Az egymásba helyezett anyagok közül a csap jellegű alkatrész átmérőjével fordított,
- míg a koszorú jellegű alkatrész vastagságával egyenes arányban áll.

Megfelelő túlfedéssel készített zsugorkötések esetén a kialakuló palástnyomás értékét acéltengely és öntöttvas agynál kb. 30-50 MPa-ra, acéltengely és acélagy között 50-100 MPa-ra vehetjük föl. Pontos értékét a következő összefüggésből számíthatjuk:

$$p = \theta \cdot \frac{[F - 2 \cdot \varphi \cdot (R_{z1} + R_{z2})]}{d}$$

$$\theta = \frac{1}{\frac{C_1 - \nu_1}{E_1} + \frac{C_2 + \nu_2}{E_2}}$$

Ahol F = a fedés

φ = a mikroegyenetlenségek letördelési tényezője (általában 0,5...0,6)

R_z = a felületi érdesség.

d = az illesztés névleges átmérője

Θ = rugalmassági együttható

E = rugalmassági modulus

ν = Poisson szám

$$C_1 = \frac{1 + a_1^2}{1 - a_1^2} \quad C_2 = \frac{1 + a_2^2}{1 - a_2^2}$$

Ahol a = relatív vékonyfalúsági tényező

$$a = \frac{d_{\text{belső}}}{d_{\text{külső}}}$$

A vékonyfalúsági tényező azt mutatja meg, hogy a fedésből eredő feszültségre mennyire van hatással a falvastagság. Egy vékony falú testet a feszültségből eredő erők jobban képesek alakváltozásra kényszeríteni, mint a vastag falú testeket. A számításoknál emiatt azt az esetet kell megadni, amihez a legtöbb erő szükséges. Ez mindig a legnagyobb átmérő.

Adott csavarónyomaték átvitelére alkalmas zsugorkötés tervezéséhez további adatok szükségesek. Ezek az L csaphosszúság és az átmérő viszonya, valamint a kialakuló súrlódási tényező.

A sajtolással létesített kötéshez szükséges F_s sajtolóerő minimális értéke:

$$F_{\min} = \mu \cdot d \cdot \pi \cdot L \cdot p = F_s$$

A zsugorkötések tervezésénél biztosítandó túlfedés értékét, vagyis a relatív túlfedést az alkatrész átmérőjének egy ezrelékére szokás felvenni.

Zsugorkötéssel tengelyre szerelt nyomatékszarmasztató gépelemek (szíjtárcsák, fogaskerek, stb.) által átvihető nyomaték legnagyobb értékét a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$M_{\max} = F_s \cdot \frac{d}{2} = \mu \cdot d \cdot \pi \cdot L \cdot p \cdot \frac{d}{2}$$

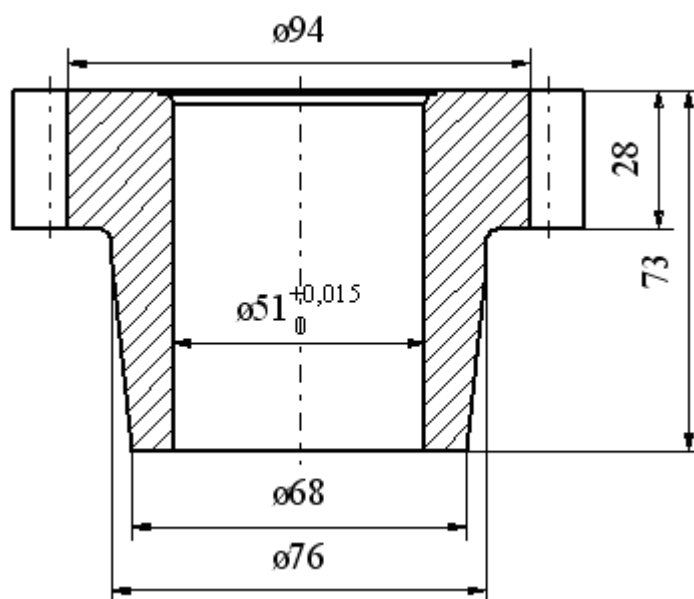
3. Zsugorkötés vizsgálata

3.1. Téma leírása

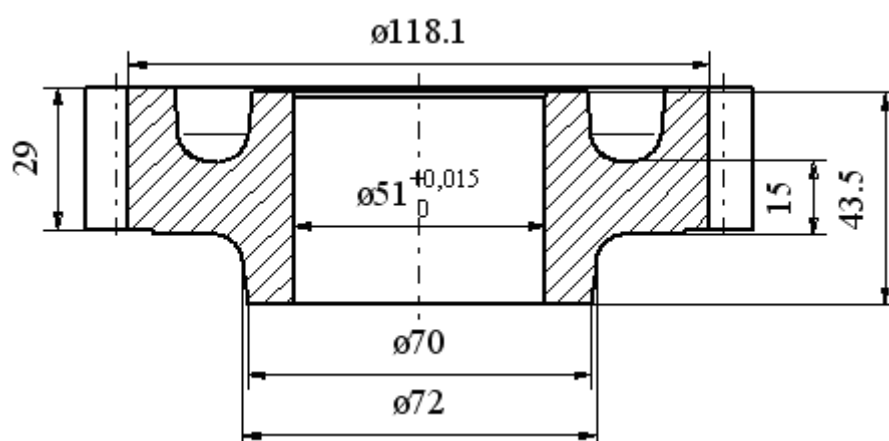
A következő fejezetben egy konkrét sebességváltó szerelésénél alkalmazott zsugorkötést fogok vizsgálni. A sebességváltó a ZF Hungária KFT által szerelt 6S-700 típus. Az ebben a váltóban található előtéttengelyre zsugorkötéssel rögzítik a fogaskerekeket. A szerelésnél változó időközönként nehézségek lépnek fel. Az utolsó kereket felsajtolásánál sokszor túlzottan nagy erő szükséges. A vizsgálatomban a lehetséges okokat, és megoldásokat fogom ismertetni.

3.2. A kötésben résztvevő alkatrészec

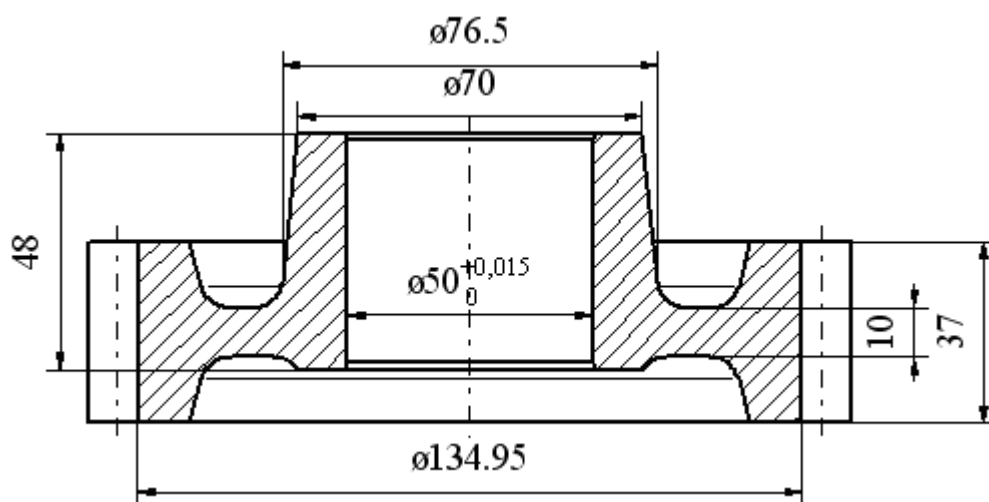
- 2. ábra: 1347-303-005 számú fogaskerék
- 3. ábra: 1347-303-004 számú fogaskerék
- 4. ábra: 1347-303-003 számú fogaskerék
- 5. ábra: 1347-303-002 számú fogaskerék
- 6. ábra: 1347-303-008 számú tengely



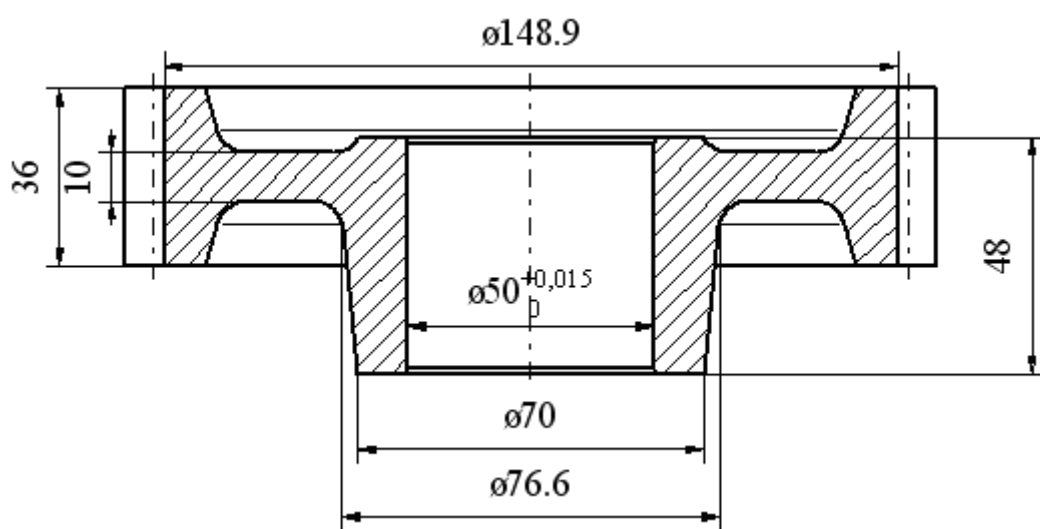
2. ábra



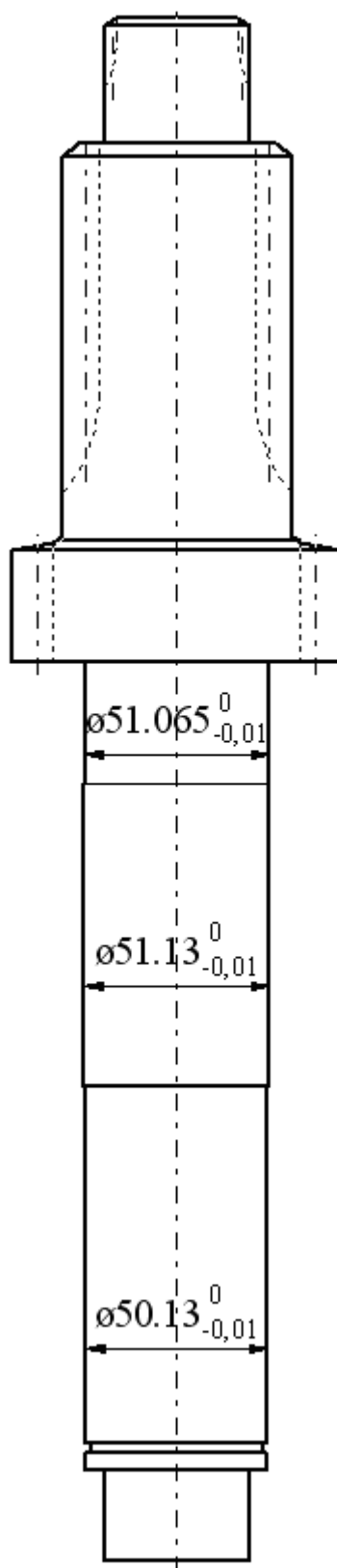
3. ábra



4. ábra



5. ábra

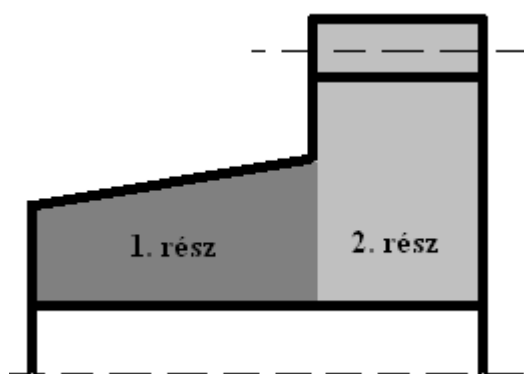


6. ábra

4. Számítások

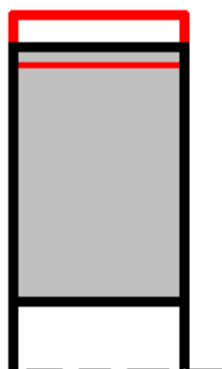
4.1. A helyettesítő modell

A számítások megkönnyítése miatt be kell vezetni egy modellt. A fogaskerekek könnyen feloszthatóak egy tárcsa és egy henger alakú részre (7. ábra). Ezekre az alkatrészekre külön kiszámolom a felületek között ébredő palástnyomást, majd a szükséges sajtolóerőt. Ezután a két részt egyesítem, így a két erő összegeként megkapom a teljes alkatrész felsajtolásához szükséges erőt.



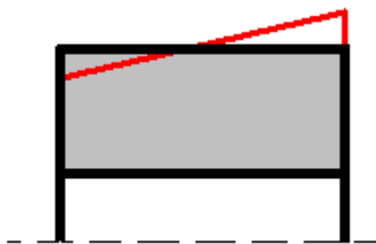
7. ábra

A fogaskerekek fogazott részeinél a fejkör és a lábkör számtani közepével számolok, mivel megközelítőleg a két kör közé zárt térfogat fele fog, fele pedig fogárok. (8. ábra) A számításoknál így figyelembe tudom venni a fogak radiális irányú merevítését, és a fogárok ilyen irányú gyengítéseit.



8. ábra

A kúpos részekre a helyettesítő modell egy hengeres test, amelynek átmérője a kúp kis és nagy átmérőjének számtani közepe. (9. ábra)



9. ábra

4.2. A helyettesítő modell helyességének vizsgálata

A vizsgált sajtológépen nem állt rendelkezésre út-erő mérés, így a modell helyességét egy másik sajtológépen végeztem el.

A sajtolóerő meghatározásához szükséges adatok:

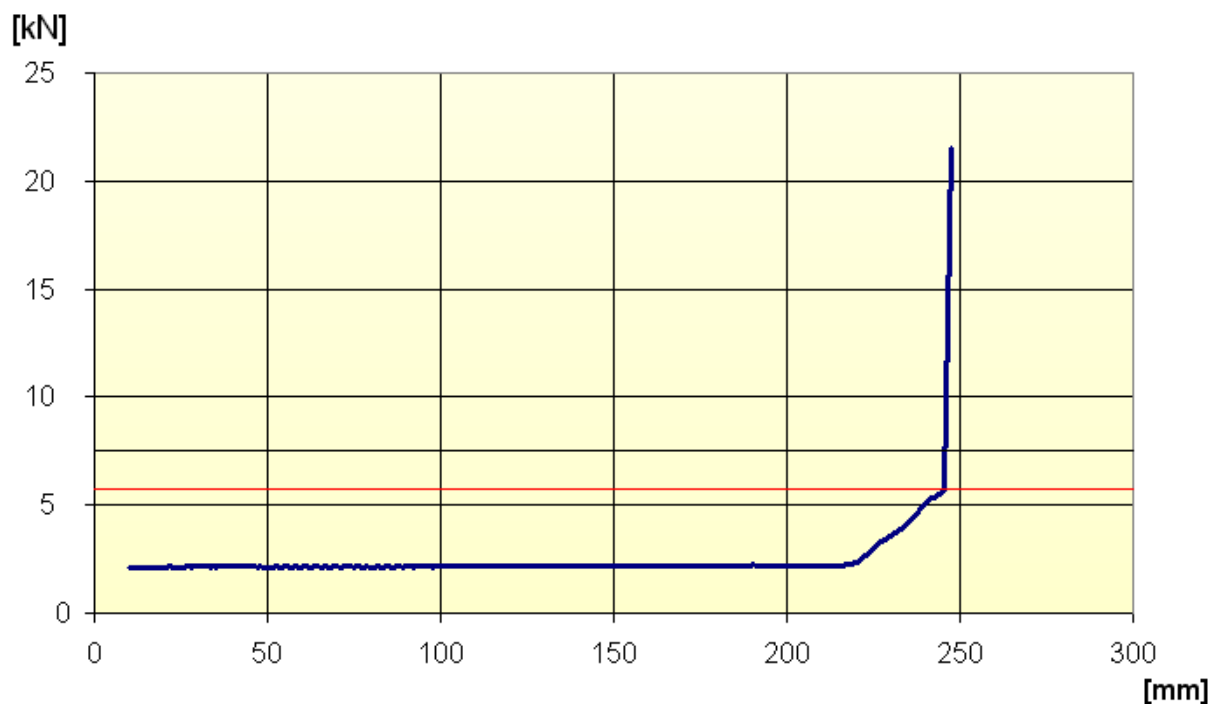
Jel	Megnevezés	Érték	Mértékegység
d_f	Fogaskerék illeszkedő átmérő legkisebb értéke	36	mm
d_k	Tengely illeszkedő átmérő legnagyobb értéke	36,086	mm
T_f	Fogaskerék hőmérséklete	180	°C
T_t	Tengely hőmérséklete	20	°C
α_f	Fogaskerék lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
α_k	Tengely lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
β_t	Tengely mélyhűtési együtthatója	0,0000085	1/°C
φ	Mikroegyenetlenségek letördelési tényezője (0,5...0,6)	0,55	
R_{zf}	Fogaskerék felületi érdesség	6	μm
R_{zt}	Tengely felületi érdesség	6	μm
d	Illesztés névleges átmérője	36	mm
ν_f	Fogaskerék Poisson száma	0,3	
ν_t	Tengely Poisson száma	0,3	
E_f	Fogaskerék rugalmassági modulus	210000	MPa
E_t	Tengely rugalmassági modulus	210000	MPa
	Fogaskerék 1. rész külső átmérője	64	mm
	Fogaskerék 1. rész belső átmérője	36	mm
	Fogaskerék 1. rész hossza	17	mm
	Fogaskerék 2. rész külső átmérője	121,617	mm
	Fogaskerék 2. rész belső átmérője	36	mm
	Fogaskerék 2. rész hossza	10	mm
	Tengely külső átmérője	36,086	mm

	Tengely belső átmérője (tömör tengely esetén 0)	0	mm
l	Érintkező felület hossza	27	mm
μ	Felületek között ébredő súrlódási tényező	0,12	

Eredmények

F_N	Normál átmérőkülönbség	0,086	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	36,06624	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,06624	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	36,086	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,01976	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	13,079427	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	17,45682	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	3016,1368	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	2367,9827	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	5384,1195	N
		5,3841195	kN

A fogaskerék felsajtolásához tehát 5,3 kN szükséges. A gép által kirajzolt diagram (10. ábra) a következő:



10. ábra

A grafikonon megjelent sajtolóerő közel azonos az általam számítottal, így a számítási modell helyessége elfogadható.

4.3. Szükséges sajtolóerők meghatározása különböző esetekre

4.3.1. Szerelés csak hevítéssel

A fogaskerekeket zsugorkötéssel rögzítik a tengelyre. Az első esetben megvizsgáljuk, hogy milyen hőmérsékletre kell felhevíteni a kerekeket.

Párosított átmérőket a (2. Táblázat) tartalmazza.

6S-700	005	004	003	002
Fogaskerék	51 ^{+0,015} mm	51 ^{+0,015} mm	50 ^{+0,015} mm	50 ^{+0,015} mm
Tengely	51,13 ^{-0,01} mm	51,13 ^{-0,01} mm	50,13 ^{-0,01} mm	50,13 ^{-0,01} mm
Nagy fedés	0,13 mm	0,13 mm	0,13 mm	0,13 mm
Kis fedés	0,105 mm	0,105 mm	0,105 mm	0,105 mm

2. Táblázat

Az adatokból jól látszik, hogy minden fogaskeréknél a legnagyobb fedés **0,13 mm**. Ez azt jelenti, hogy ennél nagyobb fedés nem lehet, tehát ez számunkra a „legrosszabb” eset. A zsugorkötésnél ezt a fedést kell részlegesen vagy teljesen megszüntetni.

A fedés leküzdéséhez szükséges hőmérsékletkülönbség.

A melegítés hatására a tengely átmérője a következő összefüggés szerint változik:

$$\Delta d = d \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Ahol, d = kezdeti átmérő (mm)

α = lineáris hőtágulási tényező

ΔT = hőmérsékletváltozás

A könnyed szereléshez 0,01...0,02 játék javasolt az alkatrészek között. Mivel a megadott méreteket szobahőmérsékleten (20°C) értelmezzük, így a számításoknál ez a kiinduló hőmérséklet.

003 és 002

$$\Delta d = d \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta d = \text{fedés} = 0,13 \text{ mm}$$

$$J = 0,01 \text{ mm}$$

$$d = 50 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,0000115 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

$$T_0 = 20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$T_1 = \frac{\Delta d}{d \cdot \alpha} + T_0 = \frac{0,13}{50 \cdot 0,0000115} + 20 = 263,47^{\circ}\text{C}$$

004 és 005

$$\Delta d = d \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\Delta d = \text{fedés} = 0,13 \text{ mm}$$

$$d = 51 \text{ mm}$$

$$J = 0,01 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,0000115 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

$$T_0 = 20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$T_1 = \frac{\Delta d}{d \cdot \alpha} + T_0 = \frac{0,13}{51 \cdot 0,0000115} + 20 = 258,7^{\circ}\text{C}$$

Elméletben tehát a fogaskereket 263°C , illetve $258,7^{\circ}\text{C}$ -ra kell felhevíteni, hogy a fedés megszűnjön, és a fogaskerék a tengelyre könnyedén felhelyezhető legyen.

A fogaskerekeket 180°C -on eresztik meg az edzés után. Az ismereteink alapján tudjuk, hogy nem ajánlatos e hőmérséklet fölé hevíteni újra a fogaskereket, mert az az anyag kilágyulásához vezethet. A fogaskerekeknél a keménységnek elég szűk tűrése van, emiatt a maximális hőmérséklet felső határát 180°C -ra kell vennünk.

Ez azt jelenti, hogy a fedés nem fog megszűnni. A 180°C -ra ($\Delta T = 160^{\circ}\text{C}$) felmelegített fogaskerekeknél a fedések a következő képen alakulnak.

003 és 002

$$F - (d \cdot \alpha \cdot 160) = 0,13 - (50 \cdot 0,0000115 \cdot 160) = 0,038 \text{ mm}$$

005 és 004

$$F - (d \cdot \alpha \cdot 160) = 0,13 - (51 \cdot 0,0000115 \cdot 160) = 0,03616 \text{ mm}$$

A zsugorkötésnél tehát ezekkel a fedésekkel kell számolnunk.

4.3.1.1. Vizsgálat az 1. esetre (tengely 20°C , fogaskerekek 180°C)**005**

Jel	Megnevezés	Érték	
d_f	Fogaskerék illeszkedő átmérő legkisebb értéke	51	mm
d_k	Tengely illeszkedő átmérő legnagyobb értéke	51,13	mm

T_f	Fogaskerék hőmérséklete	180	°C
T_t	Tengely hőmérséklete	20	°C
α_f	Fogaskerék lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
α_k	Tengely lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
β_t	Tengely mélyhűtési együtthatója	0,0000085	1/°C
φ	Mikroegyenetlenségek letördelési tényezője (0,5...0,6)	0,55	
R_{zf}	Fogaskerék felületi érdesség	4	μm
R_{zt}	Tengely felületi érdesség	6	μm
d	Illesztés névleges átmérője	51	mm
ν_f	Fogaskerék Poisson száma	0,3	
ν_t	Tengely Poisson száma	0,3	
E_f	Fogaskerék rugalmassági modulus	210000	MPa
E_t	Tengely rugalmassági modulus	210000	MPa
	Fogaskerék 1. rész külső átmérője	105,05	mm
	Fogaskerék 1. rész belső átmérője	51	mm
	Fogaskerék 1. rész hossza	28	mm
	Fogaskerék 2. rész külső átmérője	72	mm
	Fogaskerék 2. rész belső átmérője	51	mm
	Fogaskerék 2. rész hossza	45	mm
	Tengely külső átmérője	51,13	mm
	Tengely belső átmérője (tömör tengely esetén 0)	0	mm
l	Érintkező felület hossza	73	mm
μ	Felületek között ébredő súrlódási tényező	0,12	

Eredmények

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,09384	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,09384	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,13	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,03616	mm
a_2'	Fogaskerék 1. rész relatív vékonyfalúsága	0,4854831	
a_2''	Fogaskerék 2. rész relatív vékonyfalúsága	0,7083333	
a_1	Tengely relatív vékonyfalúsága	0	
C_2'	Tényező (fogaskerék 1. rész)	1,6167524	

$C_{2''}$	Tényező (fogaskerék 2. rész)	3,0139373	
C_1	Tényező (tengely)	1	
Θ_1	Együttható 1. rész	80252,146	
Θ_2	Együttható 2. rész	52317,708	
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	39,591059	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	25,810069	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	21302,777	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	22319,412	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	43622,189	N
		43,622189	kN

004

Jel	Megnevezés	Érték	
d_f	Fogaskerék illeszkedő átmérő legkisebb értéke	51	mm
d_k	Tengely illeszkedő átmérő legnagyobb értéke	51,13	mm
T_f	Fogaskerék hőmérséklete	180	°C
T_t	Tengely hőmérséklete	20	°C
α_f	Fogaskerék lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
α_k	Tengely lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
β_t	Tengely mélyhűtési együtthatója	0,0000085	1/°C
φ	Mikroegyenetlenségek letördelési tényezője (0,5...0,6)	0,55	
R_{zf}	Fogaskerék felületi érdesség	4	μm
R_{zt}	Tengely felületi érdesség	6	μm
d	Illesztés névleges átmérője	51	mm
ν_f	Fogaskerék Poisson száma	0,3	
ν_t	Tengely Poisson száma	0,3	
E_f	Fogaskerék rugalmassági modulus	210000	MPa
E_t	Tengely rugalmassági modulus	210000	MPa
	Fogaskerék 1. rész külső átmérője	127,05	mm
	Fogaskerék 1. rész belső átmérője	51	mm
	Fogaskerék 1. rész hossza	29	mm
	Fogaskerék 2. rész külső átmérője	70	mm
	Fogaskerék 2. rész belső átmérője	51	mm
	Fogaskerék 2. rész hossza	15,5	mm
	Tengely külső átmérője	51,13	mm
	Tengely belső átmérője (tömör tengely esetén 0)	0	mm
l	Érintkező felület hossza	44,5	mm

μ	Felületek között ébredő súrlódási tényező	0,12	
-------	---	------	--

Eredmények

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,09384	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,09384	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,13	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,03616	mm
a_2'	Fogaskerék 1. rész relatív vékonyfalúsága	0,4014168	
a_2''	Fogaskerék 2. rész relatív vékonyfalúsága	0,7285714	
a_1	Tengely relatív vékonyfalúsága	0	
C_2'	Tényező (fogaskerék 1. rész)	1,384175	
C_2''	Tényező (fogaskerék 2. rész)	3,2627229	
C_1	Tényező (tengely)	1	
Θ_1	Együttható 1. rész	88080,781	
Θ_2	Együttható 2. rész	49264,286	
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	43,453185	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	24,303714	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	24215,904	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	7239,1141	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	31455,018	N
		31,455018	kN

003

Jel	Megnevezés	Érték	
d_f	Fogaskerék illeszkedő átmérő legkisebb értéke	50	mm
d_k	Tengely illeszkedő átmérő legnagyobb értéke	50,13	mm
T_f	Fogaskerék hőmérséklete	180	°C
T_t	Tengely hőmérséklete	20	°C
α_f	Fogaskerék lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
α_k	Tengely lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
β_t	Tengely mélyhűtési együtthatója	0,0000085	1/°C
φ	Mikroegyenetlenségek letördelési tényezője (0,5...0,6)	0,55	
R_{zf}	Fogaskerék felületi érdesség	4	μm

R_{zt}	Tengely felületi érdesség	6	μm
d	Illesztés névleges átmérője	51	mm
ν_f	Fogaskerék Poisson száma	0,3	
ν_t	Tengely Poisson száma	0,3	
E_f	Fogaskerék rugalmassági modulus	210000	MPa
E_t	Tengely rugalmassági modulus	210000	MPa
	Fogaskerék 1. rész külső átmérője	156,875	mm
	Fogaskerék 1. rész belső átmérője	50	mm
	Fogaskerék 1. rész hossza	36	mm
	Fogaskerék 2. rész külső átmérője	70	mm
	Fogaskerék 2. rész belső átmérője	51	mm
	Fogaskerék 2. rész hossza	22	mm
	Tengely külső átmérője	50,13	mm
	Tengely belső átmérője (tömör tengely esetén 0)	0	mm
l	Érintkező felület hossza	58	mm
μ	Felületek között ébredő súrlódási tényező	0,12	

Eredmények

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,092	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,092	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,13	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,038	mm
$a_{2'}$	Fogaskerék 1. rész relatív vékonyfalúsága	0,3187251	
$a_{2''}$	Fogaskerék 2. rész relatív vékonyfalúsága	0,7285714	
a_1	Tengely relatív vékonyfalúsága	0	
$C_{2'}$	Tényező (fogaskerék 1. rész)	1,2261444	
$C_{2''}$	Tényező (fogaskerék 2. rész)	3,2627229	
C_1	Tényező (tengely)	1	
Θ_1	Együttható 1. rész	94333,503	
Θ_2	Együttható 2. rész	49264,286	
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	49,941266	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	26,081092	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	33872,164	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	10810,091	N

Fs	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	44682,256	N
		44,682256	kN

002

Jel	Megnevezés	Érték	
d_f	Fogaskerék illeszkedő átmérő legkisebb értéke	50	mm
d_k	Tengely illeszkedő átmérő legnagyobb értéke	50,13	mm
T_f	Fogaskerék hőmérséklete	180	°C
T_t	Tengely hőmérséklete	20	°C
α_f	Fogaskerék lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
α_k	Tengely lineáris hőtágulási együtthatója	0,0000115	1/°C
β_t	Tengely mélyhűtési együtthatója	0,0000085	1/°C
φ	Mikroegyenetlenségek letördelési tényezője (0,5...0,6)	0,55	
R_{zf}	Fogaskerék felületi érdesség	4	μm
R_{zt}	Tengely felületi érdesség	6	μm
d	Illesztés névleges átmérője	51	mm
ν_f	Fogaskerék Poisson száma	0,3	
ν_t	Tengely Poisson száma	0,3	
E_f	Fogaskerék rugalmassági modulus	210000	MPa
E_t	Tengely rugalmassági modulus	210000	MPa
	Fogaskerék 1. rész külső átmérője	145,125	mm
	Fogaskerék 1. rész belső átmérője	50	mm
	Fogaskerék 1. rész hossza	37	mm
	Fogaskerék 2. rész külső átmérője	70	mm
	Fogaskerék 2. rész belső átmérője	51	mm
	Fogaskerék 2. rész hossza	22	mm
	Tengely külső átmérője	50,13	mm
	Tengely belső átmérője (tömör tengely esetén 0)	0	mm
l	Érintkező felület hossza	59	mm
μ	Felületek között ébredő súrlódási tényező	0,12	

Eredmények

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,092	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,092	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,13	mm

Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,038	mm
a_2'	Fogaskerék 1. rész relatív vékonyfalúsága	0,3445306	
a_2''	Fogaskerék 2. rész relatív vékonyfalúsága	0,7285714	
a_1	Tengely relatív vékonyfalúsága	0	
C_2'	Tényező (fogaskerék 1. rész)	1,2693782	
C_2''	Tényező (fogaskerék 2. rész)	3,2627229	
C_1	Tényező (tengely)	1	
Θ_1	Együttható 1. rész	92536,362	
Θ_2	Együttható 2. rész	49264,286	
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	48,989838	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	26,081092	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	34149,837	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	10810,091	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	44959,928	N
		44,959928	kN

Összesített eredmények

005 43,62 kN
004 31,45 kN
003 44,68 kN
002 44,95 kN

Elméletileg tehát ilyen erők szükségesek az egyes fogaskerek felajtolásához. A 004-es kerék valamivel kevesebb erőt igényel, mert a fogaskerék a többinél rövidebb, ezáltal az érintkező felület is kisebb.

4.3.1.2. Vizsgálat a 2. esetre (tengely 32°C, fogaskerek 180°C)

A fentebb számolt eredmények nem tükrözik teljesen a valóságot. A megadott tengely méretek 20°C-on vannak értelmezve, azonban a valóság más. A szerelőüzemben a levegő hőmérséklete nem 20°C, hanem 25-28°C, nyáron pedig elérheti a 35-38°C-ot is. Ez a tengely tágulását eredményezi, ami miatt a fedések is megnőnek. A fedés növekedésével pedig a szükséges erők is nagyobbak lesznek. A következő részben ezt a tényt veszem figyelembe a számításaimnál. A tengelyek hőmérsékletét 32°C-ra veszem. Ez valamilyen szinten középértéke a nyári és az általános hőmérsékletnek.

Ezzel a hőmérsékletkülönbséggel számolva a közel valós fedésértékek a következők:

003 és 002

$$\Delta d_{\text{tengely}} = d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 50,13 \cdot 0,0000115 \cdot 12 = 0,0069 \text{ mm}$$

$$\Delta d_{\text{fogaskerék}} = d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 50 \cdot 0,0000115 \cdot 160 = 0,092 \text{ mm}$$

$$F_{\text{valós}} = (d_{\text{tengely}} + \Delta d_t) - (d_{\text{fogaskerék}} + \Delta d_f) = (50,13 + 0,0069) - (50 + 0,092) = 0,0449 \text{ mm}$$

004 és 005

$$\Delta d_{\text{tengely}} = d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 51,13 \cdot 0,0000115 \cdot 12 = 0,007 \text{ mm}$$

$$\Delta d_{\text{fogaskerék}} = d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 51 \cdot 0,0000115 \cdot 160 = 0,0938 \text{ mm}$$

$$F_{\text{valós}} = (d_{\text{tengely}} + \Delta d_t) - (d_{\text{fogaskerék}} + \Delta d_f) = (51,13 + 0,007) - (51 + 0,0938) = 0,0432 \text{ mm}$$

Eredmények

005

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,09384	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,09384	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,137056	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0070559	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0432159	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	50,694085	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	33,048317	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	27276,987	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	28578,73	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	55855,717	N
		55,855717	kN

004

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,09384	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,09384	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,137056	mm

Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0070559	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0432159	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	55,639317	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	31,119515	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	31007,079	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	9269,2712	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	40276,35	N
		40,27635	kN

003

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,092	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,092	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,136918	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0069179	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0449179	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	62,737217	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	32,76359	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	42550,89	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	13579,853	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	56130,743	N
		56,130743	kN

002

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,092	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,092	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,136918	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0069179	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0449179	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	61,542015	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	32,76359	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	42899,708	N

F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	13579,853	N
F _s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	56479,56	N
		56,47956	kN

Összesített eredmények

005 55,85 (+30%)
004 40,27 kN (+28%)
003 56,13 kN (+26%)
002 56,47 kN (+25%)

A számítások alapján jól látszik, hogy ez a kis hőmérsékletváltozás is mennyivel megnövelte az erőszükségletet.

4.3.1.3. Vizsgálat a 3. esetre (tengely melegszik, fogaskerék 165°C)

A számításaink azonban még mindig nem egészen tükrözik a valóságot. A tengely hőmérséklete nem állandó, ahogyan a fogaskerekeké sem. A szerelés közbeni méréseimnél azt tapasztaltam, hogy a fogaskerekek a melegítóből kivéve 170-175°C-osak. Mire a dolgozó a tengelyre helyezi őket, már csak 160-165°C-osak. A tengely az első kerék felsajtolása után rohamosan elkezd melegedni. A második kerék érkezésekor már 35...40°C, a harmadik kerék érkezésekor 50...55°C, míg az utolsó fogaskerék felsajtolásakor 70-80°C-os is lehet. Ez a melegedés, valamint a fogaskerekek hűlése nagymértékben növeli a szükséges sajtolóerőt. A következő számításoknál ezt is figyelembe vettem.

005

F _N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d _{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,085043	mm
Δd _f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,0850425	mm
d _{tp}	Tengely aktuális mérete	51,137056	mm
Δd _t	Tengely átmérőváltozása	0,0070559	mm
F _p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0520134	mm
p ₁	1. rész felületei között ébredő nyomás	64,53758	MPa
p ₂	2. rész felületei között ébredő nyomás	42,073121	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	34725,762	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	36382,984	N
F _s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	71108,746	N
		71,108746	kN

004

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,085043	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,0850425	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,14176	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0117599	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0567174	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	78,957339	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	44,161472	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	44001,914	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	13153,954	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	57155,868	N
		57,155868	kN

003

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,083375	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,083375	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,150177	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0201773	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0668023	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	103,21625	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	53,90317	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	70005,39	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	22341,786	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	92347,176	N
		92,347176	kN

002

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,083375	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,083375	mm

d_p	Tengely aktuális mérete	50,161707	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0317072	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0783322	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	122,17018	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	65,040666	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	85162,388	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	26958,055	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	112120,44	N
		112,12044	kN

Összesített eredmények:

005 71,1 kN (+46%)
004 57,15 kN (+54%)
003 92,34 kN (+81%)
002 112,12 kN (+134%)

Ahogy az eredményekből is látszik, a számításom pontosítása közben a kapott értékek jelentősen eltértek a kiindulási (elméleti) értékektől. További pontosítás lehetne egy sorozatos hőmérsékletmérésekből kapott átlagértékekkel való számítás.

A fogaskerék hűlése, és a tengely melegedése matematikailag is leírható lenne, azonban ehhez egy nagyon bonyolult parciális differenciál egyenletrendszert kellene megoldani. A mért értékekkel való számítás kielégítő pontosságú.

4.4. A sajtolóerő csökkentésének lehetőségei

Bármilyen megmunkálásnál törekedni kell a szükséges teljesítmény csökkentésére. Minden lehetséges módon törekednünk kell arra, hogy a lehető legkevesebb erővel, teljesítményszükségletekkel dolgozzunk, mert ezek egyenes arányban állnak az energiafelhasználással, azaz a költségekkel. Egy nagy sorozatban szerelt váltó esetében az energiabefektetés visszaszorítása jelentős költségeket takarítana meg.

A szükséges sajtolóerő csökkentésének lehetőségei:

- Tengely hűtése
- Fogaskerék továbbmelegítése
- Fedés csökkentése

4.4.1. Tengely hűtése

A zsugorkötésnél csak a felszerelendő fogaskereket melegítik fel. Lehetőségünk van a tengelyt is hűteni, ezzel a hőmérsékletkülönbséget növelni. Hevítésnél a felső korlátunk a 180°C, míg hűtésnél az elméleti alsó határ a -273,15 °C, azaz az abszolút nulla fok, gyakorlatban -200°C. Ennél a hőmérsékletnél már nem tudunk több hőt elvonni az anyagtól. Korábbi számításnál is láthattuk, hogy a fedés megszüntetéséhez kb. 260 °C hőmérsékletkülönbség kell a tengely és a fogaskerék között. Ha a felső határunk a 180°C, akkor a tengely hűtésével tudjuk csak biztosítani a szükséges hőmérsékletkülönbséget.

A további számítások előtt fontos tisztázni egy számítási módszert. A fémek hőtágulása közel lineáris. A lineáris hőtágulási együttható -20°C-tól fölfelé érvényes, míg -20°C alatt már nem a lineáris hőtágulási együtthatóval kell számolni, hanem a mélyhűtési együtthatóval (β), amely az acéloknál 0,0000085 1/°C.

Így a fedés leküzdéséhez a fogaskerék tágulása, valamint a tengely zsugorodása biztosítja a megfelelő átmérőváltozást.

A 005 és 004-es fogaskerekeknél 180°C a hőmérséklet, így azoknak az aktuális mérete 51,0938 mm. A fedés ekkor 0,03616 mm. Ezt kell a tengely hűtésével megszüntetni.

Nézzük meg, hogy elegendő-e a tengelyt -20°C-ig, a lineáris hőtágulási együttható alkalmazásának alsó határáig lehűteni.

$$\begin{aligned} T_0 &= 20^\circ\text{C} \\ T_1 &= -20^\circ\text{C} \\ \Delta T &= -40^\circ\text{C} \\ d &= 51,13\text{mm} \\ \Delta d &= d \cdot \alpha \cdot \Delta T = 51,13 \cdot 0,0000115 \cdot (-40^\circ\text{C}) = -0,0235\text{mm} \end{aligned}$$

-20°C-ra lehűtve a tengelyt a fedésünk még 0,01264 mm. A tengelyt tovább kell hűteni a fedés megszüntetéséhez.

$$\begin{aligned} \Delta d &= -0,01264\text{mm} \\ \beta &= 0,0000085 \frac{1}{^\circ\text{C}} \\ \Delta T &= \frac{\Delta d}{d \cdot \beta} = \frac{-0,01264}{51,13 \cdot 0,0000085} = -29,08^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Tehát a tengelyt -49°C-ra kell lehűteni ahhoz, hogy a fedés teljesen megszűnjön.

A hűtéstechológiákon belül számos lehetőségünk van a tengely hűtésére. Szárazjeges, folyékony oxigénes vagy folyékony nitrogénes módszerekkel

megoldható a tengely hűtése. Egy ilyen fagyasztórendszer könnyen telepíthető lenne a sajtológép mellé, de használata számos problémát okozhat. A folyékony gázellátás bármilyen módon történik, az mindig veszélyt hordoz magában. A palackok robbanásveszélyesek, illetve a dolgozók ki vannak téve a fagyásveszélynek. Megfelelő védőeszközök alkalmazásával ez a veszély csökkenthető.

Amennyiben a szerelőüzem nem kíván veszélyes technológiát alkalmazni, lehet biztonságosabb, hagyományos hűtő jellegű szekrényeket telepíteni, melyek képesek $-20\ldots-30^{\circ}\text{C}$ -ra lehűteni a betett tengelyeket.

Ha a tengely mesterséges hűtését nem szeretné alkalmazni a cég, akkor másik lehetőség, hogy a tengely felmelegedését kellene lassítani. Ezt ventilátorokkal, vagy sűrített levegő tengelyre vezetésével könnyen meg lehet oldani. Bár a megoldások nem szolgálják a tengely hűtését, de mindenképpen jobban lassítják a felmelegedést, mint ha csak szabadon melegszik a tengely.

4.4.2. Fogaskerekek tovább melegítése

Korábbi számításaimnál megadtam, hogy a fogaskerék hevítésének felső határa 180°C . Ezt a keménységcsökkenés elkerülése miatt kell betartanunk. A gyártott fogaskerek keménységének 59 és 63 HRC között kell lennie. Ha a keménység lecsökkenne 56 HRC-re, akkor az üzemeltetés során a fogaskerek fogfelületein erőteljes pikkelyképző kopás (pitting) jönne létre, vagyis megengedhetetlen minőségromlás keletkezne.

Korábban elvégzett melegítési kísérletek során a fogaskereket 195°C , 215°C , és 280°C tartományban tartották hőn 15 illetve 30 percig. A következő eredmények születtek (3. Táblázat):

Hőforrásk (°C)	Felfűtés	Hőntartás	Keménység a kísérlet		Eltérés	Tűrésen belül?
			Előtt	Után		
195	90	15	60,8	60,2	0,6	MEGFELELŐ
195	90	15	60,5	59,2	1,3	MEGFELELŐ
Átlag			60,65	59,7	0,95	MEGFELELŐ
195	90	30	61,7	58,3	3,4	NEM MEGFELELŐ
195	90	30	61	59,3	1,7	MEGFELELŐ
Átlag			61,35	58,8	2,55	NEM MEGFELELŐ
215	90	15	61,2	59,3	1,9	MEGFELELŐ

215	90	15	61,2	58,3	2,9	NEM MEGFELELŐ
215	90	15	61	59,8	1,2	MEGFELELŐ
215	90	15	60,8	58,3	2,5	NEM MEGFELELŐ
Átlag			61,05	58,925	2,125	NEM MEGFELELŐ
215	90	30	61	57,7	3,3	NEM MEGFELELŐ
215	90	30	61,2	57,5	3,7	NEM MEGFELELŐ
215	90	30	60,3	57,8	2,5	NEM MEGFELELŐ
215	90	30	61,8	58	3,8	NEM MEGFELELŐ
Átlag			61,075	57,75	3,325	NEM MEGFELELŐ
280	90	15	61,3	56	5,3	NEM MEGFELELŐ
280	90	15	60,5	56,2	4,3	NEM MEGFELELŐ
280	90	15	60,5	56,8	3,7	NEM MEGFELELŐ
280	90	15	61	56	5	NEM MEGFELELŐ
Átlag			60,825	56,25	4,575	NEM MEGFELELŐ

3. Táblázat

A kísérletekből látható, hogy a 195°C-ra melegített kerekekből, valamint még a 215°C-ra melegített kerekekből is van olyan, amelynek a keménysége még a tűrésmezőn belül van. Az eredmények megfelelősége amiatt változik, mert csekély számú mérés történt, amelyek nem elegendőek ahhoz, hogy statisztikailag minősíthető adatokat kapjunk. Ugyanakkor az is látszik, hogy némi továbbmelegítés mindenképpen megengedhető.

4.4.3. Fedés csökkentése

A sebességváltóban található tengelyekre a fogaskerekeket több okból rögzítik zsugorkötéssel. Egyik ok az, hogy a zsugorkötésnél nincs szükség külön gépelemre (ék, retesz), vagy különleges kialakításra (bordás-, poligontengely). A nagy fordulatszám miatt egy plusz gépelem kiegyensúlyozatlanságot okozna, ami megzavarná a váltó finom járását. A bordás vagy poligon kialakítás lényegesen bonyolultabb eljárás, illetve nem rögzíti a fogaskerekeket tengelyirányban. Másik ok a zsugorkötés alkalmazására, hogy bizonyos körülmények között megfelelő biztonságot ad a károsodás elkerülésére. Ilyen lehet egy véletlenül rossz fokozatba kapcsolás, amikor a fogaskerekek túl nagy nyomatékot vinnének át a tengelynek. Ilyen esetben a zsugorkötéssel rögzített fogaskerekek képesek megcsúszni, ezzel elkerülve a szerkezet komolyabb károsodását. Természetesen ez a tartós csúszás sem elfogadható, de rövid ideig elviseli a szerkezet. A sebességváltók tervezésénél 1,5...2 a biztonsági tényező. Indokolt esetben a 3-as érték is megengedhető. Ez azt jelenti, hogy az előtétengelyen ébredő belső nyomaték másfél, vagy kétszeresét képes átvinni a szerkezet. Ennél nagyobb nyomaték esetén a kötés csúszást tesz lehetővé.

Ebből a tényből következik, hogy a kötés méretezésénél teljesen szükségtelen indokolatlanul nagy fedést kialakítani. Mivel az átvihető nyomaték egyenes arányban van a felületek között ébredő súrlódó erővel, az pedig a fedéssel, így kiszámítható az adott nyomatékhoz egy elégséges fedés.

A számítás menete:

1. Meghatározzuk az alkatrészek között ébredő súrlódó erőt, majd ebből kiszámítjuk, hogy az adott kötés mekkora nyomatékot lenne képes átvinni.
2. A bemenő nyomaték értékét megszorozzuk a bemenő- és előtétengely között lévő áttétellel, hogy megkapjuk az előtétengelyen ébredő belső nyomatékot. Ez a nyomaték lesz az, amit át kell vinnie a kötésnek.
3. A kapott belső nyomatékot megszorozzuk a biztonsági tényezővel, így megkapjuk azt a nyomaték értéket, amelyre kell méretezni a kötést ténylegesen.
4. A két nyomaték értéket összehasonlítva megkapjuk, hogy mennyivel nagyobb nyomatékot képes átvinni a tengely, így megkaphatjuk a valóságos biztonsági tényezőt.
5. Az előtétengelyen ébredő belső nyomaték alapján számítunk egy elégséges súrlódó erőt, amiből pedig az elégséges fedés megkapható.

Az elégséges fedés számításához nem állt rendelkezésemre megfelelő mennyiségű adat a sebességváltó áttételeiről, így a számításokat nem tudtam elvégezni.

4.5. Számítások a csökkentett sajtolóerőre

4.5.1. Vizsgálat a 4. esetre (tengely melegszik, fogaskerék továbbmelegítve 195°C-re)

005

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,102638	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,1026375	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,137056	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0070559	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0344184	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	36,85059	MPa

p ₂	2. rész felületei között ébredő nyomás	24,023512	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	19828,212	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	20774,476	N
F _s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	40602,688	N
		40,602688	kN

004

Jel	Megnevezés	Érték	
F _N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d _{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,102638	mm
Δd _f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,1026375	mm
d _{tp}	Tengely aktuális mérete	51,14176	mm
Δd _t	Tengely átmérőváltozása	0,0117599	mm
F _p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0391224	mm
p ₁	1. rész felületei között ébredő nyomás	48,56947	MPa
p ₂	2. rész felületei között ébredő nyomás	27,165293	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	27067,144	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	8091,4651	N
F _s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	35158,609	N
		35,158609	kN

003

Jel	Megnevezés	Érték	
F _N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d _{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,100625	mm
Δd _f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,100625	mm
d _{tp}	Tengely aktuális mérete	50,150177	mm
Δd _t	Tengely átmérőváltozása	0,0201773	mm
F _p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0495523	mm
p ₁	1. rész felületei között ébredő nyomás	71,30933	MPa
p ₂	2. rész felületei között ébredő nyomás	37,24025	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	48364,84	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	15435,339	N
F _s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	63800,179	N
		63,800179	kN

002

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,100625	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,100625	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,161707	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0317072	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0610822	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	90,871115	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	48,377746	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	63344,437	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	20051,608	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	83396,045	N
		83,396045	kN

Összesítve:

005 40,6 kN
004 35,15 kN
003 63,8 kN
002 83,39 kN

Amennyiben a tengely hűtését egy hagyományos elvű fagyasztóval végeznénk, amely képes a tengelyt rövid idő alatt -5°C -ra hűteni, akkor a szükséges erők a következőképpen alakulnának feltételezve a jelenlegi melegedési tendenciát.

4.5.2. Vizsgálat az 5. esetre (tengely hűtve, fogaskerek tovább melegítve)

005

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,102638	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,1026375	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,1153	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	-0,0146999	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0126626	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	2,6162593	MPa

p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	1,7055829	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	1407,7317	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	1474,9131	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	2882,6448	N
		2,8826448	kN

004

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	51,102638	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,1026375	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	51,120004	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	-0,0099959	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0173666	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	10,995564	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	6,1499071	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	6127,6872	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	1831,8138	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	7959,501	N
		7,959501	kN

003

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,100625	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,100625	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,128847	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	-0,001153	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,028222	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	31,855148	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	16,635883	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	21605,435	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	6895,2407	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	28500,676	N
		28,500676	kN

002

Jel	Megnevezés	Érték	
F_N	Normál átmérőkülönbség	0,13	mm
d_{fp}	Fogaskerék aktuális mérete	50,100625	mm
Δd_f	Fogaskerék átmérőváltozása	0,100625	mm
d_{tp}	Tengely aktuális mérete	50,140377	mm
Δd_t	Tengely átmérőváltozása	0,0103769	mm
F_p	Aktuális átmérőkülönbség	0,0397519	mm
p_1	1. rész felületei között ébredő nyomás	52,168571	MPa
p_2	2. rész felületei között ébredő nyomás	27,773379	MPa
F'	1. részhez szükséges sajtolóerő	36365,668	N
F''	2. részhez szükséges sajtolóerő	11511,51	N
F_s	A teljes fogaskerék felsajtolásához szükséges erő	47877,178	N
		47,877178	kN

4.6. Eredmények összesítése

Eset	1	2	3	4	5
Fogaskerék	Erő (kN)	Erő (kN)	Erő (kN)	Erő (kN)	Erő (kN)
1347-303-005	43,62	55,85	71,1	40,6	2,8
1347-303-004	31,45	40,27	57,15	35,15	7,9
1347-303-003	44,68	56,13	92,34	63,8	28,5
1347-303-002	44,95	56,47	112,12	83,39	47,8

4.7. Összefoglalás

Az eredményekből látható, hogy az elméleti számolástól hogyan jutottunk el a közel valóságos körülményeket leíró eredményekig.

Az eredményeket mégis fenntartásokkal kell kezelni, mert azok nagymértékben is különbözhetnek a felvett tényezőktől függően. A súrlódási tényező 0,1...0,4 tartományban mozoghat, a letördelési tényező 0,5...0,6. Számításaim során kedvező körülményeket vettem fel a 0,12-es súrlódási tényezővel. **Számításaim nem is a pontos erők meghatározására irányultak, hanem a lehetséges erőcsökkentési eljárások hatékonyságának szemléltetésére.** Jól látszik, hogy a fogaskerék kismértékű továbbmelegítésével, valamint hűtés alkalmazásával a kötéshez szükséges erő nagymértékben csökkenthető.

A hűtés megoldásához hagyományos jellegű fagyasztószekrény használatát javaslom, amely képes -30°C -ra is hűteni a betett tárgyakat. Rövid idő alatt az általam számolt -5°C könnyen elérhető. Ezzel a megoldással könnyen csökkenthetjük az erőszükségletet.

Az eljárás veszélye az, hogy a mélyhűtött tengelyre ha rásajtolják a 180°C -os fogaskereket, a nagy hőmérsékletkülönbség miatt akár repedésveszély is jelentkezhet.

A tengely melegedésének lassítására egy egyszerű pneumatikus rendszert javaslom. Sűrített levegős fúvókákat kell rávezetni a tengelyre. A fúvókákat a sajtolóprés állványához könnyedén lehet rögzíteni. A rendszer könnyedén kezelhető, illetve telepítése nem igényel különösebb műszaki felkészülést, valamint költséget.

Munkámat ellenőrizte és segítette Dr. Deszpoth István tanár úr, valamint a ZF Hungária KFT-ből Maka Attila, Mikó Péter, Zám Zoltán. Nekik ezúton szeretném megköszönni segítségüket!

Budai Dávid

5. Felhasznált irodalom

- [1] Dr. Őze József - Gépelemek I. 6. kötet, Dunaújváros 1995
- [2] Dr. Lendvay Pál - Sajtolt és zsugorkötések méretezése, Műszaki
könyvkiadó, Budapest 1977
- [3] Szabó István – Gépelemek, Tankönyvmester kiadó, Budapest 2006