



Neumann János Egyetem
Műszaki és Informatikai
Kar

Fegyvercső tervezése nagy- nyomású lőszerhez

Gun barrel design for high pressure ammunition

Rója István
EWDC9G

dr. Kovács Zsolt, egyetemi docens

dr. Kövesdi István, Arzenál Fegyvergyár Zrt.

Vozsech István, Gestamen Kutatás Fejlesztés Zrt.

2023

NYILATKOZAT

Alulírott, *Róza István* (EWDC9G), a Neumann János Egyetem hallgatója, büntetőjogi és felelősségi tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Szeged, 2023

Róza István
hallgató

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK	3
ELŐSZÓ	4
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	5
1. BEVEZETÉS	6
1.1 A MŰSZAKI PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA	6
1.2 A DOLGOZAT CÉLKITŰZÉSEI	7
1.3 A RELEVÁNS SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE	7
2. SZAKIRODALOM KUTATÁS	9
2.1 GÁZNYOMÁSGÖRBE SZIMULÁLÁSA	9
2.2 A KORRIGÁLT MAXIMÁLIS GÁZNYOMÁS MEGHATÁROZÁSA	11
2.3 NAGYNYOMÁSÚ LŐSZER	11
2.4 VÉKONYFALÚ CSŐ NYOMÁSTERHELÉSE	12
2.5 VASTAGFALÚ CSŐ NYOMÁSTERHELÉSE	13
2.6 FESZÜLTSGELMÉLETEK	15
2.6.1 A TMG feszültségelmélet	15
2.6.2 A HMM feszültségelmélet	16
2.6.3 UST feszültségelmélet	16
2.7 FEGYVERCSŐ KONSTRUKCIÓK	18
2.8 FEGYVERCSŐ ANYAGOK	21
3. FEGYVERCSŐ KONSTRUKCIÓ MEGHATÁROZÁSA	24
3.1 NYOMÁSGÖRBE JELLEGÉNEK MEGHATÁROZÁSA	24
3.2 MONOBLOCK CSŐ KÜLSŐ ÁTMÉRŐJE, MAXIMÁLIS NYOMÁS ESETÉN	25
3.3 ANYAGVÁLASZTÁS MONOBLOCK FEGYVERCSŐHÖZ	27
4. FEGYVERCSŐ TERVEZÉSE	31
4.1 GÁZNYOMÁSGÖRBE SZIMULÁLÁSA	31
4.2 FEGYVERCSŐ KONTÚR ELŐÁLLÍTÁSA	36
4.3 SZILÁRDSÁGTANI SZÁMÍTÁSOK	37
4.4 FEGYVERCSŐ CAD MODELLEK ELKÉSZÍTÉSE	43
5. ÖSSZEFOGLALÁS, AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE	47
5.1 A DOLGOZAT ÖSSZEFOGLALÁSA	47
5.2 A TOVÁBBLÉPÉS LEHETŐSÉGEI	47
6. SUMMARY	49
7. ÁBRAJEGYZÉK:	50
8. IRODALOMJEGYZÉK	51

Előszó

A Neumann János Egyetemen fegyvertervező és gyártó szakirány indult a gépészmérnök hallgatók számára. Elsőként volt lehetőségem az új szakirányra szakosodni, ahol mind elméleti mind gyakorlati ismeretekre tettem szert a kézi lőfegyverek témakörében.

A dolgozatomhoz az ötletet az USA-ban 2022-ban megjelent .277-es SIG Fury lőszer és a hozzá tartozó MCX-SPEAR karabély adta. A lőszernek az a különlegessége, hogy lényegesen nagyobb gáznyomásra hagyták jóvá, mint az eddig megjelent lőszereket. A nagy gáznyomás miatt a fegyvercsövek igénybevétele is jelentősen megnövekszik, ezért érdemes megvizsgálni, hogy milyen módon készülhetett a nagynyomású lőszert tüzelő MCX-SPEAR karabély csöve.

A fent említett témán keresztül több, szélesebb körben felhasználható problémát is megvizsgállok. Kezdvé a gáznyomásgörbék szimulációjával, a fegyvercsövek szilárdságtani méretezésén át, a Maple program és a CAD programok közötti adatátvitellel bezárólag.

* * *

A dolgozatom nem jöhetett volna létre a konzulenseim segítségével nélkül. Nagyon szépen szeretném megköszönni dr. Kovács Zsoltnak, Vozsech Istvánnak és dr. Kövesdi Istvánnak, hogy mindenben segítettek. Továbbá szeretnék köszönetet mondani a családomnak, hogy támogattak a tanulmányaim során.

Szeged, 2023

Rója István

Jelölések jegyzéke

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
b	folyáshatár paraméter (yield criterion parameter)	1
B	vastagfalú cső paraméter (thick-walled tube parameter)	1
C	vastagfalú cső paraméter (thick-walled tube parameter)	1
d_b	fegyvercső belső átmérő (inner diameter of tube)	m
d_k	fegyvercső külső átmérő (outer diameter of tube)	m
E	rugalmassági modulus (Young-modulus)	Pa
n	biztonsági tényező (safety factor)	1
P_{max1}	korrigált maximális gáznyomás (corrected maximum pressure)	Pa
P_{max}	maximális gáznyomás (maximum pressure)	Pa
p_b	belső nyomás (inner pressure)	Pa
p_k	külső nyomás (outer pressure)	Pa
r_b	fegyvercső belső sugár (inner radius of tube)	m
r_k	fegyvercső külső sugár (inner radius of tube)	m

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
φ	vastagfalú cső paraméter (thick-walled tube parameter)	1
σ_1	legnagyobb főfeszültség (maximum principal stress)	Pa
σ_2	középső főfeszültség (medium principal stress)	Pa
σ_3	legkisebb főfeszültség (minimum principal stress)	Pa
σ_a	axiális főfeszültség (axial principal stress)	Pa
σ_{eTMG}	egyenértékű feszültség a TMG feszültség elmélet szerint (TMG equal stress)	Pa
σ_{eHMH}	egyenértékű feszültség a HMH feszültség elmélet szerint (HMH equal stress)	Pa
σ_{eUYC}	egyenértékű feszültség a UST feszültség elmélet szerint (UST equal stress)	Pa
σ_m	megengedhető feszültség (allowable stress)	Pa
σ_t	tangenciális főfeszültség (tangential principle stress)	Pa
σ_r	radiális főfeszültség (radial principle stress)	Pa
σ_{sz}	szakítószilárdság húzásra (tensile strength)	Pa
σ_y	folyáshatár húzásra (yield strength)	Pa
τ_{sz}	szakítószilárdság nyírásra (ultimate shear stress)	Pa
τ_y	folyáshatár nyírásra (yield shear stress)	Pa

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
---------	------------------------

1. Bevezetés

A műszaki területek fejlődésének egyik motorja a hadipar. A kézi lőfegyverek fejlesztése és gyártása is ide tartozik. Az elmúlt években, az Egyesült Államok hadserege aktívan keresni kezdte az 5.56 mm-es NATO¹ lőszer és az M16/M4-es karabélyok utódját. A következő generációs kézi lőfegyverek kifejlesztésére, három vállalatot versenyeztettek. Ezek a következők: SIG Sauer, General Dynamics és a Textron Systems. Valamennyi vállalat benyújtotta az új generációs lőszerének és fegyverének a prototípusát. A pályázatot a SIG Sauer prototípusa nyerte meg.

Az USA-ban nem először próbálkoznak a kézi lőfegyverek korszerűsítésével. Az XM29 OICW² egy olyan korszerű fegyverrendszer volt, amely egy karabélyt és egy gránátvetőt integrált egyetlen fegyverbe. Az így létrejött fegyver azonban túl nehéz, túl drága, túl gyenge és megbízhatatlan volt, ezért nem is jutott tovább a prototípus fázisnál.

Az XM29 OICW-vel ellentétben, a SIG Sauer fegyverét és lőszerét pozitívan fogadták és jóváhagyták. Az újgenerációs fegyvernek és lőszernek van egy katonai, és egy civil felhasználásra gyártott változata is. A civil lőszerről elérhető SAAMI³ adatlap szerint, a lőszer maximális nyomása 80000 psi⁴, ami megközelítőleg 5500 bar-nak felel meg. Ez a nagynyomású lőszer adta a dolgozatom alapötletét.

1.1 A műszaki probléma megfogalmazása

A tűzfegyverek lövésfolyamata során, a hüvelyben begyulladó lőportöltet lőporgázokat fejleszt. Mivel a fegyvercső hüvelytálp felőli része zárt és a lőszert körbeveszi a cső, a lőporgázok csak a csőszáj felé tudnak terjeszkedni. A belső nyomás hatására, a cső falában feszültség ébred, és ha ez a feszültség meghalad egy kritikus értéket, a cső maradandóan deformálódik, tönkremegy. Az anyagok tönkremenetelét ráadásul több elmélet is modellezi, és modelltől függően, a cső különböző belső nyomásoknak képes ellenállni. A SIG Sauer nagynyomású lőszeréhez hagyományos alapanyagból nem lehetséges fegyvercsövet gyártani. Meg kell vizsgálni a lehetséges kontrakciókat, és anyagokat, melyekkel a fegyvercső képes ellenállni a 5500 bar-os nyomásnak.

¹ NATO: North Atlantic Treaty Organisation - Észak-atlanti Szerződés Szervezete

² Objective Individual Combat Weapon (Prototípus fázisban megragadta kézi lőfegyver. Sokszor az egész fejlesztési programra, így hivatkoznak.)

³ SAAMI: Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute - A Sportfegyver- és Lőszergyártók Intézete. (Az Amerikai Egyesült Államok vezető lőfegyver-, lőszergyártóinak a szövetsége.)

⁴ psi: pounds per square inch - font per négyzet hüvelyk (Angolszász nyelvterületeken használt nyomás mértékegység.)

1.2 A dolgozat célkitűzései

A dolgozatom célja olyan fegyvercső tervezése, amely szilárdságtani szempontból megfelelő a SIG Sauer nagynyomású lőszerének használatához. A fegyvercső szilárdságtani méretezéséhez programot írok, ami képes szimulálni a nagynyomású lőszer nyomásgörbéjét, majd elvégezni a fegyvercső szilárdságtani méretezését. A szilárdságtani méretezést több tönkremeneteli elmélet szerint is elvégzem, és meghatározom a minimálisan szükséges külső csőkontúrokat. Végül a csőkontúrokat DXF formátumban konvertálom és felhasználom CAD modellek elkészítéséhez.

1.3 A releváns szakirodalom áttekintése

Fegyvercsővek tervezésénél sok szempont figyelembevétele szükséges. A lövésfolyamat során a kézi lőfegyver csöveket 2000 bar-tól, 5500 bar-ig terjedő belső nyomás terhelheti, ezen felül, a lőporégés során jelentős mennyiségű hő szabadul fel. Továbbá a modern kéz lőfegyverek, tíz-húsz ezer lövésre vannak tervezve, ami az anyagok kifáradását eredményezheti. A dolgozat keretei között nincsen lehetőségem, a fegyvercső tervezés minden aspektusát megvizsgálni, ehelyett a fegyvercsővekben fellépő nyomás, és a cső szilárdságtani méretezésének témáját vizsgálom meg részletesebben.

Mivel a fegyvercsővek maximális terhelése a csőtengely mentén változik (minden fegyvercső szegmensnek adott maximális nyomást kell elviselnie), ezért célszerű a fegyvercső szilárdságtani méretezését program segítségével elvégezni. John Tierney és mutsai. egy 105 mm-es acél-kompozit lövegcsövet terveztek, és a folyamat során a tervezés legfőbb eszköze a CCDS⁵-t nevű program volt. [1] A CCDS magába foglal egy csőprofilozót, amelyet a kompozitból készült, többrétegű csövek tervezéséhez használtak. A program továbbá több tönkremeneteli elméletet is képes kezelni, a csövet terhelő belső nyomás és hőhatások figyelembevételével. Ezeken kívül a cső nyúlásának kritikus sebességét is meg lehet vele határozni, az anyag Young-modulusa és sűrűsége alapján. [1]

A dolgozat megírásához először szükség volt információra az USA-ban megjelent nagynyomású lőszerről, és a nyomásgörbék szimulálásáról. A nagynyomású nyomásgörbe után, a fegyvercsővekben ébredő feszültségeket kellett leírni, majd a főfeszültségek alapján, meg kellett határozni az egyenértékű feszültséget. Továbbá ki kellett választani a fegyvercső konstrukcióját és anyagát. Végül a gáznyomásgörbe szimulálásához és a szilárdságtani méretezéshez programot írtam.

⁵ Composite Cylinder Design Software – Több rétegű fegyvercső tervező program

A nyomásgörbét az USA-ban megjelent nagynyomású lőszer adatai alapján szimulálom. Az általános információkat Balestrieri [2] és Beckstrand [3] újságcikkei alapján gyűjtöttem. A lőszer pontos méretei és gáznyomásának maximális értéke a SAAMI adatlapján [4] található meg.

A fegyvercsövekben a nyomás értéke a lövésfolyamat során változik. Ha a nyomás értékeit időpillanatonként rögzítjük a pontokra egy interpolációs polinom, vagy spline illeszthető. A gáznyomásgörbe szimulálásához koncentrált paraméterű belsőballisztikai modellt fogok használni. A dolgozatban használt modellről a Ballisztika tantárgy keretei között tanultam, részletes leírása a [5] irodalom szerinti. A belsőballisztikát tárgyaló, idegen nyelvű források közül a Robert Todd Miner, Számítógépes belső ballisztikai modellezés c. dolgozatát [6] és Carlucci könyvét [7] használtam fel.

A fegyvercsövek szilárdságtani méretezésekor a vastagfalú cső modellt kell alkalmazni. A modellt dr. Laczik Bálint, Fejezetek a lőfegyverek gyártástechnológiájából c. tankönyve [8] és Muttnyánszky Ádám, Szilárdságtan [9] c. könyve alapján fogom ismertetni. A vastagfalú cső összetett feszültség állapota és a szakító vizsgálatoknál fellépő húzó feszültség összehasonlítása feszültség elméletekkel lehetséges. A feszültség elméletek ismertetését és az egyenleteik leírását a Bevezetés az egyesített szilárdságméletbe c. könyv [10] alapján fogom megtenni.

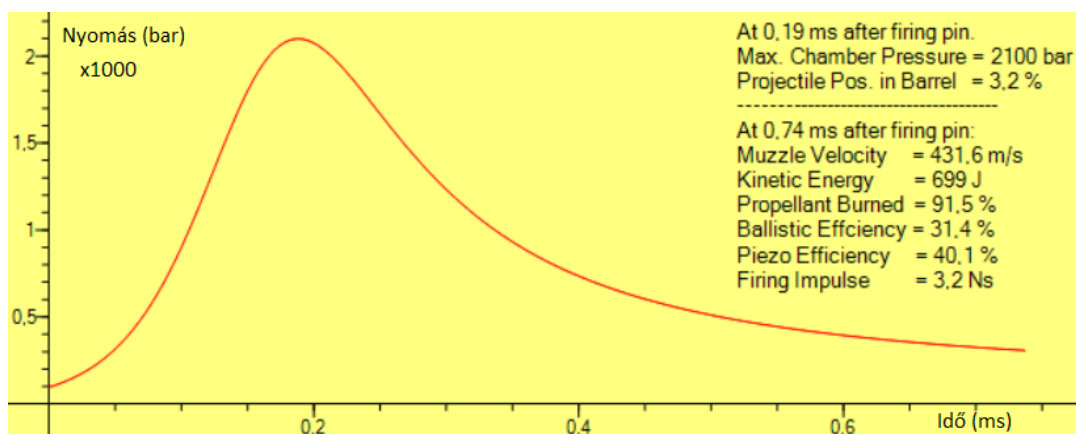
A méretezéshez ismerni kell a fegyvercső alapanyag szilárdsági jellemzőit. A hagyományos és speciális fegyvercső anyagokra vonatkozóan, dr. Kovács Zsolt, Lőfegyver fődarabok gyártása [11] előadás anyagából, és Fonseca és mtsai [12] maraging acélokról szóló cikkéből tájékozódtam. Egy-egy konkrét acél jellemzőit az interneten megtalálható adatlapjáról vettem át [13] [14]. A lehetséges fegyvercső konstrukciókat az USA hadseregének fegyvercsővekről szóló könyve [15] alapján mutatom be.

A dolgozathoz Maple szimbolikus matematikai editorban fejlesztett programot írtam, ami mind a nyomásgörbét szimulálja, mind pedig a szilárdságtani méretezést elvégzi. A program írásához André Heck, Bevezetés a Mappel-be c. könyvéből [16] dolgoztam.

2. Szakirodalom kutatás

2.1 Gáznyomásgörbe szimulálása

A fegyvercsőben fellépő belső nyomás az idő függvényében változik. Ha a lövésfolyamat során a töltényűrben mérjük a nyomást és a mért értékeket időpillanatonként rögzítjük, akkor megkapjuk a lőszerre jellemző nyomásgörbét. (1. ábra) Ha a nyomásgörbét nincsen lehetőségünk mérés útján meghatározni, akkor szimulálhatjuk egy belső ballisztikai modell segítségével. Koncentrált paraméterű modell használatával a szimulált és a valós nyomásgörbe közötti relatív hiba, 5% körül mozog.



1. ábra: Nyomásgörbe az idő függvényében (Arzenál belsőballisztikai program)

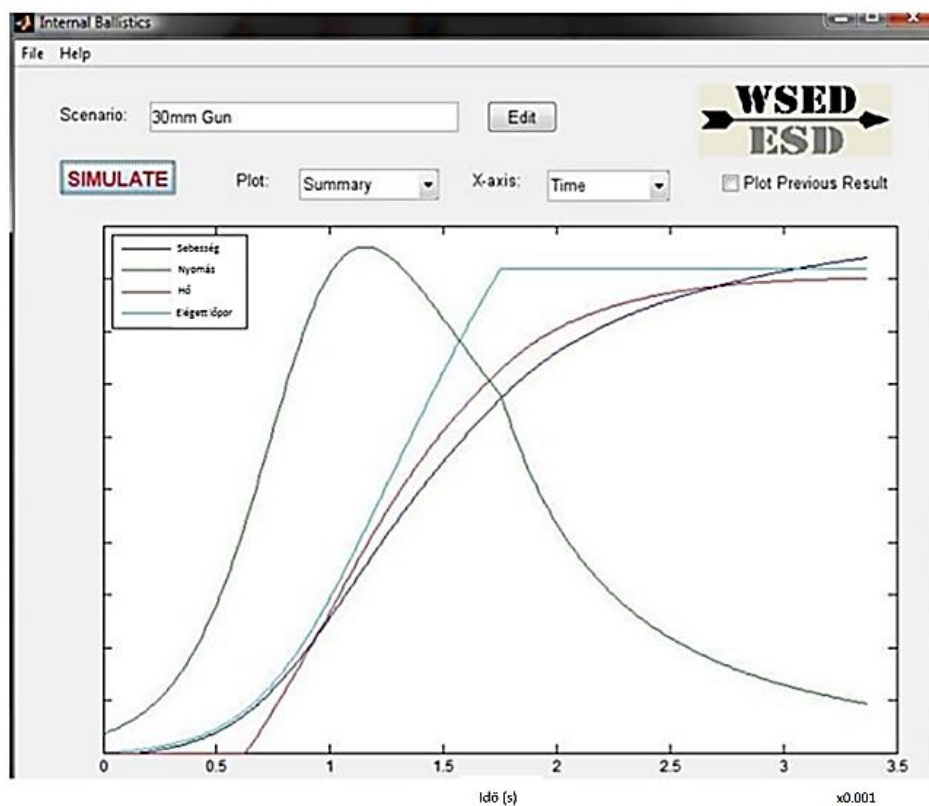
A csőben lezajló folyamatokkal a belső ballisztika foglalkozik, pontosabb fogalmazásban a belső ballisztika egészen a lőportöltet begyulladásától tart addig a pillanatig, amíg a lőporgázok ki nem áramlanak a rendszerből. A belső ballisztikai modellek bonyolult folyamatokat tárgyalnak, ezért modelltől függően, különféle egyszerűsítéseket tartalmaznak. Fegyvercső tervezés szempontjából a belső ballisztika a gáznyomásgörbe szimulálásához szükséges, ezért az ehhez használt modell főbb tulajdonságai ismertetem.

A belsőballisztikai folyamatok leírhatók egy négy főegyenletből álló egyenletrendszerrel és a főegyenletekhez tartozó segédfüggvényekkel [5]. A segédfüggvények a differenciálegyenletekbe beírva azok átláthatóságát biztosítják.

A belsőballisztikai modell fő egyenletei az alábbi folyamatokat írják le [5]:

1. Lőporégés sebessége (lineáris égési törvény)
2. A lőporégés jellege (geometriai égési modell)
3. A gáznyomásgörbe (pirodinamika alapegyenlete)
4. A lövedék gyorsulása (Newton II axiómája)

A belsőballisztikai számításokhoz használhatók erre a célra írt programok vagy átvehető megírt kódok is. Az Amerikai Egyesült Államokban a legelterjedtebb belsőballisztika modell a Maryland állambeli Aberdeen Proving Ground-nál működött, BRL⁶ által kifejlesztett, IBHVG2⁷ [6]. Ez egy koncentrált paraméterű modell, ami belsőballisztikai görbék szimulálására használható, beleértve a gáznyomást, a lövedék elmozdulását és a lövedék sebességét (2. ábra). A görbék megadhatók az idő vagy az elmozdulás függvényében, a modell egyenletesen és korrigált égési sebességgel égő többféle szemcsealakú löport egyaránt kezel. A IBHVG2 modellt használó programok megbízható és pontos eszközök voltak, például rakéták tervezésében [6].



2. ábra: Képernyő fotó egy IBHVG2 kódot használó belsőballisztikai programról [6]

A 2. ábra függőleges tengelyén a görbéket a gáznyomásgörbe maximumára normálták. Erre az ábrázolhatóság kedvéért van szükség.

⁶ BRL: Ballistic Research Laboratory (Az Egyesült Államok hadseregének egyik vezető kutatóintézete volt, amely a ballisztikára specializálódott.)

⁷IBHVG2: Interior Ballistics of High Velocity Guns 2

2.2 A Korrigált maximális gáznyomás meghatározása

Miután egy adott lőszer gáznyomásgörbéjének meghatároztuk a maximumát (P_{max}) még figyelembe kell venni két tényezőt. Egyrészt, hogy a maximális gáznyomásra hatással vannak a lőszer gyártásából származó bizonytalanságok, másrészt, hogy a hőmérsékletváltozást hatására változhat a maximális gáznyomás. A löszerek gyártási pontatlanságából és a hőmérsékletváltozásból adódó gáznyomás ingadozás az (1) empirikus összefüggéssel vehető [7] figyelembe:

$$P_{max1} = 1,15(P_{max} + 165,5). \quad (1)$$

2.3 Nagynyomású lőszer

Az Amerika Egyesült Államok 2017-ben kezdte el lőfegyver fejlesztési programját, rövidített nevén az NGSW⁸-t. A programot egyrészt a háborús katonai tapasztalatok, másrészt az M16/M4 karabélyok és a 5.56x45 mm-es NATO lőszer lecserélésének az igénye indokolta. [2] Az említett lőszer lecserélésére azért van szükség, mert a kis tömegű lövedék nem képes átütni a legmodernebb lövedékálló mellényeket (legalábbis ez a leghitelesebb magyarázat, amit az amerikai katonai vezetés adott). Viszonyítás képen a NATO 5.56x45 mm-es löszerral 300-400 méterre lehet célzott lövést leadni, míg az a NGSW új löszerral és fegyverekkel 600 méterre. [17] A megnövekedett hatásos lőtávolság miatt, az új fegyverekhez egy speciális optikát is terveztek (NGSW-FC⁹), amellyel egy kevésbé képzett lövő is képes nagy távolságokra pontos lövést leadni.

A fent említett indokok miatt, NGWS programban nagyobb lövedék tömeggel rendelkező 6.8x51mm-es, nagynyomású löszereket fejlesztettek ki, melyekhez fegyvereket is terveztek, mind katonai, mind civil felhasználásra. A katonai alakulatoknak szánt fegyver az XM7, a civil verziója, mely nagyrészt megegyezik vele, az MCX SPEAR nevet viseli (3. ábra). A fegyvereket a SIG Sauer vállalat fejlesztette és gyártja.

A 6.8x51mm-es katonai löszernak is van civil verziója, ami a .277 SIG Fury nevet kapta (4. ábra). A 6.8mm-es kaliberrel, találkozhatunk .277 néven, megadva ezzel a kalibert inchben. A löszert 80000 psi (Megközelítőleg 5500 bar.) gáznyomásig hagyta jóvá, a civil löszereket és fegyvereket felügyelő hivatal, rövidített nevén SAAMI. [3] A nagynyomású civil lőszer maximális gáznyomása, még a rendkívül magas 80000 psi értékkel is elmarad a katonai változatától.

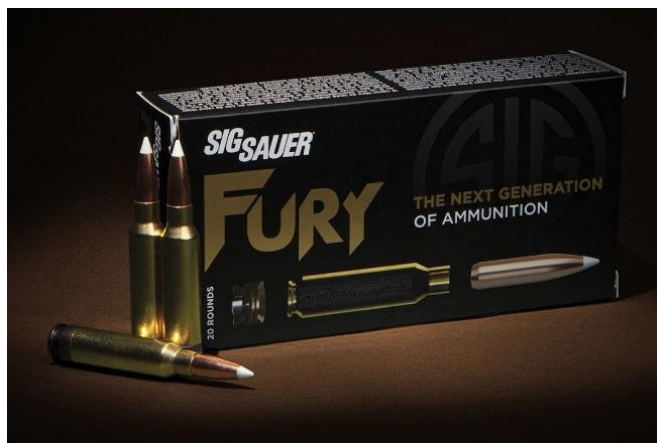
⁸ Next Generation Squad Weapon – Következő Generációs Szakaszfegyverek

⁹ Next Generation Squad Weapon, Fire Control - Következő Generációs Szakaszfegyverek, Tűz Kontrol



3. ábra: A SIG Sauer által fejlesztett NGSW fegyver, az XM7 [18]

Összehasonlításképpen, a civil lőszer között jóváhagyott, eddigi legmagasabb gáznyomás 66000 psi, hozzávetőlegesen 4500 bar. A nagy gáznyomás miatt a .277 SIG Fury hüvelye két anyagból áll. A hüvely nagy része sárgaréz, viszont a hüvelytalp körüli rész acélból készül. A hüvelytalp körüli rész azért érzékenyebb a belső nyomásra, mert a fegyvercső itt már nem támasztja meg a hüvely palástját. A .277 SIG Fury lőszer nem tüzelhető minden 6.8mm-es űrméretű fegyverből, csak olyanból, melyet jóváhagytak az extrém magas gáznyomásra.

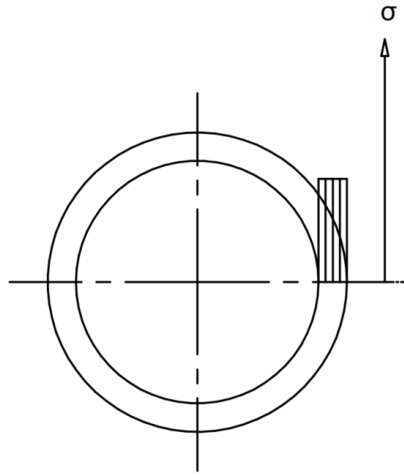


4. ábra: A SIG Sauer újgenerációs civil lőszere, a .277 SIG Fury [18]

2.4 Vékonyfalú cső nyomásterhelése

Amikor csőátmérő és a cső falvastagságának az aránya (d_k/v) kisebb mint 0,077 [19], akkor a csövet modellezhetjük vékonyfalú csőként. Szilárdságtani szempontból az jellemző a vékonyfalú csővekre, hogy belső nyomás hatására a feszültség eloszlását cső falában

egyenletes (lásd: 5. ábra). Ez egy egyszerűsítés, ezért is használható csak a fent említett átmérő falvastagság arányig.



5. ábra: Feszültségeloszlás a cső falában, a vékonyfalú cső modell szerint

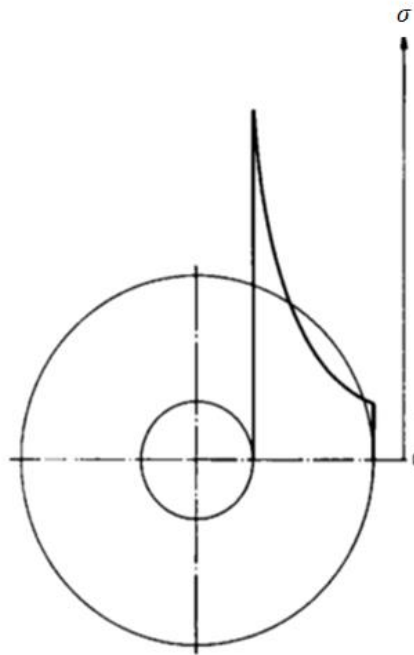
2.5 Vastagfalú cső nyomásterhelése

Fegyvercsövek szilárdságtani méretezésekor, a csövet nem vékony, hanem vastagfalú csőként modellezzük. A kísérleti tapasztalatok alapján, hiába vastagítjuk meg annyira egy belső nyomással terhelt csőnek a falát, hogy a cső külső palástja ne deformálódjon, a cső belső furatában az anyag ettől még roncsolódhat. Ezért a fent említett átmérő-falvastagság arány felett egy másik modellt kell alkalmaznunk, ezt hívjuk vastagfalú csőnek. A vastagfalú csővekre használt matematikai összefüggések visszaadják a valós tapasztalatokat. A vastagfalú cső falában fellépő feszültség a cső belső nyomással terhelt felülete közelében jelentősen megnövekszik (6. ábra). Az alábbiakban az egyrétegű vastagfalú csőre vonatkozó összefüggéseket ismertetem. Amennyiben a vastagfalú cső valamilyen módon előfeszített (autofretált vagy többrétegű vastagfalú cső), az összefüggések további kiegészítéseket igényelnek.

A vastagfalú cső modelljének a felállításakor a következők az egyszerűsítések [9]:

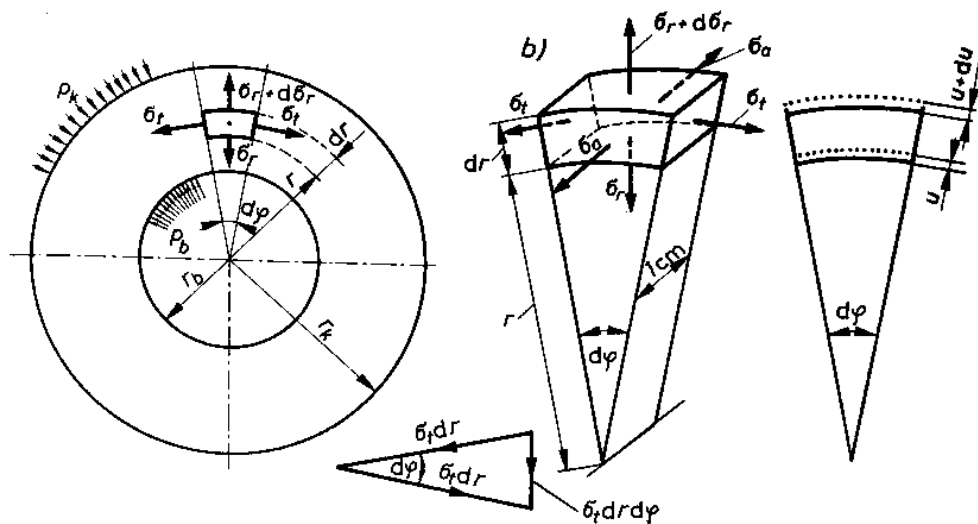
1. a cső belső és külső nyomást egyaránt kaphat, de ezek intenzitás a csőtengetely mentén nem változik,
2. a cső végének a lezárása nem gátolja a csőfal alakváltozását, de tengelyirányú erőt adhat a csőre,
3. a cső anyaga homogén, izotróp, alakváltozása a Hooke-törvénynek megfelelően rugalmas,

4. a cső külső és belső palástja koncentrikus körhenger,
5. a cső tengelyére merőleges síkok a cső alakváltozása után is síkok maradnak.



6. ábra: Feszültségeloszlás a cső falában, a vastagfalú cső modell szerint [20]

A csőfalban ébredő feszültségek, és a csőfal deformációjának a vizsgálata céljából, a csőfalból kimetszünk egy elemi íves hasábot, melyen megvizsgálhatjuk az anyagban ébredő feszültség komponenseket (7. ábra). A σ_t a tangenciális irányú, a σ_r a radiális irányú, a σ_a pedig az axiális irányú feszültség. A tangenciális, és az axiális feszültségek páronként, a kivágott hasáb szemközti oldalain egyenlőek. A radiális feszültség az átmérő függvényében változik, tehát a hasáb alján σ_r a hasáb tetején pedig $\sigma_r + d\sigma_r$.



7. ábra: A vastagfalú cső falából kimetszett elemi íves hasáb [9]

A vastagfalú cső főfeszültségeit a csőfal egy tetszőleges pontján megadó képletek az alábbiak:

a radiális irányú főfeszültség:

$$\sigma_r = B - C\varphi, \quad (2)$$

a tangenciális irányú főfeszültség:

$$\sigma_t = B + C\varphi, \quad (3)$$

ahol az egyenletekben:

$$\varphi = \left(\frac{r_b}{r_k}\right)^2 \quad (4)$$

és

$$B = \frac{p_b r_b^2 - p_k r_k^2}{r_k^2 - r_b^2}, \quad (5)$$

valamint

$$C = \frac{r_k^2 (p_b - p_k)}{r_k^2 - r_b^2}. \quad (6)$$

Ha a főfeszültségeket kiszámoltuk, a következő lépés, hogy valamilyen feszültség elmélet alapján, meghatározzuk az egyenértékű feszültséget.

2.6 Feszültségelméletek

Az anyagban ébredő főfeszültségek ismeretében, megállapíthatjuk az egyenértékű feszültséget, mely, ha meghalad egy kritikus értéket, az anyag tönkremegy. A mérnöki gyakorlatban leginkább elterjedt anyagok –fémek estében–, tönkremenetelét a folyáshatár elérésével határozzuk meg. Minél jobban a valóságot reprezentálja egy feszültségelmélet, annál nagyobb biztonsággal állítható, hogy egy alkatrész kibírja a terhelést, viszont a tömeg sem nő feleslegesen a túlméretezés következtében. A gépiparban a két legelterjedtebb feszültségelmélet a Tresca-Mohr-Guest (TMG) és a Hencky-Huber-Mises (HMH). [8] A további feszültségelméletek közül a Unifield Strength Theory-t (UST) fogom megvizsgálni.

2.6.1 A TMG feszültségelmélet

A TMG feszültségelmélet a tönkremenetelt a legnagyobb és a legkisebb főfeszültség különbségeként definiálja. Ez megegyezik a legnagyobb Mohr kör átmérőjével. Tehát az

elmélet szerint, akkor egyenértékű két feszültségállapot, ha legnagyobb Mohr körök átmérője megegyezik. A TMG feszültségelmélet szerint, az egyenértékű feszültség a (7) képlet szerint számítható ki:

$$\sigma_{eTMG} = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (7)$$

2.6.2 A HMM feszültségelmélet

Az elmélet szerint azok a feszültségek egyenértékűek, melyek térfogatra vonatkoztatott fajlagos torzító munkája megegyezik egymással. [19] Ezzel gyakorlatilag azt vesszük figyelembe, hogy a feszültségelmélet szerint, a tönkremenetelt nem a térfogat változás, hanem a torzió (térfogatváltozás nélküli deformáció) okozza. A HMM feszültségelmélet szerint, az egyenértékű feszültség az (8) képlet szerint számítható ki:

$$\sigma_{eHMM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}. \quad (8)$$

2.6.3 UST feszültségelmélet:

A UST azért különleges, mert egy egységes feszültségelmélet, mely használható a legtöbb mérnöki életben használt anyag típusra. Egészen a XX. század végéig, nem volt elfogadott, hogy létrehozható egységes feszültségelmélet. Ezt a terület több szakértője is megfogalmazta, például Stephen Timoshenko, a History of Strength of Materials c. könyvében az alábbiakat írja: „Számos vizsgálatot végeztek összetett feszültségállapottal, hogy ellenőrizték Mohr elméletét. Mindezeket a vizsgálatokat rideg anyagokkal végezték, és a kapott eredmények nem feleltek meg az elméletnek. Voigt (A Göttingeni Egyetemen professzora volt) arra a következtetésre jutott, hogy a szilárdság kérdése túl bonyolult, és hogy lehetetlen egyetlen elméletet kidolgozni, amelyet sikeresen lehetne alkalmazni mindenféle szerkezeti anyagra.” [21]. A UST-vel viszont egy olyan konstrukció jött létre, amellyel a tönkremeneteli tétel képletébe szereplő paraméterek megváltoztatásával figyelembe vehetünk egy-egy anyag fajtát.

Mao-Hong Yu és Shu-Qi Yu 2004-ben adta ki az Introduction to Unified Strength Theory¹⁰ című könyvét [10], melyben a feszültségelméletet levezetik, és kísérleti adatokkal támasztják alá. A UST feszültségelmélet rendelkezik egy egyszerűsítéssel, azokra az anyagokra, melyeknek folyáshatára húzásra és nyomásra megegyezik. Ezt az egyszerűsítést Unified Yi-

¹⁰ Bevezetés az Egysített Feszültségelméletbe

eld Criteria-nak (UYC) hívják. Acél alkatrészek méretezéskor élhetünk ezzel az egyszerűsítéssel, ezért a UYC képleteit ismertetem. A UYC feszültségelmélet szerint az egyenértékű feszültség a (9) képlettel számítható ki:

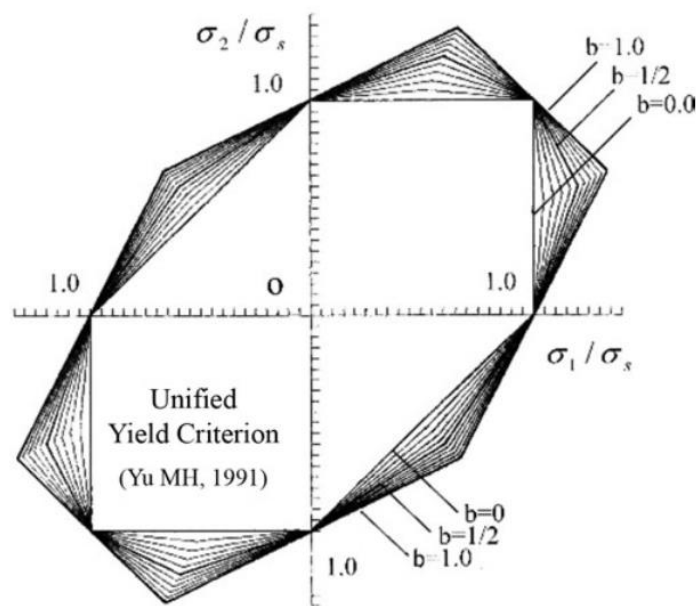
$$\sigma_{eUYC} = \begin{cases} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b}, & \sigma_2 < \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \\ \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} - \sigma_3, & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \end{cases} \quad (9)$$

A UYC képlete megváltozik a főfeszültségek viszonyában, továbbá a képletekben a b paraméter megváltoztatásával figyelembe vehetjük az adott anyagtípust. A paramétert van lehetőségünk kiszámítani vagy tapasztalati úton meghatározni.

A paraméter kiszámításához ismernünk kell az adott anyag nyírásra és szakításra vonatkozó folyáshatárát. A UYC képleteiben szereplő b paraméter kiszámítás a (10) képlettel lehetséges:

$$b = \frac{2\tau_y - \sigma_y}{\sigma_y - \tau_y} \quad (10)$$

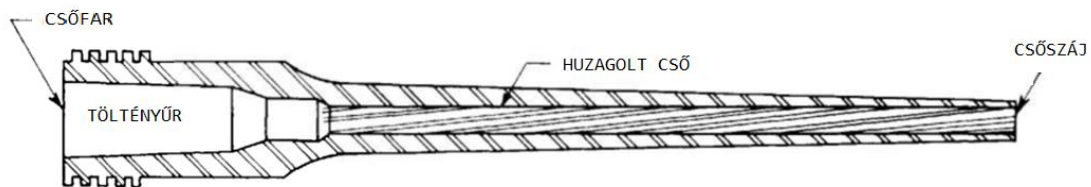
A UYC paraméteres felépítése azt eredményezi, hogy a paraméter megváltoztatásával különböző, egymástól eltérő tönkremeneteli feltételeket hozunk létre (8. ábra). A 8. ábra függőleges tengelyén a középső, vízszintes tengelyén pedig a legnagyobb főfeszültséget ábrázoljuk. Ezen ábrán látható bezárt területen (területeken) belül az egyenértékű feszültség nem haladja meg a folyáshatárt. Továbbá látható, hogy a UYC a megfelelő paraméter érték megválasztásával az anyagra leginkább jellemző határoló sokszöget veszi fel. A UYC mind a TMG ($b = 0$), mind HMH ($b = \frac{2}{5}$) feszültségelmélet határoló görbáját képes felvenni.



8. ábra: A UYC határfelületei síkbeli feszültségállapotban, különböző b paraméterekkel [10]

2.7 Fegyvercső konstrukciók

A fegyvercsövek lehetnek egy tömbből gyártottak vagy készülhetnek kettő, illetve több elemből [15]. Az egy tömbből gyártott csövek problémáját már az egyrétegű vastagfalú csövek fejezetben tárgyaltam, miszerint egy bizonyos belső nyomásnál nagyobbakat nem képesek elviselni, falvastagságtól függetlenül. A kézi lőfegyverek estében általában nem áll fent ez a probléma, mivel anyaguk nemesíthető acél. A csőben fellépő nyomás maximuma nem okoz tönkremenetelt egy nagy szilárdságú acélnál. Az egy tömbből készült fegyvercsövet a 9. ábra szemlélteti.

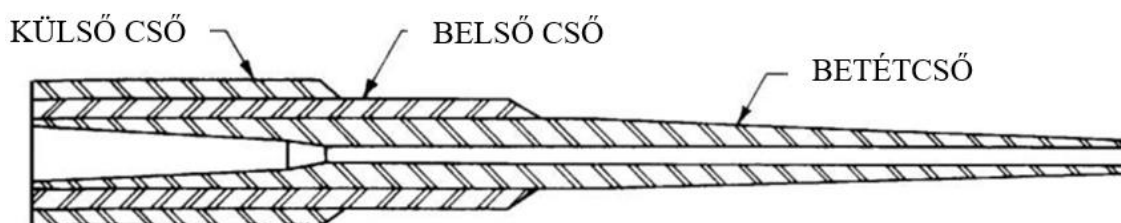


9. ábra: Egy tömbből gyártott fegyvercső [15]

A több elemből készült csövek közül többféle konstrukció létezik. A konstrukciók kialakítása attól függ, hogy milyen céllal készültek.

Általában tüzérségi fegyvereknél, mikor nagy belső nyomás lép fel a csőfúratban, akkor a fegyvercsövek készülhetnek több rétegből, így létrehozva egy többrétegű vastagfalú csövet (10. ábra). A vastagfalú cső elméletéből következik, hogy növekvő belső átmérőkhöz arányaiban is nagyobb falvastagságok tartoznak. A nagyobb falvastagság miatt nem csak a geometriai méret, hanem a tömeg is megnövekszik. Többrétegű csövek alkalmazásával elkerülhető a felesleges tömegnövekedés.

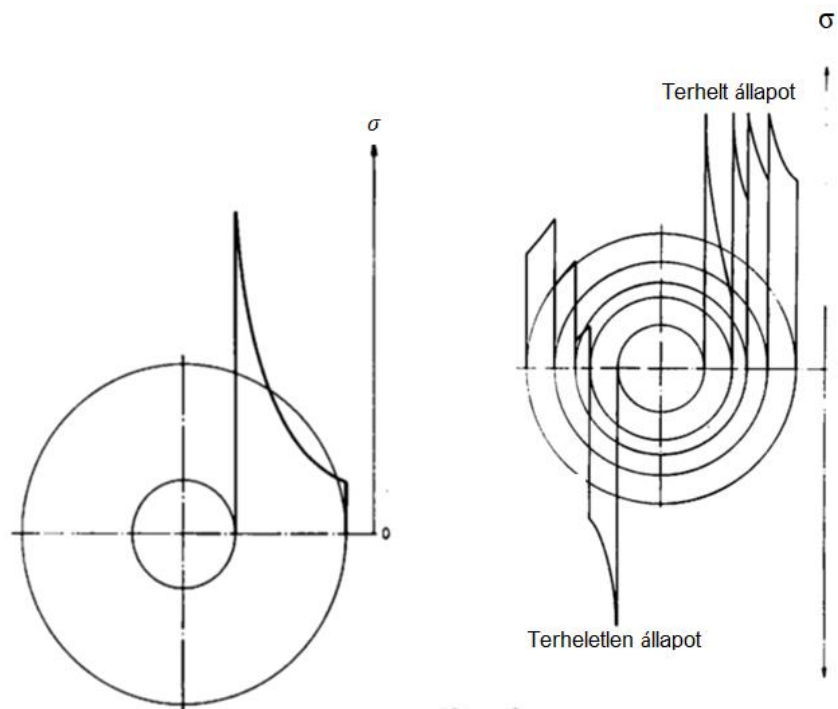
A rétegek szereléskor, zsugorkötést alkalmaznak, melynek hatására a cső folyamatosan terhelés alatt van. Az anyagban ébredő belső feszültség viszont ellentétes irányú a csövet terhelő belső nyomás okozta feszültséggel. Egyszerűbben megfogalmazva, a külső csövek összeszorítani, a belső nyomás szétfeszíteni akarja a belső csövet, mely ennek hatására nagyobb belső nyomásnak képes ellenállni.



10. ábra: Többrétegű vastagfalú cső [15]

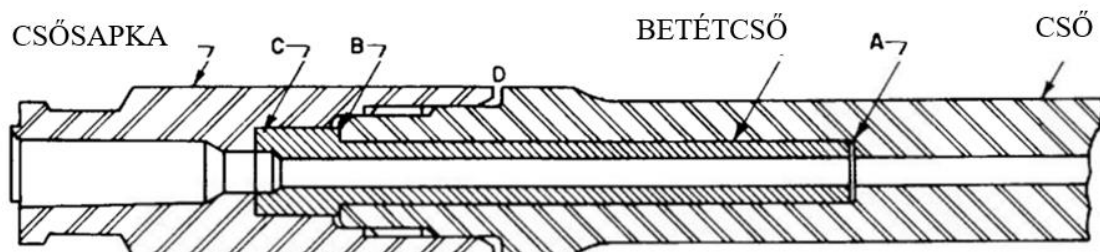
Az egy és többrétegű vastagfalú csövek belső feszültségi között jelentős eltérés van (11. ábra). Az egyrétegű cső estében (jobb oldal), a csőfal külső részének anyagában már alig ébred feszültség, ellenben a többrétegű vastagfalú cső (bal oldal) rétegei egyenletesen osztják el a terhelést.

Itt megemlítem a többrétegű csővel azonos fizikai elvet felhasználó technológiát, az autifretálást. Az elv ugyanaz, miszerint a cső külső része nyomja össze a cső belső részét. Az autifretálás estében ez úgy történik meg, hogy a csövet túlterhelik, ezért a cső belső része egy meghatározott rétegvastagságig maradó alakváltozást szenved. A megfolyt részt a többrétegű csőnél leírtak szerint a cső épen maradt része feszíti össze.



11. ábra: Az egyrétegű vastagfalú cső falában fellépő feszültség (jobbra), a többrétegű cső falában fellépő feszültség (balra) [20]

Más megfontolásból is készülhet több részből egy fegyvercső. Ilyen például, ha a csőben a leggyorsabban kopó részt, ahol a lövedéket a nyomás bepréseli a huzagolásba, cserélhetővé akarjuk tenni. Ez a konstrukciót, melyet álltában géppuskáknál használnak, hívják Quasi két részes csőnek [15] (12. ábra). A cső három részből áll, egyrészt egy csősapkából, másrészt egy betétcsőből, valamint a hagyományos értelemben vett fegyvercsőből. A betétnek itt nem feladata a cső terhelhetőségének a növelése, viszont készülhet keményebb, kopásállóbb anyagból.



12. ábra: Quasi két részes cső [15]

Részletes bemutatása nélkül megemlítem még a revolverekhez használt csöveket. A revolverek csöveinek jellegzetessége, hogy a lőszer a revolver forgó dobjában helyezkedik el. A töltényűr ezért nem a csőben van kialakítva, hanem a dobban.

2.8 Fegyvercső anyagok

A lőfegyvercső alapanyagoknak számos követelménynek kell megfelelniük. A lövésfolyamat során nagy belső nyomás lép fel, néhány milliszekundumos idő alatt. Emiatt az alapanyagoknak egyszerre kell nagy szilárdsággal és szívósággal rendelkezniük. A lőporégéskor felszabaduló hő a fegyvercsövet hevíti, ezért bizonyos esetekben, például géppuskáknál számolni kell a cső hőterhelésével is. (13. ábra) A hőterhelés hatására a fegyvercsövek falában feszültség jön létre, emellett a hőkezelt acélok ki is lágyulhatnak. Továbbá a csöveknek ellen kell állniuk a lövedék koptató hatásának és a lőporgázok okozta korrózióknak is. Olyan anyag, ami minden feltételnek megfelel nem létezik. Ha egy anyag rendelkezik a szükséges szilárdsággal, akkor fogékony lehet a korrózióra, ha ellenáll a korrózióknak, akkor lehet, hogy túlságosan rideg. Bizonyos esetekben szükséges az anyagok hiányosságait valamilyen konstrukció megoldással pótolni (például autofretált csövek).



13. ábra: Túlhevült géppuska cső [22]

Fegyvercsövek nem csak ötvöztött acélból készülhetnek, de mivel ez az anyagtípus a legelterjedtebb alapanyag, ezért az ötvöztött fegyvercső acélokat fogom vizsgálni. A kézi lőfegyvercsövek nagyszériás gyártása szempontjából legalkalmasabb alapanyagok a nemesíthető acélok. Ezeknek az acéloknak amellett, hogy megfelelőek a mechanikai tulajdonságaik, lágyított állapotukban alkalmasak hidegkovácsolásra, mellyel a csövek huzagolását készítik el. Folyáshatáruk 550 MPa és 1150 MPa között mozog és a kézi lőfegyver csövek nagy része ilyen acélokból készül. A hidegkovácsolt csövek gyártására leginkább alkalmas

acélok az alábbiak [11]: 32CrMoV12-10, 21CrMoV5-11, 14NiCr14 és 50CrV4. A felsorolt acélok mind nemesíthetők és nitridálhatók.

Mivel a nagynyomású lőszer gáznyomása lényegesen magasabb, mint a hagyományos lőszerké, ezért a hagyományos fegyvercső alapanyagokon túl bemutatok egy nagyszilárdságú acéltípust is.

Az acélokat szilárdság szempontjából az [23] szakirodalom három csoportba sorolja: alacsony, közepes és nagy szilárdságú. Az határozza meg, hogy egy acél melyik csoportba kerül, hogy mennyi a rugalmassági modulusának (E) és szakító szilárdságának (σ_{sz}) a hányadosa $\left(\frac{E}{\sigma_{sz}}\right)$. Az alacsony csoportban, az acélok rugalmassági modulusának és szakító szilárdságának a hányadosa nagyobb mint 300, a közepes csoportban 300 és 150 között van, míg a nagy szilárdságú csoportban kevesebb mint 150. Például 32CrMoV12-10 csőacél rugalmassági modulusa, 210 GPa [24], míg a szakítószilárdsága, 940 MPa [24], a kettő hányadosa kerekítve 225. Ezzel a viszonzszámmal a 32CrMoV12-10 csőacél a közepes kategóriába tartozik.

Létezik egy acélfajta, név szerint a martenzites öregedéssel keményedő acélok (maraging acélok), melyek a nagy szilárdságú kategóriába tartoznak. A legnépszerűbb maraging acélok rugalmassági modulusának és szakító szilárdságának hányadosa $\left(\frac{E}{\sigma_{sz}}\right)$ kevesebb mint 150 (1. táblázat). A maraging acélokat a folyáshatáruk alapján lehet kategorizálni. Az acél megnevezésekben az acélok 0,2%-os egyezményes folyáshatárának az értéke szerepel, psi-ben.

1. táblázat: Legnépszerűbb maraging acélok és rugalmassági modulus, szakító szilárdság hányadosuk [12]

név:	$\frac{E}{\sigma_{sz}}$
<i>maraging 200</i>	133
<i>maraging 250</i>	108
<i>maraging 300</i>	92
<i>maraging 350</i>	83
<i>maraging 400</i>	69

A maraging acélokat először a 1960-as években kezdte el tudományosan vizsgálni a The International Nickel Company Inc. [12] Először egy 25%-os, majd egy 18% os nikkel tartalmú maraging acélt fejlesztettek ki [25], utóbbi bizonyult a legjobb összetételnek a kiváló szívóssága miatt.

A maraging acélok a nemesíthető acélokkal összehasonlítva nem a viszonylag magas széntartalmú edzett szövetszerkezetnek köszönhetik a szilárdságukat. Széntartalma közel nulla százalék. Az acélok nagy szilárdsága annak köszönhető, hogy az öregítésnek nevezett hőkezelési folyamat során az acél szívós nikkel martenzit alapmátrixából, nanoméretű intermetalikus részecskék válnak ki.

A maraging acélok felhasználása egészen a fröccsöntő szerszámoktól, a rakéta alkatrészeken át, az uránium dúsítása során használt vékonyfalú tartályokig terjed. [12]

A maraging acélokat, mint potenciális fegyvercső alapanyagokat, több régebbi (1970-80-as években megjelent) szakirodalom is megemlíti [20] [26]. Az acélok felhasználását viszont fenttartásokkal kezelik az anyagok ridegsége és magas ára miatt.

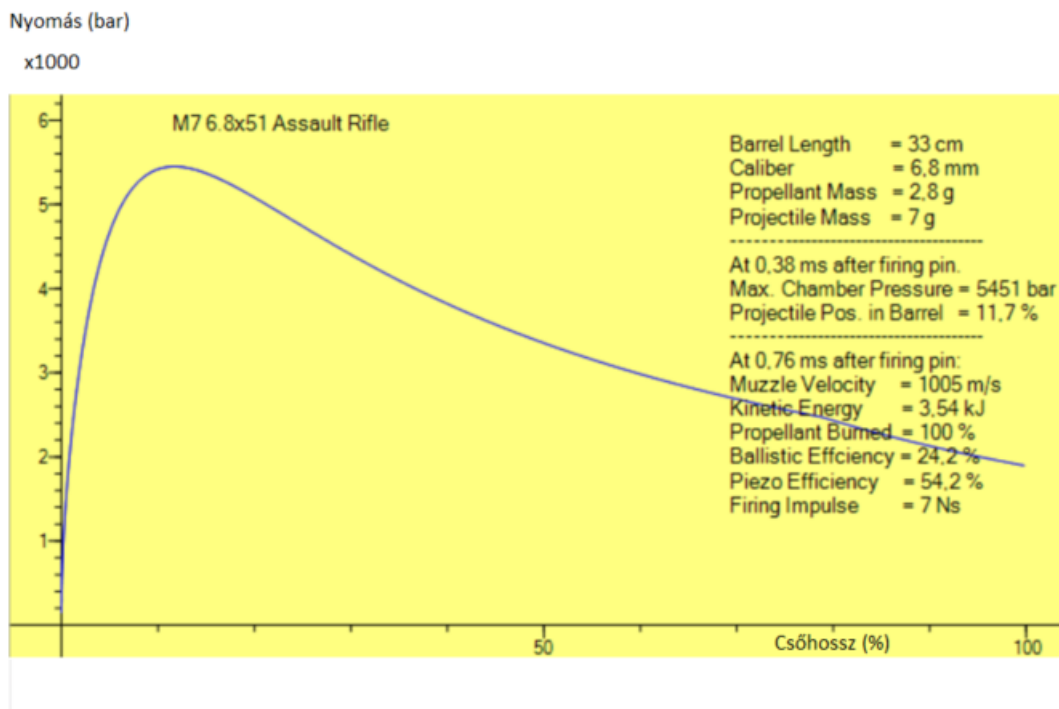
3. Fegyvercső konstrukció meghatározása

3.1 Nyomásgörbe jellegének meghatározása

A fegyvercső koncepció kiválasztásához szükség van konkrét adatokra a lőszerrel, mivel a lőszer paramétereiből kiindulva szimulálható pontosan a nagynyomású gáznyomásgörbe. A továbbiakban, nagy nyomású lőszer alatt a .277 SIG Fury-t fogom érteni.

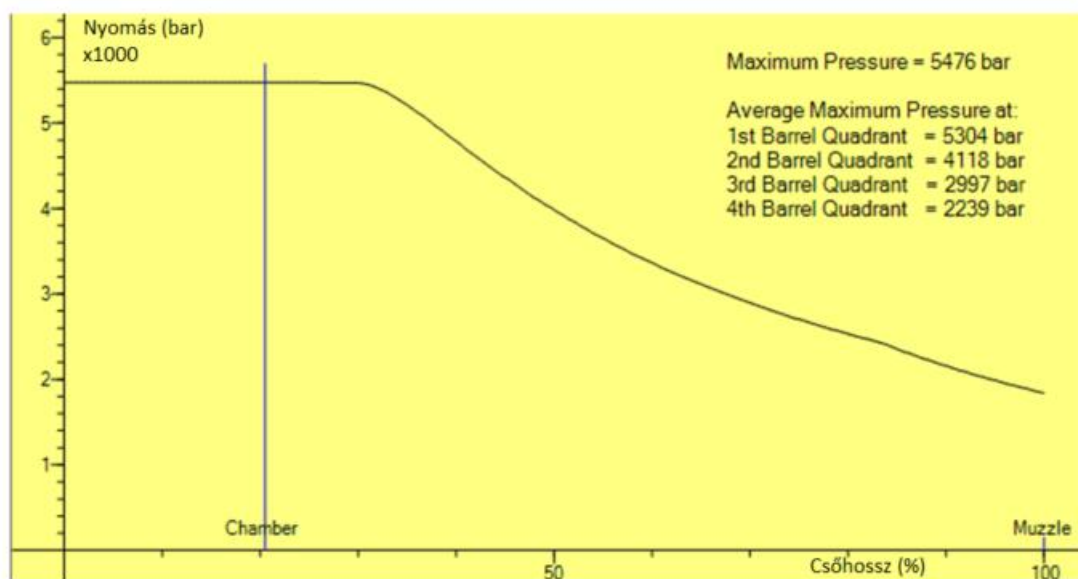
Fegyvercső konstrukció szempontjából, meg kell vizsgálni a nagy nyomású gáznyomásgörbét, mert meghatározza, hogy milyen hosszon kell elviselnie az extrém magas gáznyomást a csőnek. Abból indulok ki, hogy azokon a csőszakaszokon, ahol a gáznyomás 4500 bar fölé megy (ez a legnagyobb gáznyomás amire hagyományos löszert jóváhagytak), már nem használható a hagyományos anyagból elkészített monoblock kialakítású fegyvercső.

A nagynyomású lőszer gáznyomásgörbét a 14. ábra szemlélteti, melyet az Arzenál belsőballisztika programmal szimuláltam, ami az IBHVG2 modellt használja. Az ábrán látható, hogy megközelítőleg a csőfurat harmincöt százalékánál éri el a nyomás a 4500 bar-t. A program viszont csak az aktív csőhosszúságot ábrázolja, (annak végértékére normálva), amit még ki kell egészíteni a töltényúrral.



14. ábra: Nagynyomású lőszer gáznyomásgörbéje

A gáznyomásgörbék idő, vagy csőhossz függvényében ábrázolják a nyomás értékeket. A cső méretezéséhez viszont, a legnagyobb nyomásra van szükség, ami a cső egy adott pontját terheli. A csőfurat azon szakaszára, ahol a gáznyomás értékei növekednek a maximális gáznyomás vissza fog hatni. Tehát, addig a pontig, amíg a gáznyomásgörbe nem éri el a maximumát a fegyvercsövet a maximális gáznyomás fogja terhelni. A 15. ábrán látható a töltényűrrrel kiegészített és a csőfurat minden pontján fellépő maximális gáznyomást ábrázoló gáznyomásgörbe. Ezen ábráról leolvasható, hogy a hagyományos lőszerre jellemző 4500 bar-os nyomásértéket a gáznyomásgörbe megközelítőleg a csőfurat negyven százaléknál veszi fel.



15. ábra: A kiegészített gáznyomásgörbe

A fent leírtak szerint, megközelítőleg a fegyvercső negyvenöt százalékában kell olyan anyagot vagy konstrukciót alkalmazni, ami képes ellenállni a hagyományosnál magasabb nyomásnak.

3.2 Monoblock cső külső átmérője, maximális nyomás esetén.

A kis kaliberű fegyvercsöveknél általában a monoblock kialakítást alkalmazzák a tervezők. Az irodalomkutatásban bemutatott további konstrukciók, amiket főleg tüzérségi fegyverek csöveinél használnak, mind bonyolultabb tervezést és gyártási folyamatot jelentenek.

Az határozza meg, hogy érdemes-e monoblock csövet tervezni nagynyomású lőszerhez, hogy a maximális gáznyomás esetén, milyen folyáshatárú anyagot kell alkalmazni. Abban az esetben, ha az anyag folyáshatára nem elég nagy, vagy megfolyik a csőfuratban az anyag, vagy irreálisan megnövekszik a külső átmérő. Az irodalomkutatásban bemutatott vastagfalú

csövet leíró képletek és a TMG feszültségelmélet felhasználásával, levezethető a (11) összefüggéssel [9]:

$$r_k = r_b \sqrt{\frac{\sigma_m}{\sigma_m - 2(p_b - p_k)}} \quad (11)$$

A (11) összefüggésben az r_b a cső belső-, az r_k a külső sugara, a p_b a belső-, a p_k a külső nyomás, és a σ_m pedig a megengedhető feszültség. A cső belső átmérője, a csőtengely mentén változik, értékeit a lőszer és a lövedék kialakítása határozza meg. A koncepció választáshoz, a legnagyobb külső átmérő értékére van szükség. A legnagyobb külső átmérőhöz, a legnagyobb belső átmérőt kell behelyettesíteni a (11) képletbe. Továbbá a (11) összefüggésből következik, hogy a megengedhető feszültség nem lehet kisebb, mint a belső, és a külső nyomás különbségének a felel.

A fent leírt szempontokat figyelembe véve, a (11) összefüggésbe az alábbi adatokat helyettesítem be:

1. a belső átmérő értéke (d_b): 11,77 mm, (A .277 SIG Fury lőszerhez tartozó töltényűr legnagyobb átmérője.) [4]
2. a megengedhető feszültség (σ_m): 1200 MPa, (Nagyobb, mint a belső nyomás kétszeres.)
3. a belső nyomás (p_b): 5500 bar, (Amerikában erre a maximális nyomásértékre hagyták jóvá a .277 SIG Fury lőszert.)
4. a külső nyomás (p_k): 0 bar. (A belső nyomást túlnyomásként definiálom)

A (11) képletbe behelyettesített paraméterek alapján a külső átmérő 40,68 mm-re adódik. (11) Figyelembe kell vennünk, hogy az összefüggést a TMG feszültségelméletből vezettük le, ami a legkonzervatívabb megközelítés, tehát például a HMMH feszültség elméletet alkalmazva a külső átmérő jóval kisebbre adódna. Viszont a behelyettesített megengedhető feszültség értéke elég magas az átlagos fegyvercső alapanyagok folyáshatárának a felső határa. Továbbá nem korrigáltuk még a gáznyomás értéket az (1) képlet szerint és nem is számoltunk biztonsági tényezővel.

Összefoglalva, lehetséges egy anyagból fegyvercsövet készíteni, viszont mindenképpen olyan anyag szükséges hozzá, aminek a folyáshatára magasabb a hagyományos fegyvercső alapanyagok folyáshatáránál. Továbbá az is elképzelhető, hogy nem lehetséges a TMG feszültség elmélet alapján méretezni, hanem csak a valamelyik kevésbé konzervatív elmélet alapján.

3.3 Anyagválasztás monoblock fegyvercsőhöz

A konkrét acélt kiválasztásához szükség van a megengedhető feszültség pontos ismeretére. A megengedhető feszültség kiszámításához a (11) összefüggést a megengedhető feszültségre rendeztem és a belső nyomást korrigáltam az (1) összefüggés szerint, továbbá a kapott értéket megszoroztam egy biztonsági tényezővel. A fent leírtak szerint kaptam a megengedhető feszültségekre, az alábbi (12) összefüggést:

$$\sigma_m = \frac{n \left(\frac{r_k}{r_b} \right)^2 2(1,15p_b + 16,55)}{\left(\frac{r_k}{r_b} \right)^2 - 1}. \quad (12)$$

A (12) összefüggésben külső és belső sugarak szerepelnek, viszont mivel mindenhol a külső és belső sugár hányadosa van megadva, ezért nyugodtan behelyettesíthető átmérőben is. Ugyanebből az okból, nem kell SI¹¹ alapegységben (méterben) szerepelniük az átmérőknek. A megoldást úgy fogom MPa-ban megkapni, ha a nyomás értékeket is MPa dimenzióban helyettesítem be.

A (12) összefüggésbe az alábbi adatokat helyettesítem be:

1. a belső átmérő értéke (d_b): 11,77 mm, (A .277 SIG Fury lőszerhez tartozó töltényűr legnagyobb átmérője.) [4]
2. a belső nyomás (p_b): 5500 bar, (Amerikában erre a maximális nyomásértékre hagyták jóvá a .277 SIG Fury löszert.)
3. a külső nyomás (p_k): 0 bar, (A belső nyomást túlnyomásként definiálom)
4. a külső átmérő értéke (d_k): 40 mm, (Ennél nem lehet nagyobb átmérője a csőnek)
5. a biztonsági tényező (n): 1,2. (Későbbiekben megváltoztatható érték)

A megengedhető feszültség megközelítőleg 1600 MPa-ra adódik. Ugyanaz elmondható a (12) összefüggésre, mint a (11) összefüggésre. Az összefüggést ismét TMG feszültségelmélet szerint vezettem le, tehát más, kevésbé konzervatív feszültség elméletekkel a megengedhető feszültség kevesebbire fog adódni.

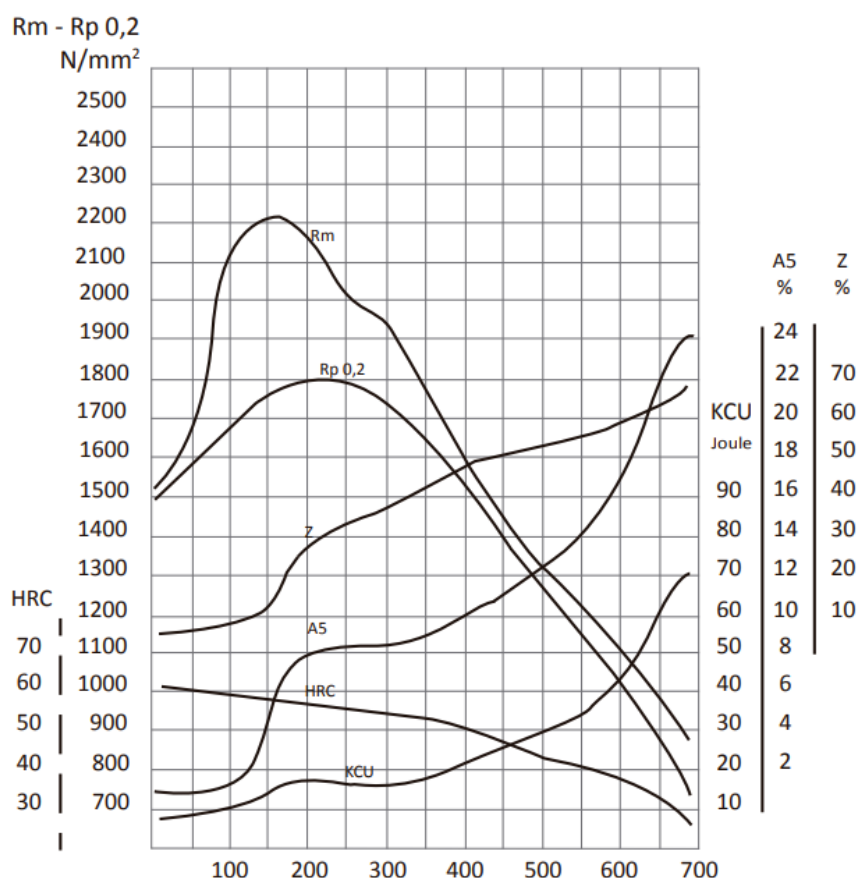
A kapott megengedhető feszültségnél az anyag folyáshatárának nagyobbnak kell lennie. A megengedhető feszültség ismeretében már választható konkrét anyag a fegyvercsőhöz.

Mivel az elvárt megengedhető feszültség értéke kifejezetten magas, ezért a monoblock fegyvercső kialakításához vagy egy hagyományos fegyvercső acélt kell megfelelően hőkezelni (amennyiben ez lehetséges), vagy választani kell egy nagyobb szilárdságú acélt. A maraging acélok közül a maraging 300 acéltípus (DIN 1.6358) tulajdonságait vizsgálom

¹¹ Système International d'Unités

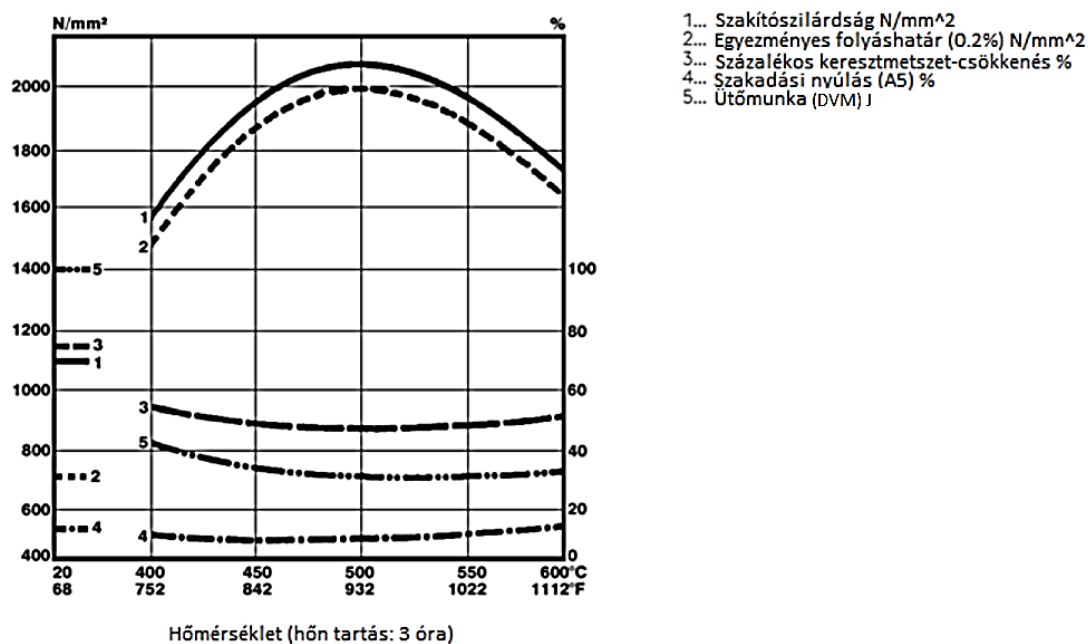
meg, és vetem össze egy hagyományos fegyvercső alapanyagként használatos a 51CrV4 acél tulajdonságaival.

Az 51CrV4 acél megeresztési diagrammja a 16.ábrán látható. A diagrammon az értékek, egy 10 mm átmérőjű próbatestre vonatkoznak, 2 órás hűntartás mellett. Az acél mechanikai tulajdonságai nagyban befolyásolhatók a megeresztés hőmérsékletével. A diagrammon látható, hogy 500 C°-os megeresztési hőmérséklettel az acél folyáshatára 1300 Mpa, a fajlagos ütőmunkája, 30 J (U bemetszésű próbatest esetén) és a keménysége megközelítőleg 40 HRC. Az acél legnagyobb elérhető folyáshatára 1800 MPa, amit 200-250 C°-os megeresztéssel tudunk elérni. Az acél fajlagos ütőmunkája ekkor 15-20 J (U bemetszésű próbatest esetén), keménysége megközelítőleg 50 HRC.



16. ábra: Az 51CrV4 acél megeresztési diagrammja [27]

A maraging 300 acél öregítési diagrammja a 17. ábrán látható. A diagramról leolvasható, hogy az acél folyáshatára 500 C°-os öregítési hőmérséklet mellett, 2000 MPa, ütőmunkája megközelítőleg 35 J (DVM szerinti próbatest szerint esetén). Az acél keménysége a diagrammon nem szerepel, viszont a tájékoztató jellegű értéke egy másik gyártó adatlapja szerint: 53 HRC. [28]

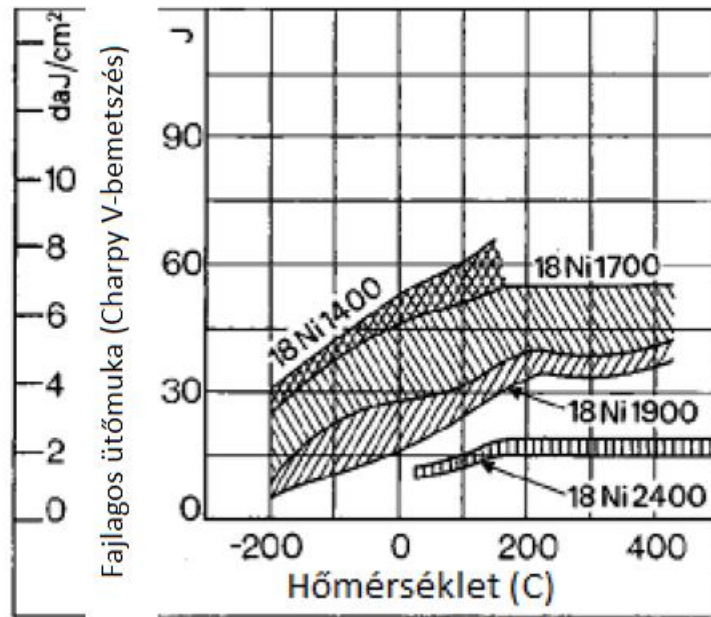


17. ábra: A maraging 300 acél öregítési diagrammja [13]

A 16. és 17. ábrán látható diagrammok alapján, mind az 51CrV4 és mind a maraging 300 acél esetében elérhető az elvárt 1600 MPa megengedhető feszültségnél magasabb folyáshatár érték. (Megfelelő hőkezelés mellett.) A két acél közül, a maraging acél a keményebb, amennyiben a 51CrV4 acélt, megközelítőleg 500 C°-on eresztjük meg.

Az acélok ütőmunkájának összehasonlításához további információk szükségesek, mivel a 16. és 17. ábrán nem ugyanazon szabvány szerint szerepelnek az ütőmunkák. Ha az 51CrV4 acél megeresztését, 580 és 680 C° között végzik el, az acél ütőmunkája min. 30 J lesz [14] (ISO V bemetszés szerint). A maraging 300 acél fajlagos ütőmunkájának tájékoztató jellegű értékei a 18. ábráról olvashatóak le. (ISO V bemetszés szerint). Az ábráról leolvasható, hogy az ütőmunka értékei 15...30 J között mozognak. Egy konkrét Aubert and Duval¹² maraging 300 acél esetében a fajlagos ütőmunka értékére 25 J-t adott meg a gyártó [28]. Az acélok ISO V bemetszés szerinti fajlagos ütőmunkájának az ismeretében kijelenthető, hogy a 50CrV4 acél, némileg szívósabb (a fent megadott megeresztési hőm. tartományban), mint a maraging 300 acél.

¹² Aubert and Duval (Acélgyártó cég)



18. ábra: Maraging acélok ütőmunkája, a hőmérséklet függvényében [29]

Az anyagválasztás során először kiszámoltam, hogy mekkora maximális feszültséget kell elviselnie a fegyvercső alapanyagának. Továbbá egy hagyományos fegyvercső acél és egy nagyszilárdságú maraging acél legfontosabb mechanikai tulajdonságait összevetettem. A 51CrV4 fegyvercső acélénál magasabb szakítószilárdsága hasonló szívósság és keménysége miatt a maraging 300 acélt választom fegyvercső alapanyagának.

4. Fegyvercső tervezése

4.1 Gáznyomásgörbe szimulálása

A gáznyomás görbe szimulálásához, olyan adatok megadása is szükséges, amit a konkrét nagynyomású lőszerre vonatkozóan nem ismernek. Ilyen például a betöltött lőportöltet tömege vagy a lőpor geometria méretei. A nem ismert adatok helyére létező, hasonló töltényekben használt lőporok ismert adatait, vagy azoknak a szimulációs futtatások eredményei alapján módosított értékeit helyettesítettem be.

A gáznyomásgörbe szimulálásához használt program első részében a bemenő adatok megadása szükséges. Először a programban használt csőlőpor geometriájára vonatkozó adatokat kell megadni. Ezek a következők: a cső külső-, és belső átmérője és a lőporszemcse hossza. A bemenő adatok következő részét a .277 SIG Fury lőszer és a hozzá tartozó MCX Spear fegyver adatai alapján adtam meg. Ilyen adatok a lövedék átmérő, a kezdeti égési térfogat és az aktív csőhossz, melyek nem változó paraméterek. További paraméterek szakirodalomból származnak, ilyenek a lövegállandó, a besajtolódási nyomás, az iniciáló (csappantyú) nyomás, a lőpor sűrűsége és a fajhőviszony, amelyeket szűk határok között módosíthatunk, a kívánt gáznyomásmaximum elérése érdekében. A gáznyomásgörbe szimulálásának szempontjából, a legfontosabb paraméterek, a betöltött lőportömeg, a lőpor égéshője, valamint a lőpor geometriai méretei.

Egy létező lőpor lőporgeometriájának apró módosításával, valamint a lőportöltet tömegének helyes megválasztásával, sikerült olyan gáznyomásgörbét szimulálni, amelynek a maximális nyomása megközelíti a modellezni kívánt 5500 bar-t.

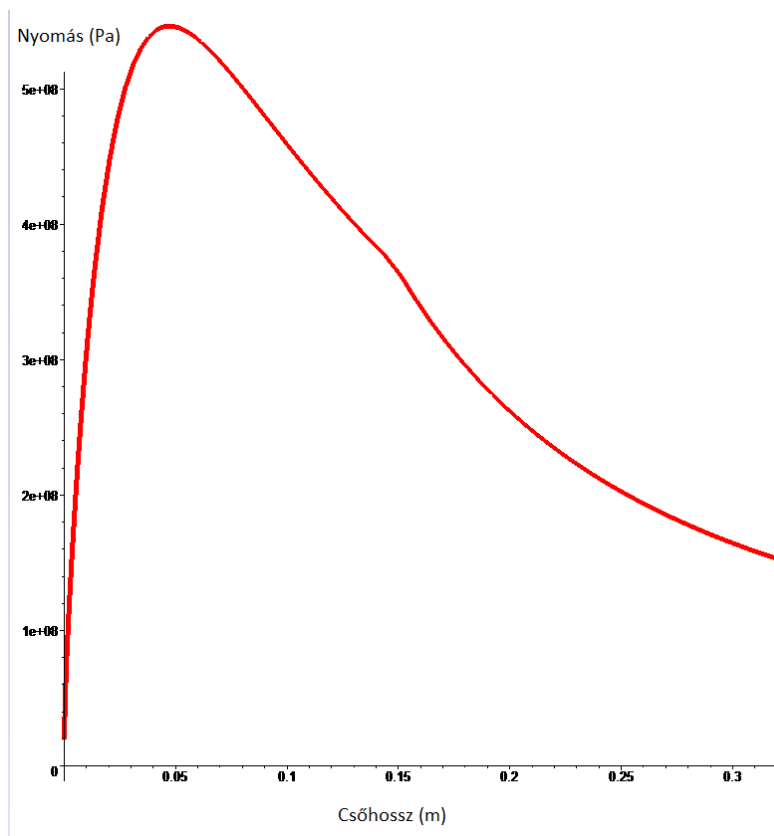
A program a bemenő adatokból további számított paramétereket is kalkulál, ilyenek többek között a lőporerő (force), a kovolumen, és a légköri égési sebesség. Ezek a számítások tapasztalati képletek alapján történnek[5].

A főegyenletek leírásához négy belsőballisztikai szakaszt különítünk el, melyek az alábbiak:

- 1 Pirostatikus szakasz, amely a lőportöltet meggyulladásától tart, a lövedék mozgásának kezdetéig.
- 2 Pirodinamikus szakasz, ami a lövedék mozgásának elindulásától tart, a lőporégés végéig.
- 3 Politropikus szakasz, ami a lőporégés végétől tart, a gázok csőszájon történő kiáramlásáig.

- 4 Lecsengő szakasz, amely a lőporgázok csőszáján történő kiáramlásától kezdődik. A lecsengő szakasz a cső terhelése szempontjából nem lényeges, ezért nem kell vele foglalkozni.

A belsőballisztika matematika leírása a pirodinamikus szakaszban a legbonyolultabb, mivel itt mind a négy főegyenletet használni kell és nem egyszerűsíthető egyik sem. A pirostatikus szakaszban, mivel nincsen lövedékmozgás a lövedék gyorsulását és sebességét leíró egyenletekkel nem kell számolni és a gáznyomás értékét megadó pirodinamika alap-egyenlete is egyszerűsödik a lövedék mozgását leíró tagok elhagyásával. A politropikus szakasz egyenletei szintén egyszerűsödnek, mivel itt már elégett a lőpor, ezért a lőporégést és a gázfejlesztést leíró egyenlet eliminálódik. A szimulált belsőballisztikai görbéken jól megfigyelhető az átmenet a különböző szakaszok között (19. ábra). A 19. ábrán látható, hogy amikor a lőporégés befejeződik, akkor a gáznyomásgörbében egy törés található. A törésponton vált a számítás a pirostatikus szakasz egyenleteiről, a politropikus szakasz egyenleteire. A szimulált görbéknel az átmenet elég szemléletes, a valóságban viszont nem különülnek el ilyen élesen a szakaszok egymástól.



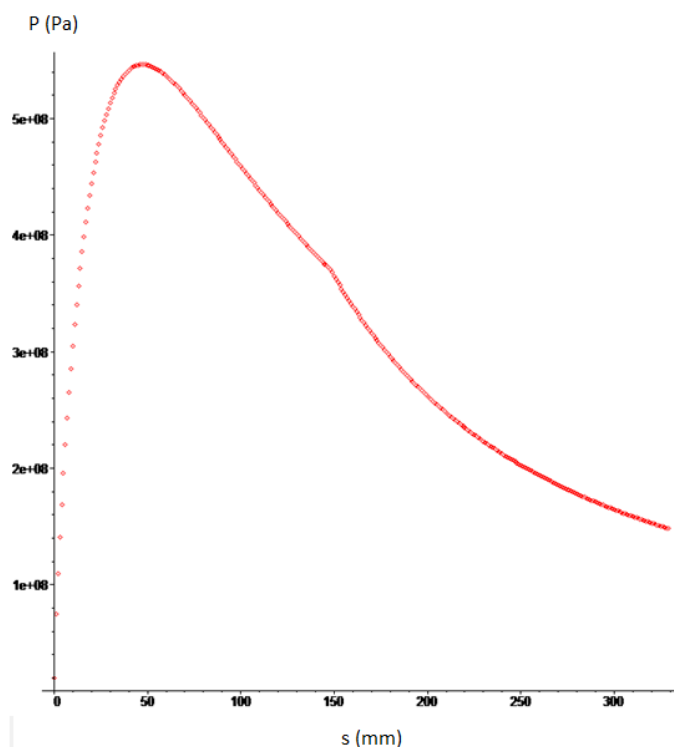
19. ábra: Átmenet a pirodinamikus és a politropikus szakaszok között

Az egyenletek leírása után, a számításokat kell elvégezni. A számítások elvégzése úgy történik, hogy a program szakaszonként megoldja a belsőballisztika egyenletrendszerét. A számítás numerikusan történik, előre meghatározott ($1\mu s$) időlépésekben. Az eredményeket a program egy belső struktúrában eltárolja. (20. ábra) A pirosztatikus szakasz egyenleteinek kezdeti értékei megadják, hogy nincsen még belső nyomás, nem kezdődött el a lőporégés, és nincsen még elégett lőpor. A pirodinamikus és a politropikus szakasz kezdeti értékei, mindig az előző szakasz végső értékei. A politropikus szakasz akkor fejeződik be, amikor a lövedék eléri a csőszáját.

[$t, e(t), k(t), \omega(t), p(t), v(t)$]						
0.00064800000000000032	0.000159942552999218840	0.148232611815889398	0.00281912533354745747	$0.370017453951032579 \cdot 10^9$	705.341432794514618	
0.00064900000000000056	0.000160254801377605769	0.148938643599379028	0.00282387839199366338	$0.368904591218076826 \cdot 10^9$	706.721847687745822	
0.00064999999999999972	0.000160566110494452761	0.149646053701921272	0.00282861424130396306	$0.367794974195309400 \cdot 10^9$	708.098110211555536	
0.00065099999999999995	0.000160876483106405909	0.150354837984780804	0.00283333294964871084	$0.366688622183394968 \cdot 10^9$	709.470232552765196	
0.00065200000000000019	0.000161185921991953809	0.151064992322053726	0.00283803458534303546	$0.365585553678818106 \cdot 10^9$	710.838226994759907	
0.00065300000000000044	0.000161494429951427471	0.151776512600668018	0.00284271921684684220	$0.364485786373883605 \cdot 10^9$	712.202105917487643	
0.00065400000000000068	0.000161802009807000651	0.152489394720382976	0.00284738691276481636	$0.363389337156715393 \cdot 10^9$	713.561881797460387	
0.00065499999999999984	0.000162108664402689550	0.153203634593789772	0.00285203774184641632	$0.362296222111258149 \cdot 10^9$	714.917567207753110	

20. ábra: Képernyőkép, a programban eltárolt eredményekről

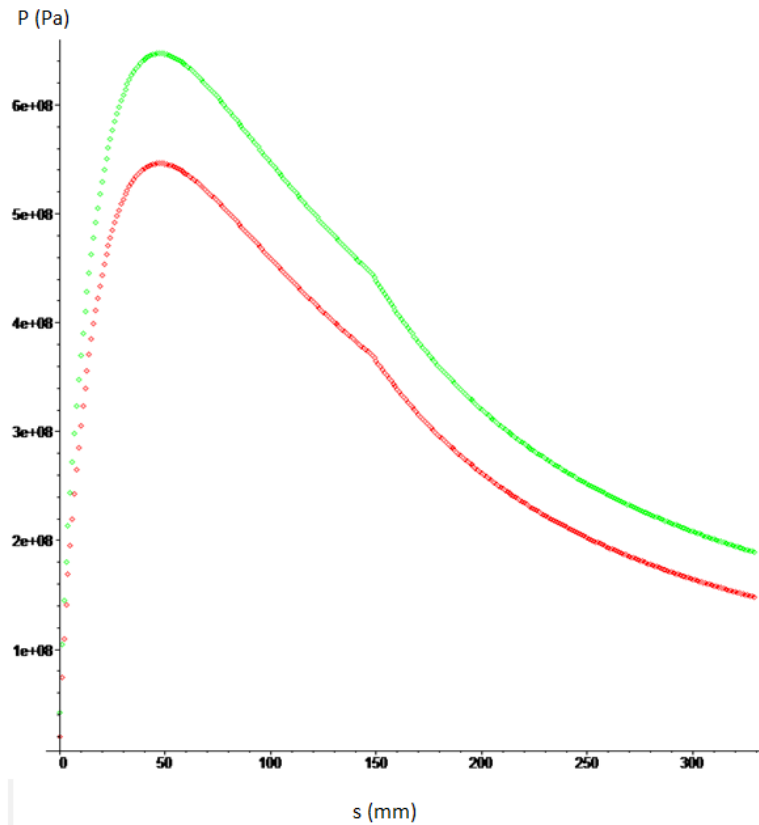
A megoldott egyenletekből származó adatok még nincsenek megfelelő formátumban a cső szilárdságtani méretezéséhez. Elsőként a lövedék elmozdulás és gáznyomás adatokat el kell különíteni, mert csak ezekre lesz szükség. Ezután, még továbbra is probléma, hogy az értékek időegységenként követik egymást. Ez azt eredményezi, hogy mikor a csőfurat függvényében ábrázoljuk a gáznyomás értékeket nem lesz egyenletes a pontok eloszlása. Megoldásként a létrejött pontokat (melyeknek értékpárosai az adott időpillanathoz tartozó lövedékút- és gáznyomásértékek) egyenesekkel kötjük össze, így létrehozva a gáznyomásgörbe közelítő függvényét. A közelítő függvény ismeretében a csőfurat egy tetszőleges pontjához tudunk gáznyomás értéket rendelni. Az interpolációs függvényből 1 mm-es lépésközzel számítottam ki a gáznyomást megadó függvényértékeket (21. ábra).



21. ábra: A szimulált gáznyomásgörbe

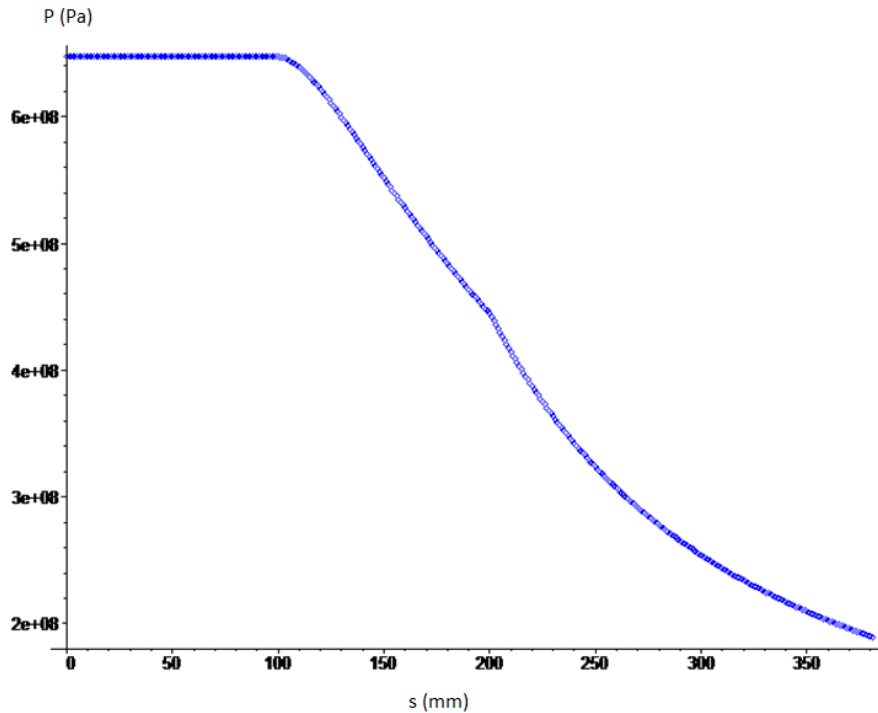
A nyomás mértékegysége Pascal a későbbi számítások miatt, viszont a lövedék elmozdulás mértékegysége maradhat milliméterben, mert csak a pozíció meghatározásához szükséges és nem fog szerepelni a főfeszültségeket leíró képletekben.

A gáznyomásgörbe létrehozása után még további átalakítások szükségesek. Először is korrigálni kell a gáznyomásgörbét a (1) képlet szerint, ezzel figyelembe véve a lőszerek gyártási szórását és a lőporégés hőmérséklet függését. Az eredeti és a korrigált gáznyomásgörbét a 22. ábra szemlélteti. Az ábrán az eredeti gáznyomásgörbe pirossal, a korrigált zölddel szerepel.



22. ábra: Az nagynyomású lőszer eredeti (piros) és korrigált (zöld) gáznyomásgörbéje

Szükséges még a nyomásgörbe átalakítása a dolgozat 3.1-es pontjában leírtak szerint. Röviden összefoglalva, először hozzá kell adni a töltényűrt az aktív csőhosszhoz, majd pedig a meg kell keresni a maximális nyomás helyét és a maximális nyomás előtti értékeket is egyenlővé kell tenni vele. Ezzel létrehozva azt a gáznyomásgörbét, ami valójában terheli a csövet (23. ábra)

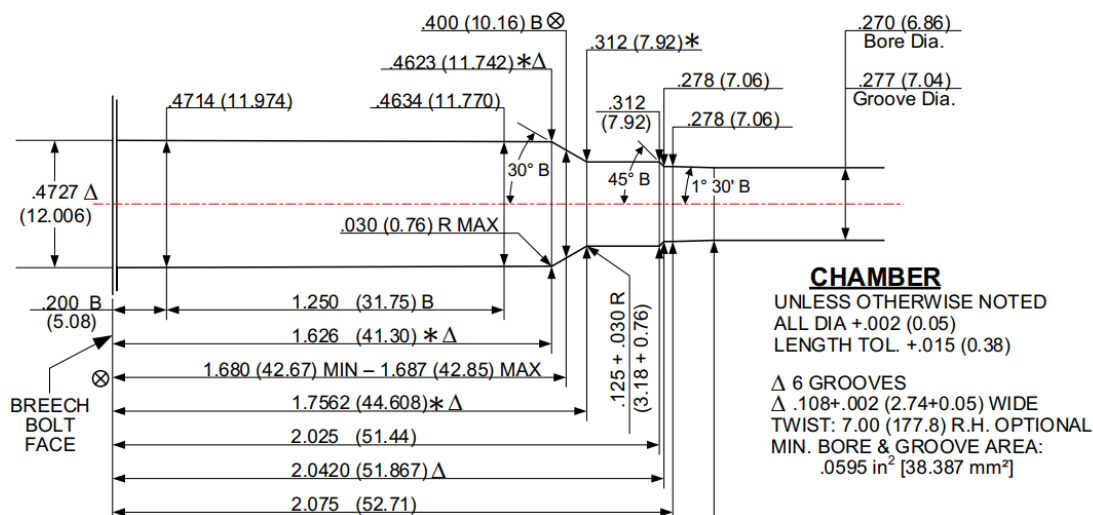


23. ábra: A korrigált, és átalakított gáznyomásgörbe

4.2 Fegyvercső kontúr előállítás

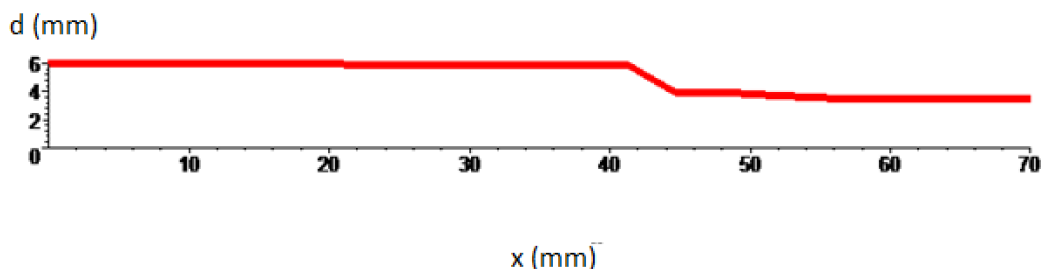
A (2) és (3) összefüggésekben, melyek leírják a csőfalban ébredő radiális és tangenciális főfeszültségeket, szerepel a csőfurat belső sugara. Azért van szükség a csőkontúr függvény előállítására, mert a töltényűrnél a cső belső sugara változik. A külső rádiusz-csőhossz függvény meghatározásához elő kell állítanunk a belső rádiusz-csőhossz függvény, amely a töltényűrnél a SAAMI adatlap szerinti meridiángörbe.

A csőkontúr létrehozása úgy zajlik, hogy elsőként a nagynyomású lőszer SAAMI adatlapjáról átveszem a töltényűr kontúr töréspontjait (24. ábra). Az átvett pontok koordinátaival egyenesek egyenleteit írom fel és az egyeneseket összefűzőm. Az így létrejött függvény minden csőtengely hossz értékhez rendel egy belső sugár értéket, a csőfaról egészen a csőszájig. A huzagolt résznél a csőfurat legnagyobb belső átmérőjével a huzagprofil barázdájának átmérőjével számolok, ezzel létrehozva a belső meridián elsőrendű spline közelítését, amely további számításokhoz közvetlenül felhasználható.



24. ábra: A .277 SIG Fury lőszerhez kialakítandó töltényűr [4]

A programban létrehozott csőkontúrnak (25. ábra) meg kell egyeznie a SAAMI adatlapon (24. ábra) láthatóval, viszont mivel az adatlapon az ábra nem méretarányos, ezért az összehasonlítás nem olyan szemléletes. A programban létrehozott csőkontúr utolsó pontja a csőfurat vége, tehát az ábrázolás tartományát le kellett szűkíteni, hogy a töltényűr látható legyen.



25. ábra: A programban létrehozott csőfurat függvény

4.3 Szilárdságtani számítások

A létrehozott gáznnyomásgörbe és belső kontúr ismeretében majdnem minden készen áll a szilárdságtani számításokhoz. Amire még szükség van az a fegyvercsőre vonatkozó megengedhető feszültség. A megengedhető feszültséget az anyag folyáshatára, osztva a biztonsági tényezővel. Képlet formájában:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_y}{n}. \quad (13)$$

A választott 18Ni1900 maraging acél folyáshatára (σ_y) 2000 MPa [13], a választott biztonsági tényező (n) pedig 1,2. A biztonsági tényező értéke az alapanyag és a feszültségi elmélet függvényében később változtatható. Miután az adatokat behelyettesítettem a (13) képletbe a megengedhető feszültség (σ_m) 1667 MPa-ra adódik.

A UST feszültség elmélet használatához szükségünk van továbbá a b érték meghatározására. A paraméter számítása a (10) képlet alapján történik.

$$b = \frac{2\tau_y - \sigma_y}{\sigma_y - \tau_y} \quad (10)$$

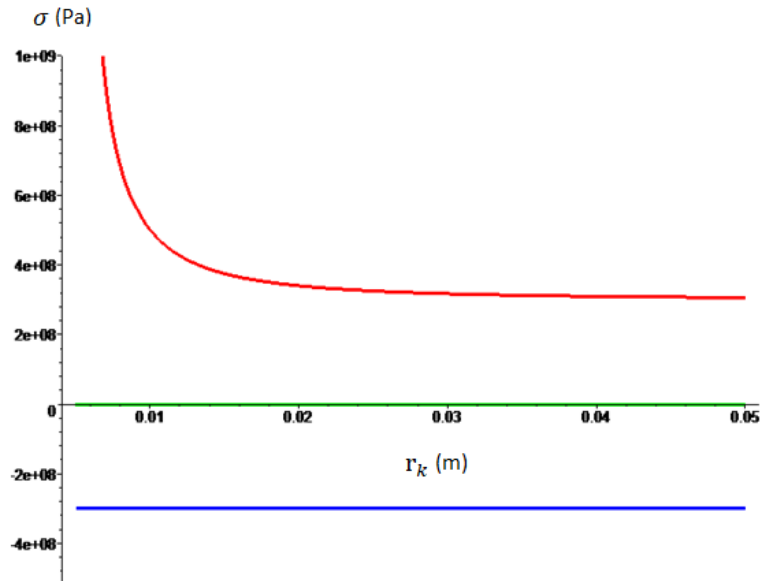
A képletben az alábbi adatokat helyettesítettem be:

1. az anyag folyáshatára szakításra (σ_y): 2000 MPa, [13]
2. az anyag szakítószilárdsága nyírásra (τ_{sz}): 1150 MPa. [1] (A nyírásra vonatkozó folyáshatárról nem találtam elérhető adatot.).

A behelyettesítés után a b értéke: 0,35.

A szilárdságtani számításokat úgy végzem el, hogy veszem valamelyik feszültség elméletet, ami a cső külső sugarának a függvénye és egyenlővé teszem a meghatározott megengedhető feszültséggel. A számítást ciklusba szervezem és a képletekbe a cső tengelye mentén, milliméterenként helyettesítem be a csőfurat belső sugarának és a csőben lévő nyomásnak az értékeit.

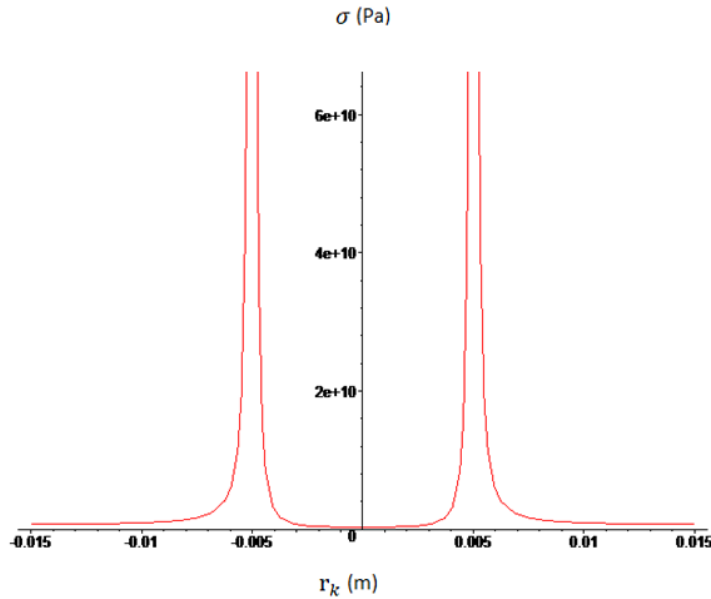
Elsőként ki kell számítani a radiális és a tangenciális főfeszültegeket a (2) és a (3) képletekkel. Míg a σ_r -t, a B és a C érték összege, addig a σ_t -t, a B és a C értéknek a különbsége adja. Az axiális főfeszültséget nullának tekintjük. A főfeszültségek ismeretében használhatók majd a feszültség elméletek. A feszültség elméletek használatához meg kell határoznunk a főfeszültségek nagyságának a sorrendjét, mivel ezek alapján lehet majd a feszültség elméletekbe behelyettesíteni. Az axiális főfeszültség nullának tekinthető (mivel a cső nem zárt), a tangenciális feszültség értéke pozitív, a radiális főfeszültség értéke pedig negatív. (26. ábra) Tehát a legnagyobb főfeszültség (σ_1) a tangenciális- (σ_t), a középső főfeszültség (σ_2) az axiális- (σ_a), a legkisebb főfeszültség (σ_3) pedig a radiális főfeszültség (σ_r).



26. ábra: A csőfalban ébredő axiális (zöld), radiális (kék), tangenciális (piros) főfeszültségek a külső sugár függvényében (Adott belső nyomás, külső nyomás és belső átmérő mellett)

Miután meghatároztuk a legnagyobb (tangenciális), a közepső (axiális) és a legkisebb (radiális) főfeszültségeket, elkezdhetünk behelyettesíteni a feszültség elméletek képleteibe. A behelyettesítés mellett a megoldáshoz szükség van az értelmezési tartomány szűkítésére, mivel a matematikai egyenletek számunkra érdektelen gyökeit ki kell zárunk.

A megengedhető feszültség a csőkontúr külső sugarának a függvénye, ezért az értelmezési tartomány szűkítése úgy lehetséges, ha a külső sugár értéket egy tartományon belül adjuk meg. Mivel a külső sugár értéke a belső sugár értékénél nagyobb, ezért ezzel a kitéttel szűkítjük az értelmezési tartományt. Technikailag a program egy egyenletrendszert old meg, aminek az egyik tagja a megadott megengedhető feszültséggel egyenlővé tett feszültség elmélet, a másik tagja pedig egy egyenlőtlenség, miszerint a külső sugárnak nagyobbnak kell lennie a belsőnél.



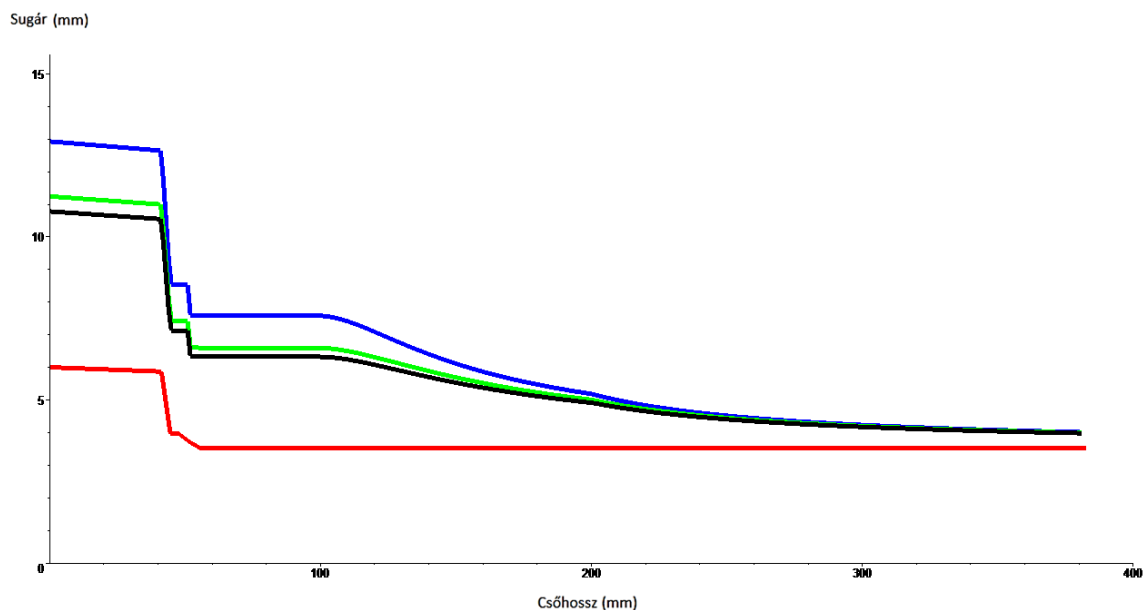
27. ábra: A TMG szerint megengedhető feszültség, a külső sugár függvényében

A 27. ábrán látható, hogy a függvény két r_k érték értéknél is tart a végtelenbe. Ez a képletekbe behelyettesített belső sugár értéke és annak negatív előjellel vett értéke. A függvény visszaadja a vastagfalú cső viselkedését azzal a feltétellel, ha a belső sugárnál nagyobb értékeknél keressük a külső sugár értékét.

Az UST feszültségelméletnél kérdéses még a főfeszültségek nagysága, mivel a feszültségelmélet képletében két lehetőség közül kell választani annak a függvényében, hogy a főfeszültségek nagysága hogyan viszonyul egymáshoz. Az határozza meg, hogy a feszültségelmélet melyik formáját kell alkalmazni, hogy a közbülső főfeszültség nagysága nagyobb vagy kisebb a legnagyobb és legkisebb főfeszültség összegének a felénél. Esetünkben a második reláció teljesül a (9) összefüggésben, tehát a képlet második formáját kell használni.

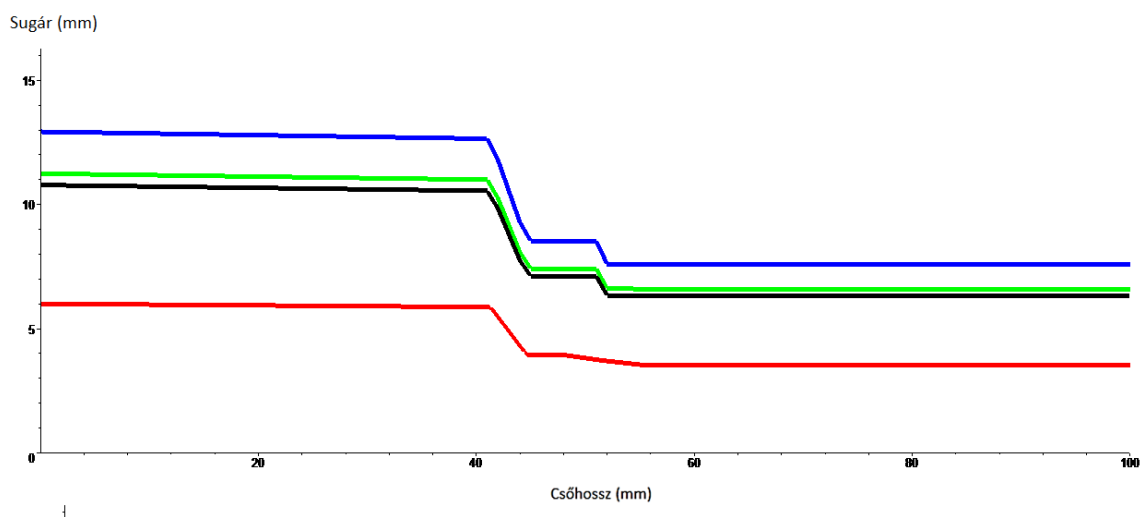
$$\sigma_{eUYC} = \begin{cases} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b}, & \sigma_2 < \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \\ \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} - \sigma_3, & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \end{cases} \quad (9)$$

A program lefuttatása után, megkapjuk a fegyvercső külső kontúrjának a pontjait, melyek a fegyvercső tengelye mentén milliméterenként követik egymást és mind a három vizsgált feszültség elméletéhez tartozik egy-egy kontúr. A szemléletesebb ábrázolás kedvéért, a kapott pontokat vonalakkal kötöttem össze (28. ábra). A TMG feszültség elmélet szerint előállított fegyvercső kontúr eredményezi a legvastagabb fegyver csövet, ezt követ a UST-szeníti kontúr, a legvékonyabb csövet pedig a HMH feszültség elmélet használatával kapjuk.



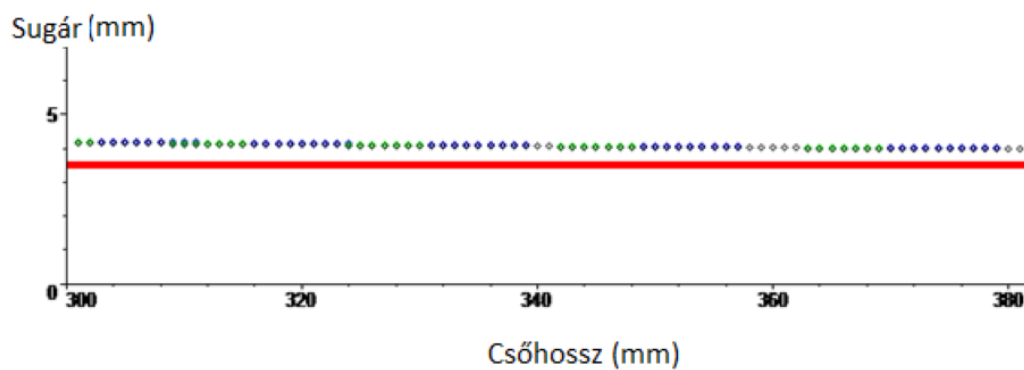
28. ábra: A fegyvercső külső kontúrja, a TMG (kék), HMH (fekete), és UST (zöld) feszültség elméletek szerint

A fegyvercsövet a maximális belső nyomás terheli, megközelítőleg 100 mm-ig (23. ábra). A kapott fegyvercsövek falvastagsága ennek ellenére nem állandó ezen a szakaszon (29. ábra). A TMG szerint levezetett (11) összefüggés alapján az ábrán látható eredmények megegyeznek a vártakkal, miszerint a külső sugarak értéke arányos a belső sugarak értékével.



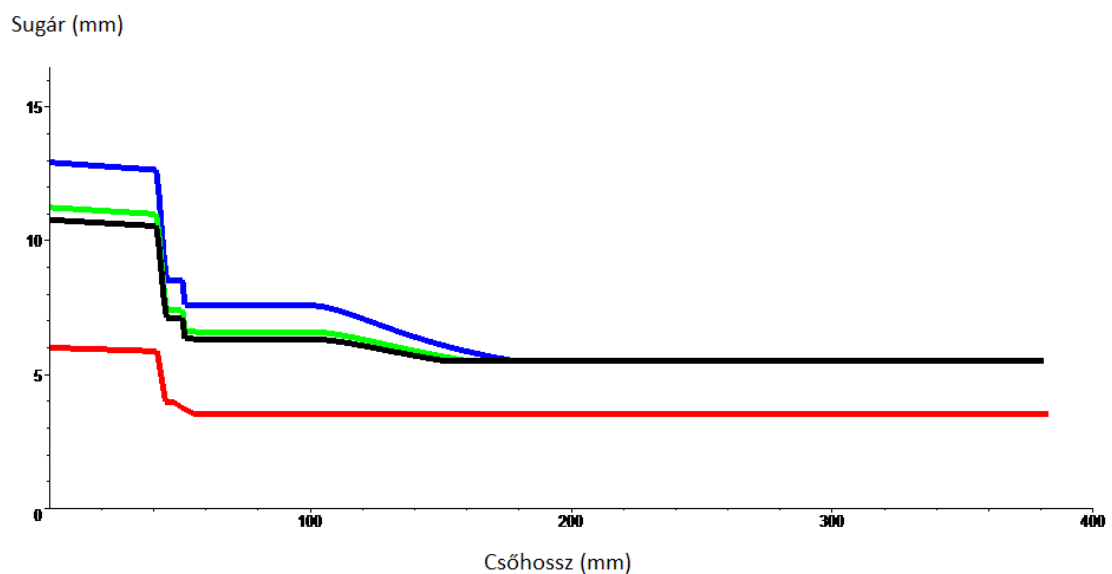
29. ábra: Fegyvercsövek falvastagsága, a töltényűr közelében

Nem célszerű, ha a fegyvercső túlzottan elvékonyodik, ezért a fegyvercső külső kontúrját a csőszáj közelében érdemes megvizsgálni. Amennyiben a csőfal elér egy minimális falvastagság értéket onnantól nem csökkenhet tovább. A minimális falvastagságot 2 mm-re határozza meg a szakirodalom [30], ennek a kétszeresét hozzáadva a cső végén található belső átmérőhöz (huzagolás barázdája), ami kerekítve 7 mm, a minimális külső átmérő 11 mm-re adódik. A csőszáj közelében a cső külső átmérője nem éri el ezt az értéket, (egyik feszültség elmélet szerint sem), ezért a külső kontúrok kiegészítésre szorulnak (30. ábra).



30. ábra: A cső külső átmérője a csőszájnál

Az elvékonyodó csőszáj problémáját úgy lehet megoldani, hogy attól a ponttól, ahol a külső csőkontúr a kritikus átmérő alá megy, egyenlővé tesszük a külső átmérőt a minimális átmérővel (31. ábra).



31. ábra: Korrigált fegyvercső kontúr

4.4 Fegyvercső CAD modellek elkészítése

A fegyvercső tervezés következő lépéseként a Maple-ben létrehozott fegyvercső kontúrokat célszerű valamilyen CAD rendszerben kezelhetővé tenni. A kontúrok CAD rendszerbe való átültetéséhez egy DXF¹³ készítő programot írtam, szintén a Maple-ben. A DXF generáló programot a dr. Laczik Bálint által, a 2000-es évek elején kifejlesztett őspéldány megoldásait felhasználva készítettem el. Dr. Laczik Bálint megoldása egy elliptikus fogaskerék kontúráját volt képes Maple-ből egy DXF fájlba írni, lehetővé téve ezzel az alkatrész szikraforgácsolását. A Maple megoldás már közvetlenül beolvasható a CAD programokba, és úgy kezelhető, mint egy CAD programban megrajzolt vázlat.

A Maple-ben egy külső kontúrt megadott számú pont határoz meg. A DXF fájl létrehozásához a kontúr pontjait, vonalak kezdő és végpontjaihoz fogom felhasználni. A létrehozott fájlban a kontúr úgy fog megjelenni, mintha az AutoCAD-ben vonallakkal összekötöttük volna a pontjait.

Egy vonalakat tartalmazó DXF fájl létrehozásához először egy teljesen üres DXF fájlra van szükség. A DXF fájlok belső struktúrájában először a fájlokra vonatkozó általános adatokat határozom meg. Ilyen adatok például a fájlban található szöveg mérete, fajtája vagy a vonalak vastagsága. Ezután következik a geometriai elemek meghatározása, ami a fájl belső struktúrájában, ez „ENTITIES” elnevezésű sor alatt történik.

Az üres DXF fájl belső struktúrájában, az „ENTITIES” sor alatt egy „0” érték található, mivel a fájl nem tartalmaz geometriai elemeket. Az üres fájl belső struktúrája egészen az „ENTITIES” sorig átmásolható az új DXF fájlba, mivel itt nem szükséges semmilyen változtatás. A másolás után következik a geometriai elemek, azaz a vonalak megadása. A DXF fájlban a vonalak tizenhét adattal adhatók meg. Az adatok egy része például a „LINE” elnevezés, minden vonalnál azonos. Vannak viszont sorok, amik az adott vonalra jellemző, egyedi adatokat tartalmazzák (32. ábra). Az egyedi adatok közül a vonalakra jellemző sorszámot és a vonalak kezdő és végpontjait megadó koordinátákat fogja a program vonalanként változtatni. A vonalak sorszámának megadásához szükséges még egy számrendszerek közötti váltás, mert a sorszámokhoz hexadecimális számrendszert kell használni. A sorszámot megadó hexadecimális számozást, C8-tól (decimális számrendszerben: 200) érdemes kezdeni, mivel több lekötött érték található a C8 alatti értékek között. A vonalak sorszáma a harmadik sorban jeleni meg. (32. ábra)

¹³ Drawing Exchange Format (Az AutoCAD szabványos vektorgrafikus adat formátuma)

```

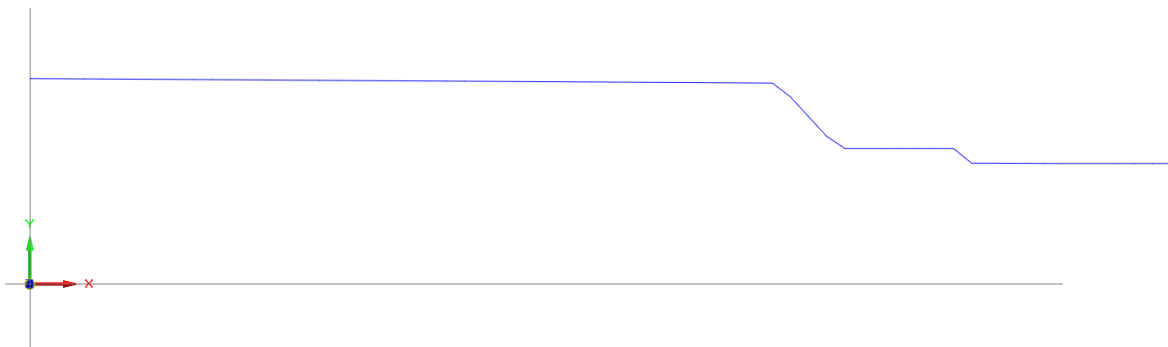
LINE
5
1AA
8
0
10
226.0000000
20
5.500000000
30
0.0
11
227.0000000
21
5.500000000
31
0.0
0

```

32. ábra: Vonalak sorszáma (zölddel), kezdő és végpontjai (pirossal), egy DXF fájl belső struktúrájában

A vonalka kezdő, és végpontjainak x és y koordinátái, a Maple-ben kiszámított pontok lesznek. A program a csőfartól kezdi a vonalak beírását és a megadott sorszámú ponttal fejezi be. Az a geometriai elemek megadása után a fájlt lezáró sorokat át kell még másolni az üres DXF fájlból, az újonnan létrehozott fájlba. Miután ez a másolás is megtörtént az új DXF fájl már megnyitható valamilyen CAD programmal.

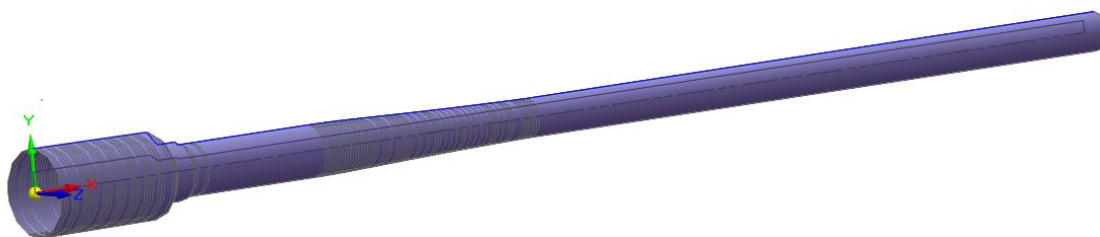
A DXF generáló program használatával, minden feszültség elméletéhez tartozó csőkontúrhoz DXF fájlokat generáltam (33. ábra).



33. ábra: A HMM-szerinti külső csőkontúr, CAD rendszerben megnyitva

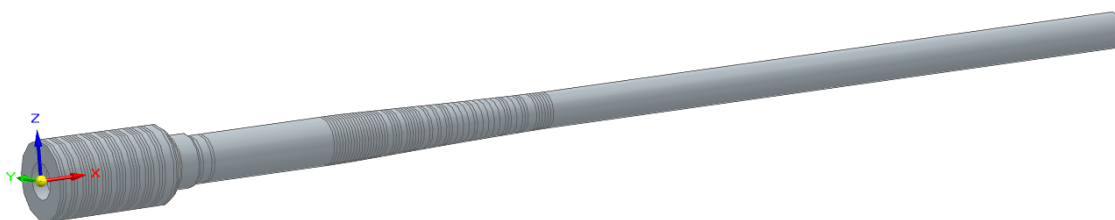
A CAD modellek megrajzolásához, a Solid Edge program 2023-as hallgatói verzióját használtam.

A programban megrajzoltam a töltényűr és a fegyvercső furat kontúráját, utána behívtam a DXF fájlakat. A fájlok behívása után a fegyvercsövek modelljei egyszerűen generálhatók, mivel a DXF profilokat csak körbe kell forgatni (34. ábra).



34. ábra: A TMG szerint tervezett cső külső kontúrából készített forgásfelület

A CAD programokba lehetőség van az alkatrészek tömegének megmérésére az alapanyag sűrűség megadása után. A választott fegyvercső alapanyaga maraging 300 acél, mely sűrűsége 8200 kg/m^3 [13]. A legnehezebb fegyvercső, a TMG szerint méretezett, utána következik a UST szerint és végül a HMH szerint méretezett cső. A tömegek sorban: 0,354, 0,278 és 0,261 kg. (2. Táblázat) Az eredmény megfelel a várakozásoknak, miszerint a TMG feszültség elméletet használva lesz a legvaskosabb a fegyvercső. A TMG szerint méretezett cső tömege a HMH szerint méretezett csőhöz viszonyítva, 93 grammal nagyobb. A UST szerint méretezett cső és a HMH szerint méretezett cső tömege között lényegesen kisebb a különbség, csupán 15 gramm, a HMH szerint méretezett cső javára. A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy a legkisebb tömegű cső a maraging 300 alapanyagot használva, a HMH feszültség elmélet használatával tervezhető (35. ábra).



35. ábra: HMH szerint méretezett fegyvercső CAD modellje

A CAD modellek azokat a fegyvercsöveket tartalmazzák, amik a számítások bemeneti paraméterei szerint, biztosan ellen képesek állni a magadott belső nyomásnak. Ahhoz, hogy a modelleken látható fegyvercsövek, gyártásra és beépítésre alkalmasak legyenek, még további tervezési feladatok szükségesek. Ilyenek például a gyártási technológiához igazított geometriák, a fegyvercsövek csatlakozásául szolgáló menet vagy egy lehetséges gázhenger furat. De addig, amíg a tervezés során nem csökken a külső kontúr átmérője a számításokkal megkapott külső átmérők alá a csövek szilárdságtani szempontból meg fognak felelni. A nagynyomású lőszerhez tervezett fegyvercső szilárdságtani méretezése elkészült.

2. táblázat: A különböző feszültségelméletek szerint méretezett fegyvercsövek tömegei

Feszültségelmélet:	Alapanyag:	Tömeg (kg):
<i>TMG</i>	<i>maraging 300</i>	<i>0,354</i>
<i>UST</i>	<i>maraging 300</i>	<i>0,278</i>
<i>HMH</i>	<i>maraging 300</i>	<i>0,261</i>

5. Összefoglalás, az eredmények értékelése

5.1 A dolgozat összefoglalása

Az dolgozat írása során, utánanéztem az USA-ban megjelent nagynyomású lőszernek, a gáznyomás görbék modellezésének, a fegyvercsövek szilárdságtani méretezésének, a fegyvercső konstrukcióknak és a lehetséges alapanyagoknak. A fegyvercső konstrukciók közül kiválasztottam a monoblock kialakítást, és egy hagyományos acél tulajdonságait összevetettem egy nagy szilárdságú maraging acél tulajdonságaival. A fegyvercső szilárdságtani méretezéséhez Maple programot írtam. A programmal szimuláltam a nagynyomású lőszer gáznyomás görbáját és milliméterként kiszámítottam a szilárdságtanilag megfelelő fegyvercső, minimálisan szükséges külső átmérőjét. A külső átmérőt több feszültség elmélet szerint is meghatároztam, és a további tervezési folyamatok elősegítéséhez, a kapott külső kontúrokat átvittem egy CAD rendszerbe. A Maple és a CAD rendszerek közötti egyszerű adat átvitelhez (kétdimenziós), a DXF formátumot használtam. A különböző feszültség elméletek alapján méreteztem, fegyvercsövek tömegeit, a CAD modellek alapján összehasonlítottam. A legnehezebb fegyvercsövet a TMG-szerinti méretezéssel kaptam, a tömege 354 gramm. A UST, és a HMMH feszültségelmélettel méretezett csövek lényegesen könnyebbek, előbbi 278, utóbbi 261 gramm tömegű.

5.2 A továbblépés lehetőségei

A nagynyomású lőszerhez tervezhető fegyvercső témáját, többféleképpen meg lehet közelíteni. Az én megközelitésem, olyan monoblock fegyvercső, aminek az alapanyaga nagy szilárdságú acél.

A monoblock konstrukciónál maradva, érdemes további nagy szilárdságú acélokat részletesen megvizsgálni fegyvercső alapanyagként, a lehető legtöbb tulajdonságuk figyelembevételével. A fegyvercső szilárdságtani méretezéséhez írt program kibővíthető, további tényezőkkel, például a csövek melegeedéséből adódó feszültségekkel, és további feszültség elméletek szerint is elvégezhetők a számítások.

A témában a legnagyobb továbblépési lehetőséget, egyéb csőkonstrukciók vizsgálatában látom. Mind autofretálással, mind több rétegből álló cső tervezésével létrehozható olyan fegyvercső, ami ellen képes állni nagy belső nyomásoknak. Ezekben az esetekben, valószínűleg felhasználható egy hagyományos fegyvercső acél alapanyagként. Egy másik konstrukciónál, a főfeszültségeket leíró egyenletek is megváltoznak, viszont a Maple-ben leprogramozott

gondolatmenet továbbra is használható. Gondolok itt az pontonként történő számítás ciklusba szervezésére, a több feszültség elmélet szerinti méretezésre, vagy az eredmények DXF-be történő kiírására.

Végül, amennyiben több konstrukció is elkészül, az eredményeket érdemben össze lehet hasonlítani, mind gazdasági mind gyártástechnológiai szempontok alapján.

6. Summary

First, I researched about the following topics to write the thesis: propellant gas pressure curve simulation, gun barrel strength requirements, gun barrel types and possible materials. I present the most popular high strength maraging steels, among the possible gun barrel materials.

Secondly, I have selected a monoblock type gun tube and compared the properties of a conventional barrel steel with a high strength maraging steel.

Furthermore, I wrote a Maple program for the determination of tube walls thickness. I used the Maple program to simulate the propellant gas pressure curve of high-pressure ammunition and calculate the minimum required outer diameter of the barrel. The calculation has made per millimetre along the axle of gun barrel. The external diameter was determined according to several failure theories and, to allows further design processes, the resulting external contours were transferred to a CAD system. I used the DXF format for simple data transfer (two-dimensional lines) between Maple and CAD systems. I measured the weights of the gun barrels in a CAD software, and compered theme to each other.

The heaviest gun barrel I got was according to TMG failure theory, weighing 354 grams. According to UST, and HMM failure theories, the barrels are significantly lighter. According to UST the barrel weighing 278 grams, to the HMM barrel weighing 278 grams.

7. Ábrajegyzék:

1. ábra: Nyomásgörbe az idő függvényében (Arzenál belsőballisztikai program)	9
2. ábra: Képernyő fotó egy IBHVG2 kódot használó belsőballisztikai programról [6]	10
3. ábra: A SIG Sauer által fejlesztett NGSW fegyver, az XM7 [18].....	12
4. ábra: A SIG Sauer újgenerációs civil lőszer, a .277 SIG Fury [18]	12
5. ábra: Feszültségeloszlás a cső falában, a vékonyfalú cső modell szerint	13
6. ábra: Feszültségeloszlás a cső falában, a vastagfalú cső modell szerint [20]	14
7. ábra: A vastagfalú cső falából kimetszett elemi íves hasáb [9].....	15
8. ábra: A UYC határfelületei síkbeli feszültségállapotban, különböző b paraméterekkel [10].....	18
9. ábra: Egy anyagból gyártott fegyvercső [15]	18
10. ábra: Többretegű vastagfalú cső [15]	19
11. ábra: Az egyrétegű vastagfalú cső falában fellépő feszültség (jobbra), a többretegű cső falában fellépő feszültség (balra) [20].....	20
12. ábra: Quasi két részes cső [15]	20
13. ábra: Túlhevült géppuska cső [22].....	21
14. ábra: Nagynyomású lőszer gáznyomásgörbéje	24
15. ábra: A kiegészített gáznyomásgörbe	25
16. ábra: Az 51CrV4 acél megeresztési diagrammja [1].....	28
17. ábra: A maraging 300 acél öregítési diagrammja [13].....	29
18. ábra: Maraging acélok ütmunkája, a hőmérséklet függvényében [1]	30
19. ábra: Átmenet a pirodinamikus és a politropikus szakaszok között	32
20. ábra: Képernyőkép, a programban eltárolt eredményekről	33
21. ábra: A szimulált gáznyomásgörbe	34
22. ábra: Az nagynyomású lőszer eredeti (piros) és korrigált (zöld) gáznyomásgörbéje	35
23. ábra: A korrigált, és átalakított gáznyomásgörbe.....	36
24. ábra: A .277 SIG Fury lőszerhez kialakítandó töltényűr 51	37
25. ábra: A programban létrehozott csőfurat függvény.....	37
26. ábra: A csőfalban ébredő axiális (zöld), radiális (kék), tangenciális (piros) főfeszültségek a külső sugár függvényében (Adott belső nyomás, külső nyomás és belső átmérő mellett).....	39
27. ábra: A TMG szerint megengedhető feszültség, a külső sugár függvényében	40
28. ábra: A fegyvercső külső kontúrja, a TMG (kék), HMH (fekete), és UST (zöld) feszültség elméletek szerint	41
29. ábra: Fegyvercsővek falvastagsága, a töltényűr közelében	41
30. ábra: A cső külső átmérője a csőszájánál	42
31. ábra: Korrigált fegyvercső kontúr	42
32. ábra: Vonalak sorszáma (zölddel), kezdő és végpontjai (pirossal), egy DXF fájl belső struktúrájában	44
33. ábra: A HMH-szerinti külső csőkontúr, CAD rendszerben megnyitva	44
34. ábra: A TMG szerint tervezett cső külső kontúrjából készített forgásfelület	45
35. ábra: HMH szerint méretezett fegyvercső CAD modellje.....	45

8. Irodalomjegyzék

- [1] Tierney, John, és mutsat.: Optimal Design of Cylindrical Steel/Composite Hybrid Structures for Gun Barrel Applications. In: Proceedings of the International SAMPE Symposium and Exhibition (SAMPE 05: New Horizons for Materials and Processing Technologies). 2005. p. 3267-3281.
- [2] Balestrieri, S.: Next Generation Squad Weapon (NGSW): The US Army's New Super Rifle? <https://www.19fortyfive.com/2022/01/next-generation-squad-weapon-ngsw-the-usarmys-new-super-rifle/> (2023.10.15)
- [3] Beckstrand, T.: .277 SIG Fury Cartridge: Everything You Need to Know. <https://www.gunsandammo.com/editorial/277-sig-furycartridge/457153> (2023.10.15)
- [4] SAAMI New Cartridge & Chamber. <https://saami.org/wp-content/uploads/2020/11/277-Sig-Public-Introduction-Orig-2020-11-11.pdf> (2023.10.10)
- [5] Vozsech István: Ballisztika. Kecskemét, 2022.
- [6] Miner, Robert: Computational interior ballistics modeling. University of New Mexico, 2008
- [7] Carlucci, Donald E.: Ballistics theory and design of guns and ammunition. CRC press, 2007.
- [8] Laczik Bálint: Fejezetek a lőfegyverek gyártástechnológiájából, Kecskemét, 2022.
- [9] Muttnyánszky Á.: Szilárdságtan, Műszaki kiadó, Budapest, 1981
- [10] Yu, Mao-Hong, and Shu-Qi Yu: Introduction to Unified Strength Theory. CRC Press, 2019.
- [11] Dr. Kovács Zsolt: Lőfegyver fődarabok gyártása, Kecskemét, 2022
- [12] Fonseca, Daniela Passarelo Moura da, et al. "A short review on ultra-high-strength maraging steels and future perspectives." Materials Research 24 (2021).
- [13] BÖHRER, W720. https://www.boehler.hu/app/uploads/sites/92/2023/10/productdb/api/w720-vmr_hu.pdf (2023.11.03)
- [14] Saarlöhl - 51CrV4 (50CrV4). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKE-wiH6veU9sGCAxVs0wIHHWROCsQFnoEC-BYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.saarl%C3%B6hl.com%2Fsaag%2Fdownloads%2Fdownload%2F11561&usg=AOvVaw2eWSD2_-fuEQXOUeKJJAlj&opi=89978449 (2023.10.30)
- [15] ENGINEERING DESIGN HANDBOOK, GUN SERIES, GUN TUBES, U.S. Army Material Command, AD830297, 1971.
- [16] Heck, André, and Wolfram Koepf.: Introduction to MAPLE. Vol. 1993. New York: Springer-Verlag, 1993.
- [17] LAWRENCE, Benjamin. THE EVOLUTION OF UNITED STATES MILITARY FIREPOWER. Bachelor of Integrated Studies Degree, Murray State University, 2022.
- [18] SIG Sauer honlap. <https://www.sigsauer.com/> (2023.11.01)
- [19] Dr. Legeza L. és mtsai.: Mechanika II. Szilárdságtan, 2014

- [20] G. Backstein és mtsai.: Handbook on weaponry, Rheinmetall GmbH, Düsseldorf, 1982.
- [21] TIMOSHENKO, Stephen: History of strength of materials: with a brief account of the history of theory of elasticity and theory of structures. Courier Corporation, 1983.
- [22] Linkedin. https://www.linkedin.com/posts/yuriy-terentyev-4749aa6_somewhere-close-to-bakhmut-this-is-how-an-activity-7034207780378935296-xSK3/ (2023.10.10)
- [23] Bargek HJ, Schulze G. Werkstoffkunde. Hannover: Hermann Schroedel Verlag KG; 1978. p. 131-3.
- [24] Ovako, steel navigator, [32CrMoV12-10. https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/32crmov12-10/](https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/32crmov12-10/) (2023.10.29)
- [25] Decker RF, Eash JT, Goldman AJ. 18% nickel maraging steel. Trans ASM. 1962; 55:58-76.
- [26] NATIONAL MATERIALS ADVISORY BOARD (NAS-NAE) WASHINGTON DC. Advanced Technology for Naval Gun Tubes. 1971.
- [27] AUSA special steels, 50CrV4. <https://www.ausasteel.com/fichas/Spring-Steel-51CrV4-AUSA.pdf> (2023.11.12)
- [28] Aubert and Duval, Steel MY19 (X 2NiCoMo18-9-5). https://www.aubertduval.com/wp-media/uploads/sites/2/2017/06/MY19_GB.pdf (2023.11.15)
- [29] 18% NI MARAGING STEELS – ENGINEERING PROPERTIES. https://nickelinstitute.org/media/8d91ba692f1fdc8/ni_inco_4419_18_nickelmaringsteel_engineeringproperties.pdf (2023.11.01)
- [30] Das, Prasanta Kumar, Lalit Pratim Das, and Dev Pratim Das: Science and Engineering of Small Arms. CRC Press, 2021.