



**A statikus alakítási öregedés kinetikai vizsgálata
nagy karbontartalmú acélhuzalok esetén és a
jelenség hatása a belőlük készült
sodratok mechanikai tulajdonságaira**

TÉZISFÜZET

Készítette:

Mező Tamás Bálint

okleveles fizikus és gépészmérnök

Tudományos vezető:

Dr. Barkóczy Péter

2025

Miskolc

1. BEVEZETÉS

Doktori értekezésem témája a nagy szilárdságú acélhuzalok és sodrataik statikus alakítási öregedése. Az statikus alakítási öregedés jellemzően a ferrites acélokban, azok képlékeny alakítását követően zajlik le, a szokásos hőkezelési hőmérsékleteknél lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten. A folyamat a szilárdság növekedésével, valamint a szívósság csökkenésével jár. Értekezésemben e jelenség hatását és hőmérsékletfüggő kinetikáját vizsgálom nagy-, eutektoidos-közei karbon tartalmú, hideg húzással jelentős mértékben alakított, nagy szilárdságú, finom acélhuzalok és belőlük sodrott pászmák esetén. Ezek a szálak, felhasználásukat tekintve elsősorban nagynyomású gumitömlők fő erősítő anyagaként jelennek meg, tipikusan olajipari felhasználásokban, ahol nem ritka az extrém 2–3000 bar belső nyomás [1-3].



1. ábra Acélsodrony erősítésű olajipari termelő tömlő felépítése [1]

A statikus alakítási öregedés a szilárdság fokozását célzó nagyarányú képlékeny alakítást követően, jelentős hatást gyakorol az anyag főbb mechanikai jellemzőire, különösen nagy mértékben a plasztikus nyúlási képességre. A folyamat egzakt mikroszerkezeti magyarázata és pontos lefolyása a releváns, 100–200 °C hőmérséklet-tartományban máig nem tisztázott, nyitott anyagtudományi kérdés. Az, hogy az acélhuzalok alakítási öregedése miként befolyásolja a belőlük készült sodronyok tulajdonságait, szintén fontos és a mai napig kielégítő mélységben nem kutatott terület.

Doktori értekezésemben bemutatott eredményeim, azon túl, hogy számottevő mértékben bővítik a tématerület tudományos ismereteit, jelentősen hozzájárulnak a nagynyomású olajipari tömlők műszaki felhasználási területén végzett szilárdságtani számításokhoz, a jelenség pontos termokinetikai leírása, illetve a főbb anyagparaméterek öregedés hatására történő megváltozásának számszerű meghatározása által.

2. CÉLKITŰZÉS, NYITOTT TUDOMÁNYOS KÉRDÉSEK

Kutatási munkám általános céljaként a statikus alakítási öregedés hatásának pontos feltérképezését tűztem ki nagy karbontartalmú, hidegen húzott, nagy szilárdságú acélhuzalok és belőlük sodrott pászmák esetén, a szálak mechanikai tulajdonságaira való tekintettel, alacsony, 80-200 °C hőmérséklet-tartományban. A szakirodalom alapján a folyamat telítési jellege jósolható, így célom volt e telítéshez szükséges kezelési időtartam hosszát is megállapítani különböző hőmérsékletek esetén. Célom a szakirodalomban a jelenség leírására általánosságban használt kinetikai modellek illesztése saját mérési eredményeimhez és ezek alkalmasságának kritikai értékelése.

Az acél alaphuzalokra vonatkozóan az alábbi nyitott tudományos kérdések megválaszolását tűztem ki célul:

- 1) *Mennyi idő szükséges a folyamat várható telítődéséhez az alkalmazás szempontjából kitüntetett 150°C körüli hőmérséklet-tartományban?*
- 2) *Milyen mértékben változnak meg a teljesen lejátszódó folyamat során az alapanyag szilárdsági és deformációs jellemzői?*
- 3) *Megállapítható-e a mechanikai paraméterek közvetlen mérésén keresztül a folyamatot leíró pontos kinetikai összefüggés?*
- 4) *Melyik kinetikai elmélet alkalmazható legnagyobb pontossággal a folyamat leírására a vizsgált 80-200°C hőmérséklet-tartományban?*
- 5) *Mi a megfelelő kinetikai leírás matematikai alakja és mik a jellemző modell paraméterek pontos értékei?*

A szakirodalom meglehetősen szegény az acélhuzalokból készült sodratok alakítási öregedésének témáját illetően, ezért célul tűztem ki a huzalokra vonatkozó kutatásaim

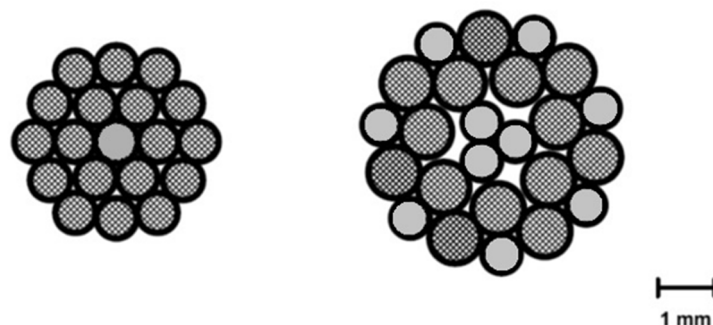
kiegészítését a belőlük készült pászmák vizsgálatával. Célom az alábbi nyitott tudományos kérdések megválaszolása volt:

- 1) *Az elemi huzalszálak alakítási öregedése szignifikáns hatással van-e a sodratok végső mechanikai tulajdonságaira?*
- 2) *Az elemi huzalok ismert megváltozása, valamint a sodrási paraméterek ismeretében lehet-e következtetni a kész sodrony öregedés hatására bekövetkező viselkedésére?*
- 3) *Mennyire jelentős a szerkezet szerepe a sodrony öregedés által befolyásolt fizikai paramétereire?*

3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Kísérleti munkám során nagymértékű hidegalakításon átesett, nagy karbontartalmú C80D-C86D, nagy szilárdságú acélhuzalokat és a belőlük készült sodratokat vizsgáltam. A vizsgált acélhuzalok átmérője a 0,68–0,91 mm tartományba esik. A hideg húzási folyamat során 86–92%-os fajlagos keresztmetszeti redukció történik, közbeiktatott újrakristályosítási fázis nélkül, melynek révén kialakul az acélhuzalok finom lemezes perlites szerkezete és a kívánt nagy szilárdság. A huzalok névleges R_{p02} egyezményes folyáshatára 1760–1960 N/mm².

Az acélsodronyok vizsgálata során két jelentősen eltérő vonalérintkezésű acélsodronyfélét választottam a 3,6–4,5 mm átmérő tartományból. A Ø3.6C jelű egyszerű szerkezetű, maghuzalból és azonos huzalszálakból álló két koszorúból felépülő, úgynevezett kompakt sodrony. A bonyolultabb felépítésű Ø4.5W jelű egy Warrington típusú sodrony. Itt a mag három finom acélhuzal sodrásával készül, mely köré szintén két koszorút vezetnek fel olyan módon, hogy a külső koszorú esetén a nagyobb keresztmetszeti kitöltés – és ennek megfelelő nagyobb elméleti szilárdság – érdekében eltérő átmérőjű huzalokat alkalmaznak [4].



2. ábra Ø3.6C (bal) és Ø4.5W (jobb) acélsodronyok keresztmetszetének szerkezeti vázlata

A hőöregítéseket előmelegített, spirális légkeverést alkalmazó szárítószekrényben végeztem 80 °C, 100 °C, 125 °C, 150 °C, 180 °C és 200 °C hőmérséklet szinteken. A finom acélhuzal minták esetén minden hőmérsékleti szinten legalább hat különböző kezelési időt alkalmaztam 3 perc és 41 nap közötti tartományban. Az acélsodronyok esetén egységesen 150 °C hőmérsékletű, 45 perces hőöregítést alkalmaztam nagy elemszámú mintán.

A terhelő erő - nyúlás diagramokat szobahőmérsékleten végzett szakítóvizsgálatok segítségével határoztam meg.

A szakítódiagramok alapján az ε teljes fajlagos szakadási nyúlást és ennek ε_p tisztán plasztikus komponensét, továbbá huzalok esetén az R_m szakítószilárdság és R_{p02} egyezményes folyáshatári feszültség, sodronyok esetén pedig az F_{max} maximális terhelő erőt, az F_{p02} egyezményes folyáshatári erőt és az E_a látszólagos rugalmassági moduluszt értékeltem ki.

Az acélhuzalok vizsgálata során az eredmények kinetikai elemzését a Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov-féle, az Austin-Rickett-féle, illetve a Fick törvényből levezethető, tisztán háromdimenziós diffúziós kinetika egy általánosított modelljének alkalmazásával végeztem [5-9]. A hőmérsékletfüggést minden esetben az Arrhenius összefüggés szerint vettem figyelembe.

Az acélsodronyok vizsgálata során a jelenség hatásának pontos meghatározása érdekében nagy elemszámú mintát vizsgáltam összesen több mint 770 szakítóvizsgálat elvégzésével.

4. KUTATÁSI EREDMÉNYEK

4.1. Az alakítási öregedés időbeli lefutása és telítődési jellege

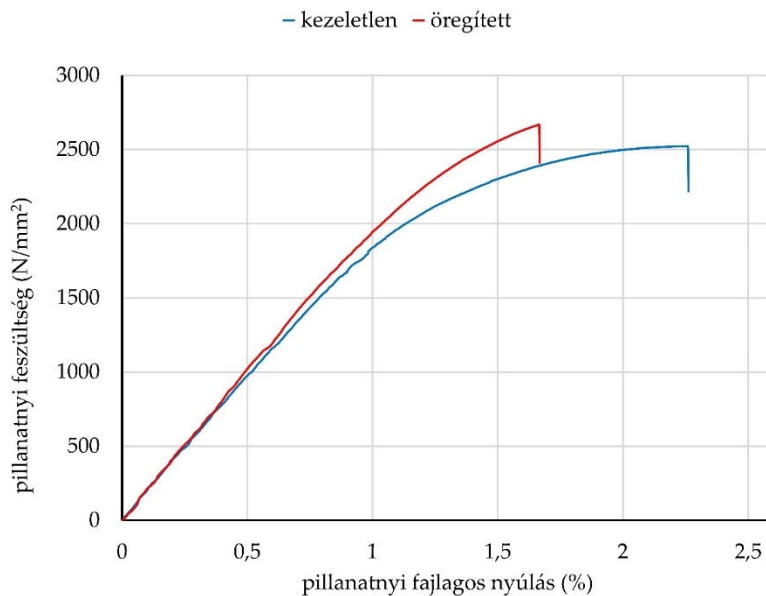
A Ø0,71 acélhuzal egyezményes folyáshatárát, szakítószilárdságát, szakadási nyúlását és annak tisztán plasztikus részét kísérletileg meghatároztam kezeletlen, illetve különböző hőmérsékletű izotermikus hőöregítésen átesett mintákon, különböző kezelési idők mellett. Az alkalmazott öregítési hőmérsékletek a 80–200 °C tartományban voltak.

A szilárdsági jellemzők értékeinek szignifikáns és döntően monoton növekedését, a nyúlási jellemzők értékeinek szintén szignifikáns monoton csökkenését figyelhetjük meg a kezelési idő növekedésével minden kezelési hőmérsékleten. A változás sebessége minden

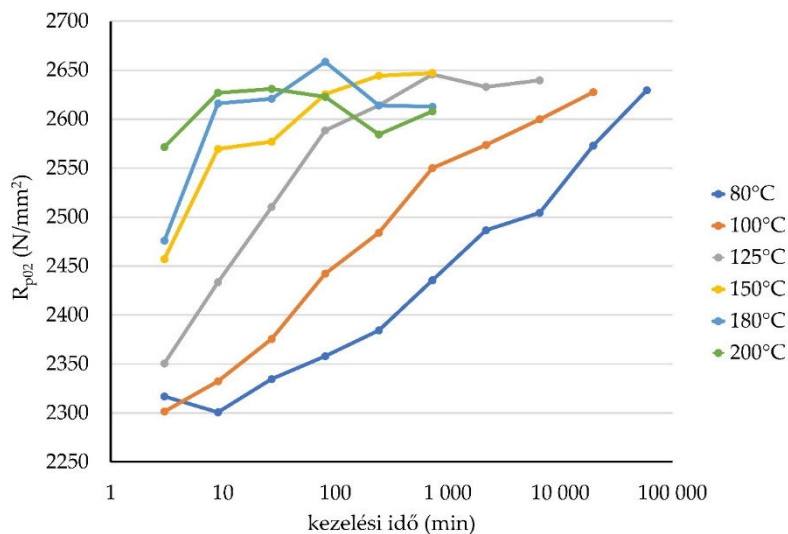
esetben határozottan nagyobb a magasabb hőmérsékletek esetén. A trend egyértelmű telítési jelleget mutat a 100 °C-nál magasabb hőmérsékletek esetén.

Kiemelem, hogy az alkalmazások szempontjából különleges figyelmet érdemlő 150 °C hőmérsékleten ez megközelítőleg 45 perc hőkezelés hatására lejátszódik. Ez után további hőöregítés hatására további változás nem figyelhető meg.

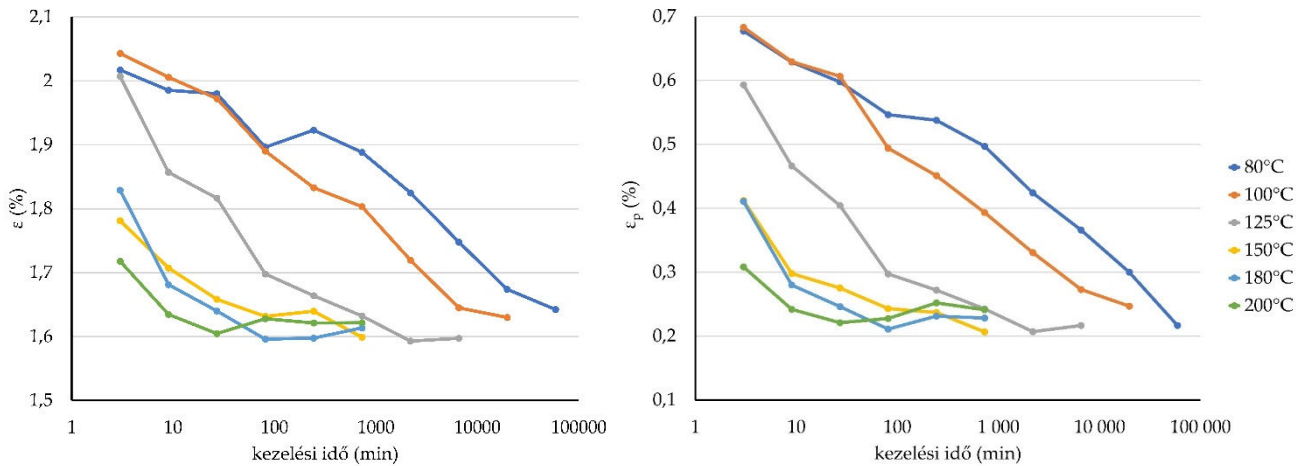
Elmondhatjuk, hogy a statikus alakítási öregedés hatása leginkább szembetűnő módon a szakadási nyúlás plasztikus komponensének drasztikus megváltozásában érhető tetten.



3. ábra Szakítódiaagram pár öregítés előtt, ill. öregítés után (Ø0,71 acélhuzal, 150 °C/45 min)



4. ábra Az egyezményes folyáshatári feszültség a kezelési idő függvényében (Ø0,71 acélhuzal, 80–200 °C)



5. ábra A fajlagos szakadási nyúlás (bal) és annak tisztán plastikus része (jobb) a kezelési idő függvényében ($\varnothing 0,71$ acélhuzal, 80–200 °C)

4.2. A statikus alakítási öregedés evolúciójának vizsgálata különböző kinetikai modellek alkalmazásával

A méréseimből nyert adatok alapján az alábbi kinetikai modellek segítségével vizsgáltam a statikus alakítási öregedés idő- és hőmérsékletfüggését. Az analízist minden esetben egyezményes folyáshatár adathalmazán végeztem el és az F „átalakult hányad” fogalmát az alábbi összefüggéssel értelmeztem:

$$F = \frac{R_{p02}^t - R_{p02}^0}{R_{p02}^{max} - R_{p02}^0} \quad (1)$$

Ahol R_{p02}^t az egyezményes folyáshatári feszültség t idejű előzetes hőkezelés után, R_{p02}^0 a kezdeti érték, illetve R_{p02}^{max} a paraméter maximális értéke [10].

Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK)modell: $F = 1 - \exp[-(Bt)^n]$ (2)

Austin-Rickett (AR) modell: $F = 1 - [(Bt)^n + 1]^{-1}$ (3)

Általánosított 3D diffúziós modell: $F = 1 - [1 - (Bt)^n]^3$ (4)

Ahol n az empirikus hatványfaktor, B a hőmérsékletfüggő sebességi állandó [5-9, 11-12].

A fenti összefüggéseken a megfelelő transzformációkat elvégezve, felvettem a JMAK, AR és a diffúziós görbéket. Ezeken lineáris regressziót végeztem és a releváns modell paramétereit az illesztett egyenesek tengelymetszeteiből számítottam. A tárgyalt különböző

modellek jóságának összehasonlítását ilyen módon a regresszió értékelésére használt Pearson-féle korrelációs együtthatók összevetésével elvégezhettem.

1. táblázat A különböző kinetikai modellek esetén az egyes hőöregítési hőmérséklet szintekhez tartozó mérési eredmények lineáris regressziójának R^2 Pearson-féle korrelációs együttható négyzetei ($\emptyset 0,71$ acélhuzal)

T (°C)	80	100	125	150	180	200
R^2 (3D diffúziós)	0,989	0,917	0,803	0,870	0,856	0,812
R^2 (JMAK)	0,991	0,942	0,837	0,910	0,742	0,819
R^2 (Austin-Rickett)	0,965	0,985	0,886	0,959	0,924	0,832

Mindegyik kinetikai egyenletben szerepel az n empirikus hatványfaktor, ami egy, a hőmérséklettől elvileg független állandó. Az egyes kinetikai modellek alkalmasságát a fentiekben túlmenően értékeltem abból a szempontból is, hogy ez a kritérium milyen mértékben teljesül. Ehhez meghatároztam az egyes kezelési hőmérséklet szintekhez tartozó n empirikus hatványfaktorok értékeinek $RSD(n)$ fajlagos standard deviációját, az $\bar{n}$ átlagértéktől való eltérés mértékeként. Ezt az értéket is a kinetikai modellek helyességének megítélésére használom. A modell a statikus alakítási öregeedés leírására elméletileg annál inkább alkalmas, minél kisebb ez az $RSD(n)$ érték.

2. táblázat A különböző kinetikai modellek esetén az empirikus hatványfaktorok $\bar{n}$ átlagértékei és $RSD(n)$ relatív standard deviációjuk ($\emptyset 0,71$ acélhuzal)

	$\bar{n}$	$RSD(n)$
3D diffúziós	0,267	22,4%
JMAK	0,343	13,5%
Austin-Rickett	0,605	8,2%

A fentiek alapján megállapítható, hogy a mérési eredményimre a vizsgált modellek közül az Austin-Rickett féle illeszthető legnagyobb pontossággal. Ennél kisebb, de még elfogadható pontossággal illeszkedik a Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov modell, azonban az általánosított 3D diffúziós kinetikai egyenlet egyértelműen alkalmatlan a statikus alakítási öregeedés leírására [13]. Ennek főként elméleti magyarázata, az, hogy a statikus alakítási öregeedés időbeli evolúcióját uralkodó mértékben nem a karbon atomok diffúziója határozza meg, hanem a Cottrell-felhő felépülésének kinetikája, ami alapvetően egy növekedési folyamat. Ezt a növekedési folyamatot befolyásolja másodlagos mértékben a diffúziós transzport, ami magyarázza az AR modell nagyobb pontosságát a JMAK modellel összehasonlítva.

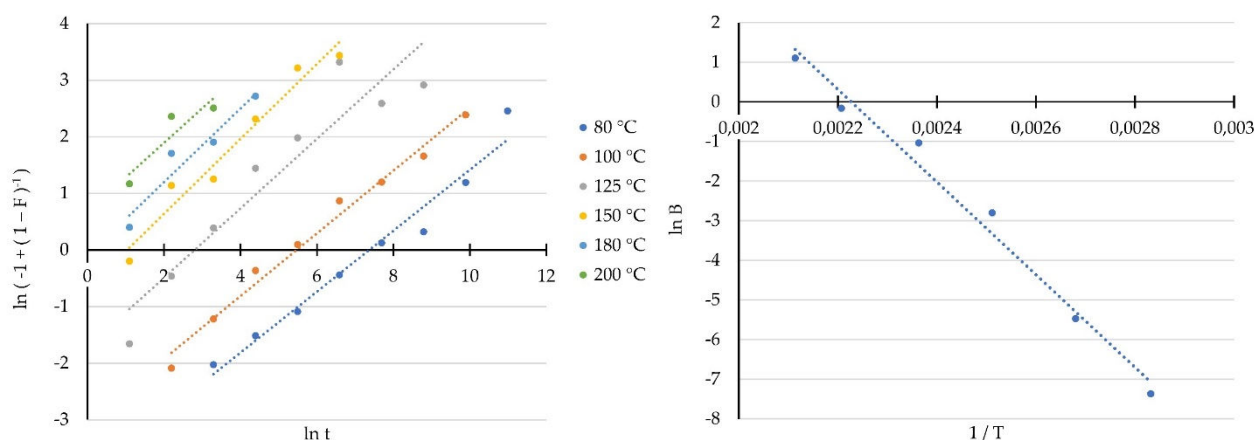
Az alakítási öregedés kinetikájának hőmérséklet függésének jellemzésére az alábbi Arrhenius egyenletet használom:

$$B = B_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

ahol, T az abszolút hőmérséklet, R az univerzális gázállandó, E_a az apparens aktivációs energia, B a hőmérsékletfüggő sebességi állandó és B_0 az úgynevezett pre-exponenciális faktor. A kinetikai egyenletek paramétereit a fenti egyenlet alapján újabb lineáris regressziót követően határoztam meg. A látszólagos aktivációs energia - csakúgy mint a korábban látott Avrami kitevő jó egyezést mutat más szerzők által, hasonló alapanyagok esetén publikált értékekkel [14–16].

3. táblázat A JMAK átlagos empirikus hatványfaktor, a látszólagos aktivációs energia, a pre-exponenciális faktor és a korrelációs együttható négyzete ($\varnothing 0,71$ acélhuzal, 80–200 °C)

	E_a (kJ/mol)	B_0 (1/s)	R^2
AR	97,1	$3,348 \cdot 10^9$	0,983
JMAK	105,4	$1,265 \cdot 10^{10}$	0,984



6. ábra Az egyezményes folyáshatári feszültség Austin-Rickett görbéi (bal) és az Arrhenius diagram (jobb) ($\varnothing 0,71$ acélhuzal, 80–200 °C)

4.3. A fizikai paraméterek változásának kvantitatív meghatározása nagy elemszámú kompakt sodronyminta vizsgálatával

Az elemi acélhuzalok alakítási öregedésének sodrony paramétereiket befolyásoló hatását sikeresen határoztam meg kísérletileg. Statisztikai szempontból megalapozott, számszerű eredményeket közöltem, melyek mérnöki számításokhoz is közvetlenül felhasználhatók.

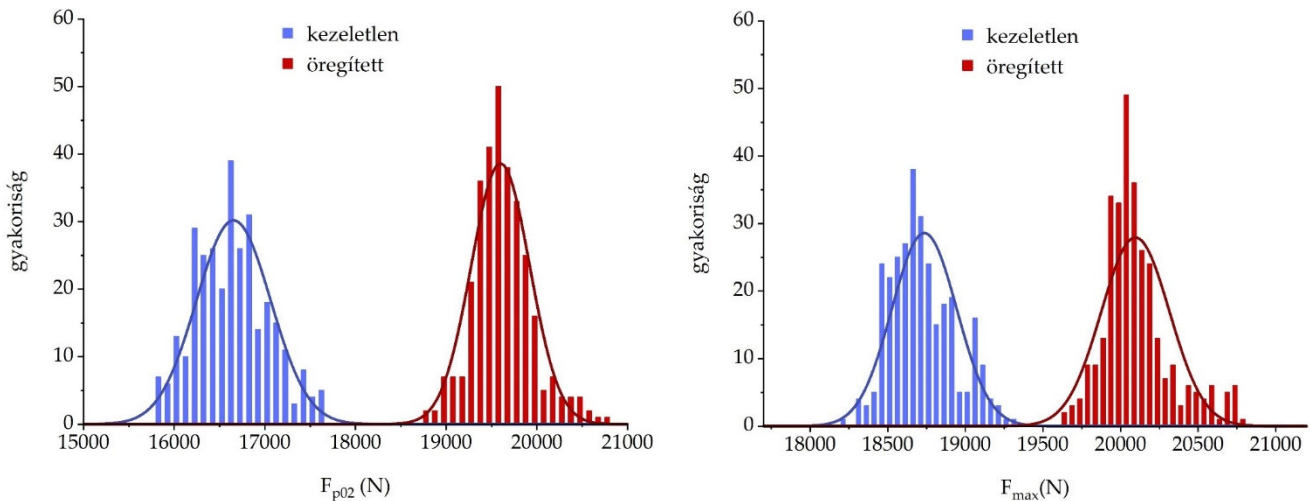
Méréseimet nagy, több mint 600 elemű mintán végzem és modellanyagként a Ø3.6C kompakt sodronyt választottam. Korábban igazoltam, hogy a gumitömlőben való kiemelt fontosságú alkalmazás szempontjából kitüntetett 150 °C hőmérsékleten 45 perc hőöregítés során a jelenség az alapanyagban telítésbe megy, ezért ezt a kezelési programot használtam minden esetben [1-2].

4. táblázat A Ø3.6C sodrony szilárdsági és nyúlási jellemzői kezeletlen és hőöregített állapotban

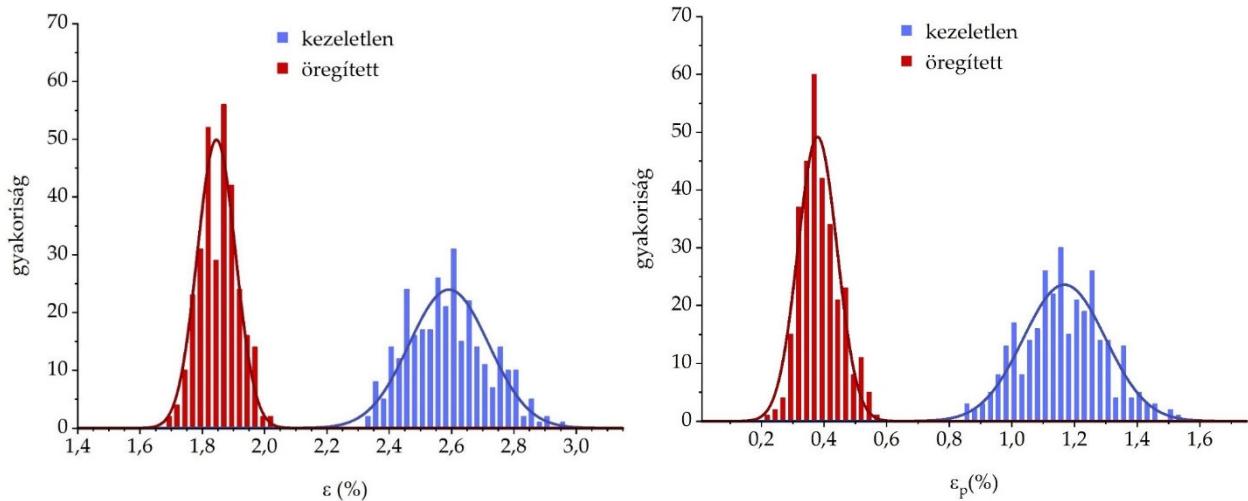
		kezeletlen	hőöregített*
F_{p02} (N)	átlag	16655	19598
	SD	409	209
F_{max} (N)	átlag	18735	20095
	SD	323	220
ε (%)	átlag	2,591	1,845
	SD	0,128	0,061
ε_p (%)	átlag	1,168	0,379
	SD	0,131	0,063

* 150 °C/45 min

Megállapítottam, hogy az egyszerű szerkezetű kompakt sodronyon végzett mérések eredményei, a szilárdsági paraméterek tekintetében valóban az alapanyag statikus alakítási öregedésével vannak közvetlen kapcsolatban.



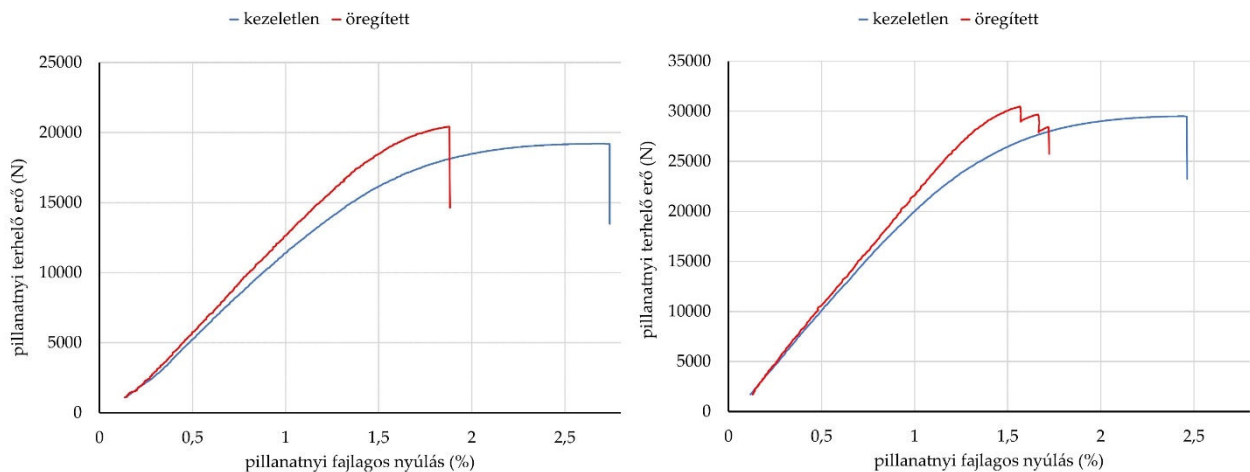
7. ábra Az egyezményes folyáshatárhoz tartozó erő (bal) és a maximális erő (jobb) hisztogramjai kezeletlen, ill. öregített esetben (Ø3.6C acélsodrony, 150 °C/45 min, $N=2 \times 313$)



8. ábra A fajlagos szakadási nyúlás (bal) és annak plastikus részének (jobb) hisztogramjai kezeletlen, ill. öregített esetben (Ø3.6C acélsodrony, 150 °C/45 min, $N=2 \times 313$)

4.4. Sodronyok abnormális lépcsős szakadása és ennek fenomenológiai értelmezése

Amíg a Ø3.6C jelű kompakt sodrony esetén a szakítódigramok szabályosak és jellegük összhangban van a sodronyt felépítő elemi acélhuzalok elméletnek megfelelő alakítási öregedése miatt vártakkal, a hőöregített Ø4.5W Warrington sodronyminták szakítódigramjai esetén szabálytalan, lépcsős tönkremenetelt fedeztem fel.



9. ábra A Ø3.6C sodrony szabályos (bal) és a Ø4.5W sodrony szabálytalan (jobb) szakítódigram párpai öregítés előtt, ill. öregítés után (150 °C/45 min)

Ez azt jelzi, hogy a kezdetben egyensúlyban lévő sodronyszerkezet ellenére, az öregedés után bizonyos elemi szálak már az elméleti maximális terhelést megelőzően elszakadnak. Ennek oka a sodronyt alkotó különböző keresztmetszetű – és ennek okán eltérő képlékenyalakítási

előtörténettel rendelkező acélhuzal szálak eltérő alakítási öregedésében rejlik. Ennek pontos mechanizmusát saját mérési eredményeimre támaszkodva sikerrel leírtam [17].

Az elméleti maximális nyúlásnál jelentősen alacsonyabb száldeformációknál fellépő szabálytalan tönkremenetel a Warrington pászmák esetén, súlyos gyakorlati következményekkel járhat, ha nincs kellően figyelembe véve a szilárdsági méretezés és konstrukciós tervezés során. Ennek oka az, hogy a fejlett tervezési eljárások nagy mértékben kihasználják az erősítő szálak szilárdsága mellett azok plasztikus deformációs képességet is [1,18-19]. Bár jelentős tudományos kutatások folynak az alakítási öregedésre kevésbé érzékeny anyagok, illetve erre optimalizált alakítási technológiák területén, eredményeik még messze vannak a gyakorlati alkalmazhatóságtól [20-22]. Ezért a kockázat kezelésére a szilárdsági szempontból kritikus – sok erősítőbetéttel rendelkező – tömlők tervezése során javaslok a kompakt típusú sodronyok előnyben részesítését, illetve amennyiben Warrington típusú sodrat kerül felhasználásra, javaslok a szerkezet szilárdsági ellenőrzését a statikus alakítási öregedés figyelembevételével.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatási munkám során nagy karbontartalmú hidegen húzott finom acélhuzalok és sodrataik statikus alakítási öregedését és annak hatását vizsgáltam különös tekintettel a szálak mechanikai paramétereire. A jelenséget a műszaki alkalmazások szempontjából is kitüntetett 80 °C és 200 °C közötti hőmérséklet-tartományban tanulmányoztam.

Acélhuzalok esetén meghatároztam az öregedési folyamat lefolyása során a legfontosabb szilárdsági és deformációs anyagjellemzők időbeli megváltozását a kezelési hőmérséklet függvényében. Sikeresen igazoltam a folyamat telítődési jellegét és megállapítottam az ehhez szükséges hőöregítési időtartamot.

Mérési eredményeim kiértékelését elvégeztem három különböző kinetikai elmélet alkalmazásával. Ennek eredményeképp a vizsgált alapanyag esetén meghatároztam az öregedéshez tartozó aktivációs energiát és a jellemző sebességi paramétereket. Pontosság és alkalmazhatóság szempontjából értékeltem és egymással összehasonlítottam a Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov-féle, az Austin-Rickett-féle, illetve az általánosított háromdimenziós tisztán diffúziós kinetikai modelleket.

A vizsgált eutektoidos-közeli karbon tartalmú, nagymértékben redukált acélhuzalok esetén a statikus alakítási öregedés leírására az Austin-Rickett kinetikai modellt találtam megfelelőnek a vizsgált hőmérséklet-tartományban. Meghatároztam az ehhez tartozó kinetikai egyenletet, szilárdsági számításokhoz közvetlenül alkalmazható formában.

A szóban forgó nagy szilárdságú vékony acélhuzalok a gyakorlatban szinte kizárólag pászmává sodorva kerülnek alkalmazásra, ezért sodronyszerkezetek esetén is tanulmányoztam az öregedés hatását. Megállapítottam, hogy az elemi huzalszálakban lejátszódó alakítási öregedés szignifikáns hatással van a sodronyok mechanikai tulajdonságaira.

Nagy elemszámú sodratminta vizsgálatával meghatároztam a folyáshatári erő, a szakítóerő, a teljes-, illetve a tisztán plasztikus megnyúlás, valamint a látszólagos rugalmassági modulus számszerű értékeinek – a folyamat telítődéséig bekövetkező – teljes megváltozását. Megállapítottam, hogy az elemi huzalok ismert megváltozása, valamint a sodrási paraméterek ismeretében a sodronyok alakítási öregedés hatására megváltozó mechanikai paramétereire lehet következtetni.

Kompakt- és Warrington szerkezetű pászmák összehasonlító vizsgálatával kimutattam, hogy az alapanyag öregedésének hatásán túl, a sodrat szerkezetének is jelentős szerepe van a sodronyok alakítási öregedésére.

A Warrington típusú acélsodronyok esetén megfigyeltem egy, a statikus alakítási öregedés hatására jelentkező rendellenes tönkremeneteli módot. A széles körű, és szilárdsági szempontból sokszor kritikus alkalmazások miatt ez, a vártnál alacsonyabb terhelések esetén bekövetkező szabálytalan tönkremenetel nagy jelentőséggel bír. Korábbi eredményeim felhasználásával, sikeresen értelmeztem a jelenség mechanizmusát és mutattam rá annak kiváltó okaira. A műszaki gyakorlat számára javaslatot fogalmaztam meg a tönkremenetel és káros következményeinek lehetséges elkerülésére.

Tudományos kutatási munkám jelentősen hozzájárult az ötvözetlen acélok statikus alakítási öregedésének megismeréséhez egy fontos alapanyag átfogó vizsgálatával, mely a jelenség szempontjából kifejezetten érdekes a rendkívül nagymértékű, hideg, képlékeny alakítás révén. Emellett eredményeim a műszaki gyakorlat számára közvetlenül hasznosítható, új összefüggésekkel és adatokkal szolgáltak.

6. SUMMARY

In my research study the static strain aging of cold drawn, high-carbon steel, fine wires and their cords has been investigated, with special focus on its impact on the mechanical characteristics of these filaments. I have examined the phenomenon in the temperature range between 80 °C and 200 °C, which is of special importance for technical applications.

In the case of steel wires, I have determined the temperature dependent evolution of strength and deformation material parameters as the aging progresses. I have successfully proven the saturation character of the process and defined the time it needs to conclude.

I have evaluated my experimental results by applying three different kinetic theories and determined the related activation energy values as well as the pre-exponential constants. I have compared the performance and the accuracy of the Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov, the Austin-Rickett and the generalized 3-dimensional diffusion models.

For the static strain aging of the examined heavily reduced, near-eutectoid carbon steel wires, I have found the Austin-Rickett kinetic model to be the most appropriate in the given temperature range. I have defined the related equation in a form that is directly applicable to strength calculations.

The mentioned fine, high-tensile steel wires are most commonly used in a form of stranded cords in practice. Thus, I have also investigated the impact of strain aging on steel cords. I have found that the strain aging process of the base wires has significant effect on the mechanical characteristics of the cords.

I have determined the numerical values of the change in the force at yield, breaking force, total elongation, plastic elongation and the apparent elastic modulus caused by the aging process until the complete saturation, by experimental investigation of a large number of steel cord samples. I have verified that from the known change of the wire quality and from the stranding parameters the strain aging induced variation of the mechanical properties of the steel cords can be derived.

By studying compact-type and Warrington-type strands in a comparative way, I have proven that beyond the aging of the base material, the structure also has a significant role in the static strain aging of the cords.

In the case of Warrington-type steel cords I have observed an irregular failure mode caused by the strain aging effect. This special failure pattern that takes place in loading conditions much below the expected material performance limit, is of high importance, especially in the usual case of some highly critical applications. Based on my own results I have successfully interpreted the mechanism of the failure and identified its root cause. I have proposed options for the technical practice, to avoid the failure and its negative effects.

My scientific research study has significantly contributed to the knowledge and understanding of the static strain aging phenomenon of non-alloyed steels, by the comprehensive investigation of an important material family, which is especially relevant due to the extremely high level of plastic cold forming. Moreover, my results have provided the technical and industrial practice with directly applicable equations and data.

7. AZ EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA

Doktori dolgozatomban összefoglalt eredményeim, azonnal hasznosításra kerültek nagynyomású olajipari gumitömlők tervezési eljárásaiban. Kutatási munkám eredményei alapján kijelenthető, hogy a tömlőszerkezet teljes kivulkanizálása során az acélsodronyokban teljes mértékben lejátszódik a statikus alakítási öregedés. Ennek során jelentős mértékben megváltoznak a szilárdsági és a nyúlási jellemzőik, melyek a folyamat bizonyítottan bekövetkező telítődése miatt, a tömlő további életciklusában már állandónak tekinthetők. A gyártási folyamat végére tehát, a késztermékben lévő acélsodronyok, szakítóereje, folyáshatáري ereje, szakadási nyúlása az eredeti értéküktől nagymértékben eltérnek. A felsorolt jellemzők e végső értékeit nagy pontossággal meghatároztam kutatási munkám során. Mára mind a szilárdsági számítások mind az alapanyagok minősítése az általam meghatározott, hőöregítés után mérhető értékek felhasználásával történnek.

A következő olaj-, és gázipari, nagynyomású tömlős műszaki megoldások kifejlesztése a dolgozatomban bemutatott eredmények közvetlen felhasználásával váltak lehetővé.

1) A világ első, és ez ideig egyetlen 20000 psi (1380 bar) működési nyomású elfojtó-szabályzó tömlője került kifejlesztésre 2021-ben. Ez a termék a mélytengeri fúrásoknál a kitörésgátló egységhez, annak záróelemei előtt csatlakozik. Kulcsszerepet játszik a kutak kitörésének elfojtásában és a kút azt követő stabilizációjában. Korábban a maximális

nyomásosztály hajlékony vezetékek esetén 15000 psi (1035 bar) volt. Ehhez képest óriási előrelépés az említett fejlesztés, mely 8 koncentrikus erősítőbetétet tartalmazó konstrukció megalkotásával vált valóra. Ilyen nagy számú sodronybetétet tartalmazó szerkezet szilárdsági optimalizációja korábban nem járt sikerrel. Ennek egyik oka az, hogy nem volt ismert az erősítő szál pontos, az alakítási öregedés hatására kialakuló végső nyúlási képessége [23-24].

2) Az előző esethez hasonlóan az egyes sodronyok késztermékben jelen lévő, alakítási öregedésen átesett állapotára jellemző szakadási nyúlásának pontos ismerete révén vált lehetővé a világ legnagyobb teljesítményű gumitömlőjének kifejlesztése. 2020-ban sikerült a világon először megtervezni és kvalifikálni 6” (150 mm) belső átmérőjű 15000 psi (1035 bar) működési nyomású gumitömlőt, szintén nyolc erősítő betétel. Azóta már több mint 100 db ilyen termék van használatban és elmondhatjuk, hogy a merev acélcsővek, rengeteg hegesztési munkával járó installációját kiváltva, a termék mára nagy előrelépést hozott az észak amerikai hidraulikus rétegrepesztési technológia hatékonyságában.

3) Az utóbbi években az ismert szankciós helyzet következtében hatalmas igény jelentkezett Nyugat-, és Közép Európa oroszországi forrásoktól független földgáz ellátására a legrövidebb időn belül. Ennek a problémának a megoldását jelentősen támogatta a kriogenikusan cseppfolyósított földgáz LNG szállító hajókról a szárazföldi gázhálózatba juttató, nagy átmérőjű, nagynyomású tömlők gyors megtervezése, validációja, gyártása és leszállítása. A nagy nyomású, és nagy hőmérsékletű földgáz közeg miatt, ez csak az API 17K szabvány, a kihasználtsági tényezők szempontjából rendkívül szigorú előírásainak betartásával volt lehetséges. A tervezés és a validáció során felhasználtuk az erősítő sodronyoknál az alakítási öregedés hatására jelentkező – kutatási munkám során igazolt és a tanúsító intézetek által is addigra elfogadott –, többlet teherviselő képességet.

Ebben a fejezetben bemutatott mindhárom műszaki fejlesztés a Continental AG, nagynyomású tömlő divíziójának kutatásfejlesztési osztályán történt, a személyes vezetői és szakmai irányításom mellett.

A fenti példák alapján elmondható, hogy doktori témám a műszaki alkalmazások szempontjából fontos terület és az értekezésemben összefoglalt tudományos kutatási eredményeim a műszaki, ipari gyakorlatban hasznosíthatók, illetve több esetben közvetlen hasznosításukra már sor került.



10. ábra Hidraulikus rétegrepesztő tömlők működés közben, a repesztő nyomást előállító szivattyú és az olajkútfejek között beszerelve (NA150, PN=1035 bar)



11. ábra Földgáz szállító tömlők az LNG újra gázosító hajó és a kikötői gáz fogadó állomás között, felszerelés közben (NA300, PN=120 bar, 30 m, API 17K)

8. TÉZISEK

1. TÉZIS

Ötvözetlen, perlites (C80D-C86D), 86–92% mértékű redukción átesett, vékony acélhuzalokban a statikus alakítási öregedés a 125–200 °C hőmérséklet-tartományban rövid idő alatt teljes mértékben végbemegy. A jelenség teljes lefolyásához 150 °C hőmérsékleten 45 perc hőkezelési idő elegendő, a szilárdsági és deformációs paraméterekben ezt követően további jelentős változás nem történik.

Ennek során a vizsgált Ø0,71 huzal esetén a kezelési hőmérséklettől függetlenül, az egyezményes folyáshatár 2300 N/mm² értékről átlagosan 2600 N/mm²-re, a szakítószilárdság 2540 N/mm² értékről átlagosan 2660 N/mm²-re emelkedik. Eközben a plasztikus nyúlási képesség 0,7% kezdeti értékről 0,2–0,25%-ra csökken.

2. TÉZIS

a) Ötvözetlen, perlites (C80D-C86D), 86–92% mértékű redukción átesett, vékony acélhuzalokban a statikus alakítási öregedés folyamatát 125–200 °C hőmérséklet-tartományban termokinetikai szempontból a Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov és az Austin-Rickett modellek közül az Austin-Rickett féle ad pontosabb leírást, mert az a Cottrell felhő kifejlődésének folyamatán túl a karbon diffúziójának jelentős hatását is figyelembe veszi, ezért a vizsgált anyag esetén annak használata javasolt.

b) Ötvözetlen, perlites (C80D-C86D), 86–92% mértékű redukción átesett, vékony acélhuzalok statikus alakítási öregedése esetén a Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov kinetikai leírásban az empirikus hatványfaktor $n=0,343$, az apparens aktivációs energia $E_a=105,5$ kJ/mol. Az Austin-Rickett kinetikai leírásban az empirikus hatványfaktor $n=0,605$, az apparens aktivációs energia $E_a=97,1$ kJ/mol.

c) Bár a statikus alakítási öregedés mechanizmusának alapja a karbon atomok diffúziója a diszlokációk hatásövezetébe, a diffúziós kinetikai egyenletek nem írják le kielégítő pontossággal a folyamatot. Ennek oka az, hogy az alakítási öregedés kinetikáját a karbon diffúzió mellett a Cottrell felhő felépülése is lényegesen meghatározza, ami alapvetően egy növekedési folyamattal modellezhető.

3. TÉZIS

Ötvözetlen, perlites (C80D-C86D), 86–92% mértékű redukción átesett, vékony acélhuzalokból sodrott, homogén szerkezetű ún. Kompakt pászmák hőkezelése során is lejátszódik az elemi huzalokban az alakítási öregedés folyamata és szignifikáns hatása van a sodrat mechanikai tulajdonságaira.

Nagy elemszámú, Ø3.6C Kompakt acélsodronyminta vizsgálata alapján, 150 °C hőmérsékletű, 45 perces öregítés hatására a folyáshatári erő átlagosan 17,3%-kal, a maximális terhelő erő átlagosan 7%-kal emelkedik, a maximális erőhöz tartozó teljes nyúlás tisztán plasztikus része a kezdeti átlagos 1,15%-ról 0,38%-ra csökken és a rugalmassági modulus 3,58%-kal emelkedik. A mérési eredmények jó közelítéssel normális eloszlást követnek és azok szórása a szilárdsági és deformációs paraméterek esetén szignifikánsan csökken az alakítási öregedés hatására.

A Kompakt szerkezetű acélsodronyok esetén, a sodratviszony ismeretében az alakítási öregedés hatására bekövetkező változásra lehet következtetni az elemi huzalok tulajdonságainak ismert megváltozása alapján.

4. TÉZIS

A statikus alakítási öregedés hatása ötvözetlen, perlites (C80D-C86D), 86–92% mértékű redukción átesett, vékony acélhuzalokból készült sodratok esetén nagymértékben függ a sodrat szerkezetétől.

a) Azonos anyagi összetételű, de különböző vastagságú acélhuzalokból felépülő Warrington típusú sodronyok esetén az öregedés hatására kialakul egy szabálytalan, lépcsős szakadási folyamat. Ennek oka az, hogy a különböző mértékben redukált acélhuzalok alakítási öregedésének eltérő hatása miatt a sodrony szerkezeten belüli optimális tehereloszlás megbomlik és bizonyos szálak a tervezett elméleti értéknél jelentősen kisebb igénybevétel esetén is túlterhelődnek.

b) A Warrington típusú sodronyok rendellenes tönkremenetele következtében fellépő szilárdság csökkenési lépcsők nagysága származtatható a sodronyt felépítő, különböző átmérőjű alaphuzalok szilárdsági és nyúlási jellemzőinek alakítási öregedés hatására megváltozott értékei alapján.

- c) A Warrington típusú sodronyoknál látotthoz hasonló rendellenes tönkremenetel a Kompakt szerkezetű sodronyoknál nem jelentkezik. Ennek oka az, hogy a sodrat szerkezetileg homogén, közel azonos átmérőjű és képlékenyalakítási előtörténettel rendelkező szálakból épül fel, melyeknél az alakítási öregedés egyformán zajlik le, így az elemi huzalszálak sodraton belüli terhelése kiegyensúlyozott marad a teljes öregedési folyamat során.
- d) Olyan alkalmazásokban, ahol a sodratok szilárdsági kihasználtsága kritikus mértékű, Kompakt sodronyok alkalmazása javasolt. Amennyiben Warrington szerkezetű sodrat kerül felhasználásra, azok szilárdsági ellenőrzése az alakítási öregedés figyelembevételével szükséges.

9. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

1. Mezo, T.; Barkoczy, P. Study on Static Strain Aging Kinetics of High-Carbon Steel Wires and Its Impact on High-Strength Steel Cords. *Metals* 2021, 11(11), 1684.; DOI: 10.3390/MET11111684
2. Mezo, T.; Barkoczy, P. Impact of Strain Aging Kinetics on the Failure of Thin Steel Wire Ropes. *Mater. Proc.* 2021, 3(1), 10.; DOI: 10.3390/IEC2M-09249
3. Mező, T.; Barkóczy, P.; Vindics, B. Nagynyomású tömlő szerkezetek tervezési módszerének kiterjesztése az erősítő acélszálak alakítási öregedésének figyelembevételével. XXIV. Tavasz Szél Konferencia, Doktoranduszok Országos Szövetsége: Miskolc, Magyarország, 2021.05.28-30; ISBN 978-615-5586-99-6, 443.
4. Mező, T.; Barkóczy, P.; Vindics, B. A statikus alakítási öregedés hatása hidegen húzott, nagy szilárdságú szénacél huzalok és sodronyaik mechanikai tulajdonságaira. XXIV. Tavasz Szél Konferencia, Doktoranduszok Országos Szövetsége: Miskolc, Magyarország, 2021.05.28-30; ISBN 978-615-5586-99-6, 423.
5. Mező, T. Vékony acélhuzalok és acélpászmák alakítási öregedése. Fémten és Fémvizsgálat Határterületei Konferencia, Gyöngyösi, Nagy, Barkóczy: Miskolc, Magyarország, 2018.01.20;
6. Kadar, Z.; Mezo, T.; Kis, L.; Grepaly, I. Small and Full-Scale Test Methods of Bonded Flexible Pipes. 4th Rubber Symposium of the Countries on the Danube, DKG MKE MAGUSZ: Szeged, Hungary, 24-26 Oct 2016;

7. Mezo, T.; Kadar, Z.; Grepaly, I. Rubber Hoses in Special Oil & Gas Applications. 4th Rubber Symposium of the Countries on the Danube, DKG MKE MAGUSZ: Szeged, Hungary, 24-26 Oct 2016;
8. Kovacs, Z.; Gonzales, G.; David, A.; Grepaly, I.; Mezo, T. 20,000-Psi API 16C Choke and Kill Flexible Line Development. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 2-5 May, 2022; OTC-32006-MS, 8 p.; DOI: 10.4043/32006-MS
9. Szekely, G.; Peixoto, E.; Czovek, Z.; Mezo, T. Managed Pressure Drilling Flexible Mud Return Line Advances. Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 1-4 May, 2017; OTC-27777-MS, 9 p.; DOI: 10.4043/27777-MS
10. Szekely, G.; Peixoto, E.; Czovek, Z.; Mezo, T. Fast-Track Development of Managed Pressure Drilling Flexible Mud Return Line. Proceedings of the IADC/SPE Managed Pressure Drilling & Underbalanced Operations Conference, Rio de Janeiro, Brazil, March, 2017; SPE-185280-MS, 8 p.; DOI: 10.2118/185280-MS
11. Kádár, Z.; Nagy, T.; Mező, T.; Grépály, I.; Kis, L.; Kovács, Z.; Marosi, T. Csatlakozóval ellátott nagynyomású gumitömlő és eljárás annak előállítására. *Szabadalmi Közlöny és Védjegyértesítő*, 125. évf. 8. szám, 231 062, P 18 00036; Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala: Budapest, Hungary, 2020;
12. Grepaly, I.; Mezo, T.; Szekely, G.; Kovacs, Z.; Kotai, J.; Nagy, T. T. Early Life Erosion Tracking Layer for High Pressure Fracking Hoses. *Patent Cooperation Treaty*, PCT/US2020/060647; World Intellectual Property Organization: Geneva, Switzerland, 2021;

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Qiang, B.; Yong, B.; Weidong, R. Bonded flexible pipes. *Advances in Pipes and Pipelines Flexible Pipes*, 1st ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2017; pp. 357–392.
- [2] Bartha, Z. szerk. Gumiipari Kézikönyv; Taurus-Omikk: Budapest, Hungary, 1989; pp. 663–691.
- [3] Mezo, T.; Kadar, Z.; Grepaly, I. Rubber Hoses in Special Oil&Gas Applications. 4th Rubber Symp. of the Countries on the Danube, Szeged, Hungary, 2016; Hungarian Chemical Society;
- [4] Barkóczi I. Sodronykötél Kézikönyv; Fux Kft., Miskolc, Hungary, 1996;
- [5] Avrami, M. Kinetics of Phase Change I. General Theory. *J. Chem. Phys.* 1939, 7, 1103-1112.
- [6] Johnson, W.A.; Mehl, R.F. Reaction Kinetics in Processes of Nucleation and Growth. *Trans. Am. Inst. Min. Met. Eng.* 1939, 195, 416-422.
- [7] Kolmogorov, A.N. On the Statistical Theory of Crystallization of Metals. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Mat.* 1937, 1, 355-359.
- [8] Austin, J.; Rickett, R. Kinetics of the Decomposition of Austenite at Constant Temperature. *Trans. Am. Inst. Metall. Eng.* 1939, 135, 396-415.
- [9] Brown, M. E. Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry. *Volume 1: Principles and Practice*; Elsevier Science B. V.: Amsterdam, The Netherlands, 1998;
- [10] Ahmedabadi, P.M.; Kain, V. Modelling Transformation Kinetics of Different Solid-state Reactions Using Sigmoidal Model. *Materialia* 2019, 5, 100235.
- [11] Starink, M. J. Kinetic Equations for Diffusion-controlled Precipitation Reactions. *J. Mater. Sci.* 1997, 32, 4061-4070.
- [12] Blazquez, J. S., et al. On the Isothermal Kinetics Analysis of Transformations in Metastable Systems: Combined Use of Isothermal and Non-isothermal Calorimetry. *Phil. Mag. A* 2007, 87, 4151-4167.
- [13] Mezo, T.; Barkoczy, P. Study on Static Strain Aging Kinetics of High-Carbon Steel Wires and Its Impact on High-Strength Steel Cords. *Metals* 2021, 11(11), 1684.
- [14] Kemp, I. P.; Pollard, G.; Bramley, A.N. Static Strain Aging in High Carbon Steel Wire. *Mater. Sci. Tech.* 1990, 6, 331-337.
- [15] Lamontagne, A. et al. Evolution of Carbon Distribution and Mechanical Properties During the Static Strain Ageing of Heavily Drawn Pearlitic Steel Wires. *Mater. Sci. Eng. A* 2013, 667, 115-124
- [16] Buono, V.T.L.; Andrade, M.S.; Gonzalez, B.M. Kinetics of Strain Aging in Drawn Pearlitic Steels. *Metall. Mater. Trans.* 1998, 29A, 1415-1423.
- [17] Mezo, T.; Barkoczy, P. Impact of Strain Aging Kinetics on the Failure of Thin Steel Wire Ropes. *Mater. Proc.* 2021, 3(1), 10
- [18] Nagy, T.T., et al. Modified Model for Description of the Behaviour of Reinforced Rubber Hoses. *Kaut. Gummi Kunst.* 1986, 39, 612-614.
- [19] Mezo, T.; Barkoczy, P.; Vindics, B. Nagynyomású Tömlő Szerkezetek Tervezési Módszerének Kiterjesztése az Erősítő Acélszálak Alakítási Öregedésének Figyelembevételével. Tavasz Szél Konferencia, Miskolc, Hungary, 2021; Miskolci Egyetem, DOSZ;

- [20] Zhou, L., et al. A Modified Pearlite Microstructure to Overcome the Strength-plasticity Trade-off of Heavily Drawn Pearlitic Wire. *Scr. Mater.* 2021, 206, 114236.
- [21] Xiang, L., et al. One-step Annealing Optimizes Strength-ductility Tradeoff in Pearlitic Steel Wires. *Mater. Sci. Eng. A* 2019, 757, 1-13.
- [22] Suliga, M. The Effect of Drawing Speed on the Ageing of High-carbon Steel Wire. *Arch. Metall. Mater.* 2018, 63, 1931-1935.
- [23] Kovacs, Zs., et al. 20,000-Psi API 16C Choke and Kill Flexible Line Development. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 2022; Offshore Technology Conference; OTC-3206-MS
- [24] Jacobs, T. What You Don't Know About Chevron's New 20K Anchor Project. *J. Pet. Technol.* 2024, 76, 32-28.