

A RELATÍV PÁRATARTALOM ÉS A CSAVARBEHAJTÁSI FORDULATSZÁM HATÁSA A MENETKISZAKADÁSI NYOMATÉKRA FRÖCCSÖNTÖTT PA66 POLIMERBEN

EFFECT OF RELATIVE HUMIDITY AND SCREWDRIVING SPEED ON THREAD STRIPPING TORQUE IN INJECTION-MOLDED PA66 POLYMER

Szalai Miklós László*, Dr. Takács János**, Dr. Kónya Gábor***, Hansággy Pál****

ABSTRACT

A csavarkötések teherbírását alapvetően befolyásolja a menetkialakítás és a terhelési körülmények. Jelen vizsgálat célja a csavarbehajtási fordulatszám hatásának elemzése a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött PA66 polimer alapanyagú minták esetén. A mintákat a vizsgálatok előtt különböző relatív páratartalom mellett kondicionáltuk, majd a csavarozást eltérő fordulatszámokon végeztük el, és meghatároztuk a kialakult menetek tönkremeneteli nyomatékát.

Az eredmények alapján a fordulatszám hatása a menetkiszakadási nyomatékra kimutatható, azonban mértéke más vizsgált paraméterekhez képest korlátozott. A mérési eredmények enyhén csökkenő trendet mutatnak a fordulatszám növekedésével, amely a súrlódási viszonyok és az anyag lokális deformációs viselkedésének változásával magyarázható. Az alacsonyabb fordulatszámok esetén nagyobb menetkialakulási ellenállás és ezáltal nagyobb kiszakadási nyomaték figyelhető meg.

A vizsgálatok rámutatnak arra, hogy a csavarbehajtási fordulatszám nem elsődleges, de nem elhanyagolható technológiai paraméter a csavarkötések terhelhetőségének szempontjából, míg a kondicionálási páratartalom meghatározó szerepet játszik a csavarkötések terhelhetőségének alakulásában. Az eredmények hozzájárulnak a műanyag csavarkötések technológiai optimalizálásához és a megfelelő folyamatparaméterek kiválasztásához.

1. BEVEZETÉS

Manapság a műanyag alapanyagok egyre szélesebb körű alkalmazása a gépiparban és a járműiparban jelentősen megnövelte a csavarkötések szerepét a

polimer anyagok esetében is. A fröccsöntött polimerek, különösen a poliamid alapú anyagok, kedvező mechanikai tulajdonságaik és feldolgozhatóságuk miatt gyakran kerülnek felhasználásra. Felhasználásuk kiterjed többek között burkolati elemekre, rögzítő- és tartószerkezetekre, elektromos csatlakozóházakra, ventilátorházakra, valamint különböző gépegységek kisebb igénybevételű szerkezeti alkatrészeire. Ezen alkalmazásokban gyakran követelmény az oldható kötés kialakítása, amelyet költséghatékony módon menetformázó csavarokkal valósítanak meg [1].

A csavarral létrehozott menetek költséghatékony és rugalmas megoldást biztosítanak, azonban teherbírásuk nagymértékben függ a menetkialakítás körülményeitől. A vizsgált kötésekben alkalmazott menetformázó csavarok forgácsleválasztás helyett hidegalakítással hozzák létre a menetet, ahol az anyag lokális képlékeny deformációja és a súrlódási viszonyok együttesen határozzák meg a menet kialakulását [2] [3].

A csavarkötések viselkedését műanyagok esetében számos tényező befolyásolja, többek között a geometria, az anyag mechanikai tulajdonságai és a technológiai paraméterek. A szakirodalom elsősorban a furatméret és az anyagjellemzők hatásával foglalkozik, míg a csavarbehajtás dinamikus paramétereinek, mint a fordulatszám hatása kevésbé vizsgált [4].

A fordulatszám ugyanakkor közvetlenül befolyásolja a menetkialakulást, a súrlódási viszonyokat és az anyag lokális deformációját, ezáltal hatással lehet a menet teherbírására és tönkremeneteli mechanizmusára. A poliamid anyagok esetében további fontos tényező a nedvességtartalom, amely jelentősen módosítja az anyag mechanikai jellemzőit, ezáltal befolyásolva a csavarkötések viselkedését [5] [6].

Jelen kutatás célja a csavarbehajtási fordulatszám hatásának vizsgálata a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött PA66 polimer anyagban, különböző

* doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.; műszaki ügyintéző, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, 6000 Kecskemét, Izsáki út 10.

** prof.em., Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

*** adjunktus, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, 6000. Kecskemét Izsáki út 10.

**** doktorandusz, Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, 1088 Budapest, József körút 6.; tanársegéd, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, 6000 Kecskemét Izsáki út 10.

páratartalom mellett kondicionált minták esetén. A vizsgálat során a fordulatszám hatását a kialakult menet teherbírására kísérleti úton elemeztük, kiemelve ennek a paraméternek a jelentőségét a csavarkötések technológiai optimalizálása szempontjából [7] [8].

2. KÍSÉRLETTERVEZÉS

A kísérletsorozat összeállításának célja egy olyan vizsgálati elrendezés kidolgozása volt, amely egyrészt jól reprezentálja az ipari szerelési körülményeket, másrészt lehetőséget biztosít a csavarkötések viselkedését meghatározó főbb tényezők elkülönült értékelésére. Ennek megfelelően a vizsgálati metodika a teljes technológiai folyamatot lefedte, a minták előkészítésétől és kondicionálásától kezdve a csavarkötés létrehozásán át egészen a tönkremeneteli jellemzők meghatározásáig.

A vizsgálati sorozat középpontjában a PA66 polimer alapanyag nedvességi állapotának változása, valamint a csavarbehajtási fordulatszám szerepe állt. Különös tekintettel ezek hatására a menet kialakulására és végső teherbírására. A csavarbehajtás hatására bekövetkező tönkremenetel a menet kiszakadásával jelentkezett, amelyhez tartozó maximális nyomatékok menetkiszakadási nyomatékként értelmeztük. A kísérletek során a minták meghatározott relatív páratartalmú környezetben történő kondicionálást követően kerültek vizsgálatra, miközben a csavar geometriai és anyagi jellemzői változatlanok maradtak. A másik változó paramétert a csavarbehajtás fordulatszáma jelentette, így lehetőség nyílt annak hatásának célzott elemzésére a kialakuló menet mechanikai jellemzőire, kontrollált környezeti feltételek mellett.

2.1. Vizsgált anyagok és kötőelemek

PA66 polimer komponens: A vizsgálatok során alkalmazott próbatestek egy ipari felhasználásból származó, fröccsöntött PA66 alapanyagú alkatrészről készültek, amely elektromos kapcsolóegységének tartószerkezeti elemeként szolgál. Ezt az anyagválasztást a PA66 kedvező mechanikai tulajdonságai, jó feldolgozhatósága, valamint széles körű ipari elterjedtsége indokolja. A vizsgálatokhoz felhasznált minták azonos gyártási tételből származtak, és egyazon fröccsöntési ciklus során, egymást követően kerültek legyártásra. Ennek köszönhetően a feldolgozási feltételek és az ebből adódó anyagszerkezeti sajátosságok közötti eltérés elhanyagolhatónak tekinthető. A mintaválasztás így lehetővé tette a fröccsöntési technológiából eredő szórás minimalizálását, biztosítva, hogy a mért különbségek elsődlegesen a kondicionálási állapot és a vizsgált technológiai paraméterek hatására vezethetők vissza. A csavarkötés kialakítása során a műanyag komponens speciális geometriája révén egyben alátétként is funkcionált. Így a csavarkötés kialakítása során a két

PA66 komponens között egy hálózati kábel került befogásra, amely a kötési zónában kompresszió alá került, és a szerelési konfiguráció részét képezte. A furat zsákfurat kialakítású, amelynek mélységi mérete meghaladja a csavar behajtási hosszát, ugyanakkor átmérője a csavar névleges külső átmérőjével egyezik meg. Ez a kialakítás biztosítja a menetformázás reprodukálható körülményeit és az üzemi alkalmazásokhoz hasonló kötési konfigurációt.

Csavar komponens: A csavarkötések kialakításához közepes széntartalmú, bórötvöztetett acélból készült, galvanikusan horganyzott felületű kötőelemet használtunk. A csavar 20MnB4 alapanyagú, 9.8 szilárdsági osztályba tartozik, geometriai kialakítása és anyagminősége megfelel az ipari szabványok követelményeinek, ezáltal biztosítva a vizsgálatok során a reprodukálható és összehasonlítható kötéskialakulást. A csavar és a polimer komponens párosítása a gyakorlatban széles körben használt menetformázó kötési megoldást reprezentál, így a kapott eredmények közvetlenül értelmezhetők ipari alkalmazások szempontjából. A csavar REMFORM II típusú, trilobuláris keresztmetszetű menetformázó geometriával rendelkezik, amely a menetet anyagleválasztás nélkül, hideg képlékeny alakítással hozza létre. A kialakításból adódóan a csavarbehajtás során mérsékelt radiális deformációsállapot alakul ki, miközben a kötés nagy kihúzási ellenállással rendelkezik. Ez a geometria különösen alkalmas műanyag és könnyűfém komponensek esetében, ahol a menetkialakítás a lokális anyagdeformáció révén valósul meg.

2.2. Vizsgálati berendezések és eszközök

A vizsgálatok során használt berendezések kiválasztásánál elsődleges szempont volt a megfelelő mérési pontosság és ismételhetőség biztosítása, valamint az ipari körülményekhez közeli mérési feltételek kialakítása. A kísérletek megvalósításához a polimer minták nedvességtartalmának beállítására és meghatározására, valamint a csavarkötések menetkiszakadási nyomatékának mérésére alkalmas berendezéseket használtunk.

A kondicionálást megelőzően a minták előszárítása Nabertherm TR 240 típusú kemencében történt. Annak érdekében, hogy a kezdeti nedvességtartalom egységes és alacsony szintre csökkenjen, biztosítva a további kondicionálási lépések reprodukálhatóságát.

A minták kondicionálása Ascott CC-100iP típusú klímakamrában történt, amely biztosította a levegő relatív páratartalmának és hőmérsékletének szabályozott, stabil beállítását.

A minták nedvességtartalmát TA Instruments Discovery TGA Q5000 típusú termogravimetriás analízátor segítségével határoztuk meg. A termogravimetriás vizsgálat (TGA) lehetővé teszi a PA66 minták nedvességtartalmának nagy pontosságú meghatározását, a nedvességhez kapcsolódó tömegvesztés elkülönítésével az anyag termikus

bomlásától, valamint biztosítja az eredmények szakirodalmi összehasonlíthatóságát.

A csavarkötések kialakítása és a menetkiszakadási nyomaték mérése Atlas Copco POWER FOCUS 8 vezérlőegységgel, IRTT-B 5-I06 nyomatékmérővel, valamint ES21-07-I06-PS típusú elektromos csavarozóval történt, TX15×50 bitfej alkalmazásával. A rendszer lehetővé tette a különböző fordulatszámok beállítását és a csavarbehajtás során fellépő nyomatékértékek pontos mérését és digitális rögzítését. A mérések minden esetben azonos berendezés-, adat- és paraméterbeállítások mellett zajlottak, csökkentve a mérési környezetből származó szórást.

A használt berendezések együttese biztosította a polimer nedvességi állapota és a menetkiszakadási nyomaték közötti összefüggések megbízható vizsgálatát, miközben a kialakított mérési elrendezés az ipari szerelési körülményekhez jól közelítő feltételeket biztosított.

2.3. Vizsgálati és beállított paraméterek

A kísérletsorozat során kétváltozós kísérlettervet alkalmaztunk, amelyben fő változó a relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám volt. A csavar geometriai és anyagjellemzői, a csavarozási technológia egyéb paraméterei, valamint a mérési környezet jellemzői állandó értéken kerültek rögzítésre. Ez a kísérleti megközelítés lehetővé tette a relatív páratartalom, a fordulatszám és a menetkiszakadási nyomaték közötti összefüggések egyértelmű értelmezését.

A vizsgálatokat megelőzően a minták 24 órán keresztül 80 °C hőmérsékleten kerültek előszáritásra.

A minták kondicionálása szabályozott klímakamrában történt 25%, 40%, 50%, 60% és 75% relatív páratartalom mellett, 23 °C hőmérsékleten. Ezt követően három napig 25% relatív páratartalmú környezetben kondicionáltuk őket. A magasabb páratartalmi szintek közötti átállás során minden mérési lépcső között 48 órás kondicionálási időt biztosítottunk, a relatív páratartalom fokozatos növelése mellett. Minden egyes páratartalmi szinten három mintán történtek mérések, így a teljes vizsgálatsorozat során összesen 60 mérési eredmény került meghatározásra, átlag- és szórásértékek számításával. A csavarbehajtási fordulatszámok: 558, 681, 805 és 930 1/min értékekre kerültek beállításra.

A TGA mérések során a hevítő kemence gyors felfűtését a JUMP parancs alkalmazásával biztosítottuk, amely lehetővé tette a minta 170 °C hőmérsékletre történő minél gyorsabb felmelegítését. A mérés során a tömegvesztesség időfüggvényét rögzítettük, és a nedvességtartalom meghatározása a görbe stabilizálódásának szakaszában, mintegy 50 perc elteltével történt, amikor a tömegváltozás mértéke már elhanyagolható volt. A vizsgálatok során különös figyelmet fordítottunk a minták tömegének egységességére, annak érdekében, hogy a

tömegvesztésből számított nedvességtartalom összehasonlítható és reprodukálható legyen.

A menetkiszakadási nyomaték meghatározása minden esetben azonos mérési eljárással és berendezéssel történt, biztosítva az eredmények összehasonlíthatóságát az eltérő kondicionálási állapotok között. A kapott adatok alapján értékeltük a nedvességi állapot és a fordulatszám hatását, valamint a csavarkötések mechanikai viselkedését.

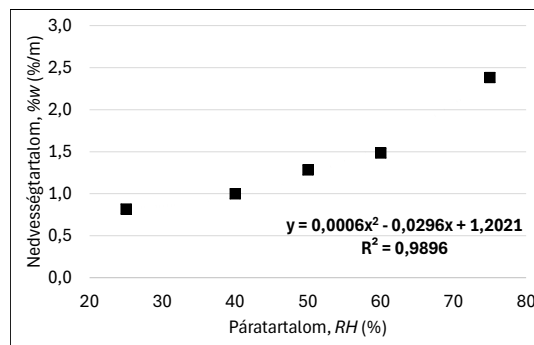
3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A kísérletsorozat során kapott mérési eredmények lehetővé tették a relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám hatásának részletes vizsgálatát a menetkiszakadási nyomaték alakulására. A kiértékelés során a kapott átlagértékeket és szórásokat elemeztük, különös tekintettel a trendek meghatározására és a vizsgált paraméterek közötti összefüggések feltárására.

A következőkben a relatív páratartalom által meghatározott nedvességi állapot változását, majd a csavarbehajtási fordulatszám hatását külön-külön, azt követően pedig egymással összefüggésben értékeljük a menet kialakulására és a kötés teherbírására gyakorolt hatásuk alapján.

3.1. Nedvességtartalom mérések eredményei

A nedvességtartalom-mérések eredményei az 1. ábra alapján igazolták, hogy a PA66 alapanyagú minták nedvességfelvétele szoros összefüggést mutat a kondicionálás során alkalmazott relatív páratartalommal (RH). A vizsgált tartományban (25-75% RH) a minták nedvességtartalma közel monoton növekedést mutatott. Az egyes kondicionálási állapotokhoz jól elkülöníthető nedvességi szintek tartoznak. Alacsony relatív páratartalom (25%) mellett a nedvességtartalom alacsony szinten stabilizálódott, míg magasabb páratartalom esetén (75%) a nedvességtartalom többszörösére növekedett.



1. ábra. TGA-mérések eredményei a relatív páratartalom függvényében

Megfigyelhető, hogy a nedvességtartalom növekedése nem lineáris a relatív páratartalom függvényében: alacsonyabb tartományban (25-40% RH)

a görbe növekedési üteme kisebb, míg magasabb (>60%) páratartalomnál jelentősen megnövekszik.

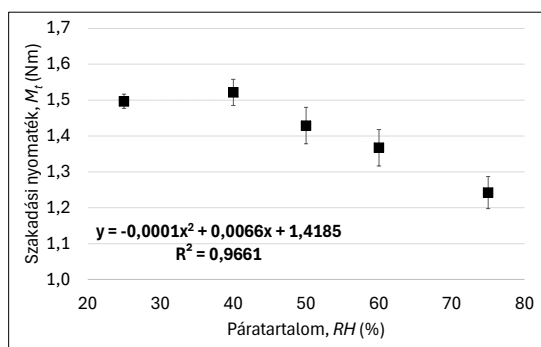
A jelenséget a PA66 anyag nedvességfelvételének nemlineáris jellege idézi elő. Alacsonyabb relatív páratartalom esetén a vízmolekulák elsősorban a polimer láncok poláris csoportjaihoz kötődnek (pl. hidrogénkötések révén), és a szabad kötőhelyek száma korlátozott, ami a nedvességtartalom lassabb növekedését eredményezi. Magasabb relatív páratartalomnál a kötőhelyek telítődése után a víz egyre nagyobb arányban az amorf tartományokban oldódik, illetve klaszterképződés is kialakulhat, amely a nedvességtartalom gyorsabb növekedését eredményezi. Emellett a növekvő nedvességtartalom következtében fokozódik a polimer láncok mobilitása, ami elősegíti a további vízfelvételt. Ennek következtében a magasabb páratartalom-tartományban a nedvességtartalom növekedése meredekebb görbével jellemezhető [9].

A poliamid anyagok higroszkópos viselkedése során a vízmolekulák diffúzióval jutnak be az amorf tartományokba, és kölcsönhatásba lépnek a polimer láncok poláris csoportjaival. A relatív páratartalom növekedésével nő a környezet vízakтивitása, amely elősegíti a nagyobb egyensúlyi nedvességtartalom kialakulását az anyagban. Ez a folyamat szoros összefüggésben áll a polimer-víz kölcsönhatásokkal és a diffúziós egyensúly kialakulásával [10].

A meghatározott nedvességtartalom-értékek megfelelő alapot szolgáltattak a további vizsgálatokhoz, különösen a menetkiszakadási nyomaték kiértékeléséhez. A kialakuló nedvességi állapotok lehetővé tették annak vizsgálatát, hogy a polimer nedvességfelvétele milyen mértékben befolyásolja a polimer-fém csavarkötések mechanikai viselkedését, ezáltal megalapozva a következő alfejezetben bemutatott eredmények értelmezését [11].

3.2. Menetszakadási nyomaték mérések eredményei

A menetkiszakadási nyomaték mérések eredményei a 2. ábra alapján egyértelmű összefüggést mutattak a PA66 alapanyag nedvességi állapota és a csavarkötések mechanikai viselkedése között. A vizsgált tartományban a menetkiszakadási nyomaték a relatív páratartalom növekedésével szignifikáns csökkenést mutatott.



2. ábra. Menetszakadási nyomaték mérések átlagértékei a relatív páratartalom függvényében

Alacsony nedvességi állapot mellett a csavarkötések nagyobb merevséget és magasabb terhelhetőséget mutattak, míg a nedvességtartalom növekedésével a csökkenő anyagszilárdság és növekvő láncmobilitás következtében a menet teherbírása mérhetően romlott.

A 25% és 75% relatív páratartalom közötti tartományban a menetkiszakadási nyomaték átlagértéke megközelítőleg 15-30% között csökkent.

A mérési eredmények szórása magasabb nedvességtartalmú állapotok esetén növekedést mutatott, ami a polimer fokozódó viszkoelasztikus viselkedésére, valamint a menetkialakulás folyamatának nagyobb érzékenységre utal. Ez a jelenség ipari szempontból különösen jelentős, mivel azonos meghúzási feltételek mellett is a kötésminőség nagyobb ingadozását eredményezheti [12].

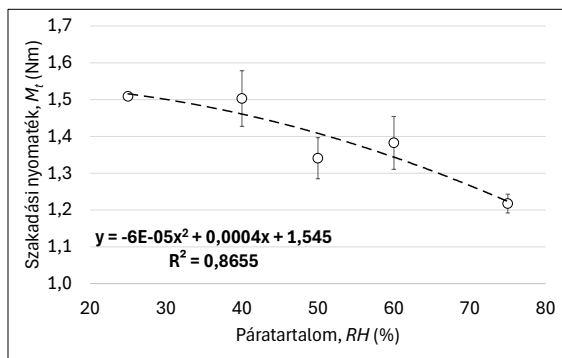
A mérési eredmények igazolták, hogy a polimer nedvességi állapota jelentősen befolyásolja a polimer-fém csavarkötések kialakulását és reprodukálhatóságát. Az eredmények alapján a kizárólag nyomatékalapú szabályozás változó környezeti feltételek mellett nem minden esetben biztosít stabil kötésminőséget [10] [11].

3.3. Fordulatszámok beállításának hatásai

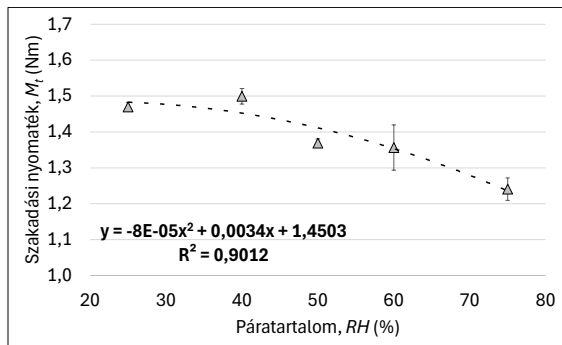
A menetkiszakadási nyomaték alakulását vizsgálva a különböző csavarbehajtási fordulatszámok mellett megállapítható, hogy a fordulatszám hatása a vizsgált tartományban kimutatható, azonban mértéke a relatív páratartalom hatásához képest mérsékeltebb.

A vizsgált fordulatszám-tartományban (558-930 1/min) a menetkiszakadási nyomaték általában 5-10% között csökkent a fordulatszám növekedésével. A különböző fordulatszámok hatása minden kondicionálási állapot mellett hasonló trendet mutatott, azonban a különbségek kisebbek voltak, mint a relatív páratartalom esetében. Ez megerősíti, hogy a fordulatszám másodlagos, finomhangoló paraméterként befolyásolja a kötés teherbírását.

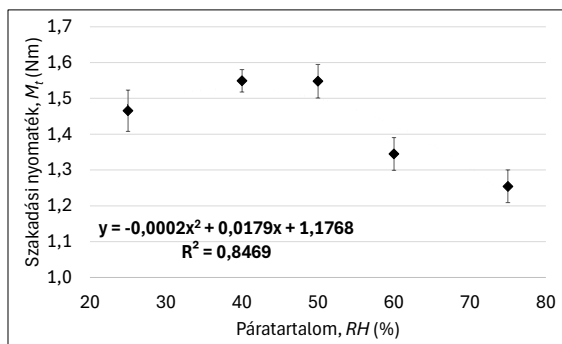
A 3. ábra, 4. ábra, 5. ábra és 6. ábra eredményei alapján az alacsonyabb fordulatszámok mellett a menetkiszakadási nyomaték jellemzően magasabb értékeket vett fel, míg a fordulatszám növekedésével a nyomaték enyhe csökkenése volt megfigyelhető. A tendencia a különböző kondicionálási állapotok esetében hasonló lefutást mutatott, ugyanakkor a változás mértéke a nedvességi állapottól is függött.



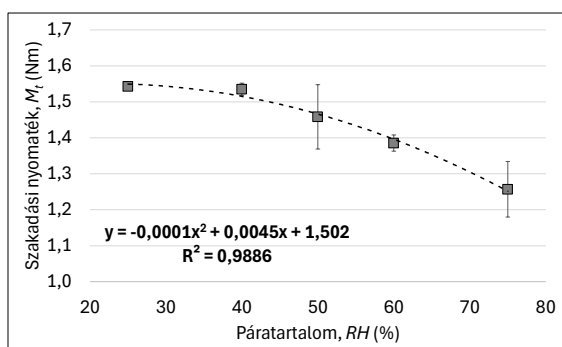
3. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (558 1/min)



4. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (681 1/min)



5. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (805 1/min)



6. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (930 1/min)

A jelenség hátterében a menetformázás során érvényesülő deformációs és súrlódási viszonyok állnak. Alacsonyabb fordulatszám esetén a deformációs folyamat hosszabb idő alatt megy végbe, amely elősegíti a polimer anyag nagyobb mértékű lokális alakváltozását és kedvezőbb érintkezési viszonyok kialakulását. Ezzel szemben magasabb fordulatszámnál a rövidebb alakítási idő és a megváltozó súrlódási feltételek kisebb mértékű menetkialakulást és alacsonyabb kiszakadási nyomatékokat eredményezhetnek [2] [10].

A mérési eredmények szórása a fordulatszám növekedésével enyhe növekedést mutatott, ami arra utal, hogy nagyobb sebesség mellett a menetkialakítás folyamata érzékenyebbé válik a lokális anyagtulajdonságokra és a súrlódási viszonyokra. Ez a hatás különösen magasabb nedvességi állapotok esetén jelentkezett markánsabban.

A csavarbehajtási fordulatszám a menetkiszakadási nyomatékok befolyásoló másodlagos, de nem elhanyagolható technológiai paraméter. Hatása elsősorban a menetformázás dinamikáján keresztül érvényesül, és különösen a nedvességi állapottal együtt értelmezve jelentős a csavarkötések stabilitásának szempontjából [3] [5].

3.4. A vizsgált paraméterek együttes hatása

A kísérleti eredmények együttes értékelése során megállapítható, hogy a menetkiszakadási nyomaték alakulását a relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám külön-külön és együttesen is befolyásolják. A vizsgált tartományban a relatív páratartalom hatása dominánsnak bizonyult, míg a fordulatszám elsősorban másodlagos, módosító jelleggel befolyásolta a kötés teherbírását.

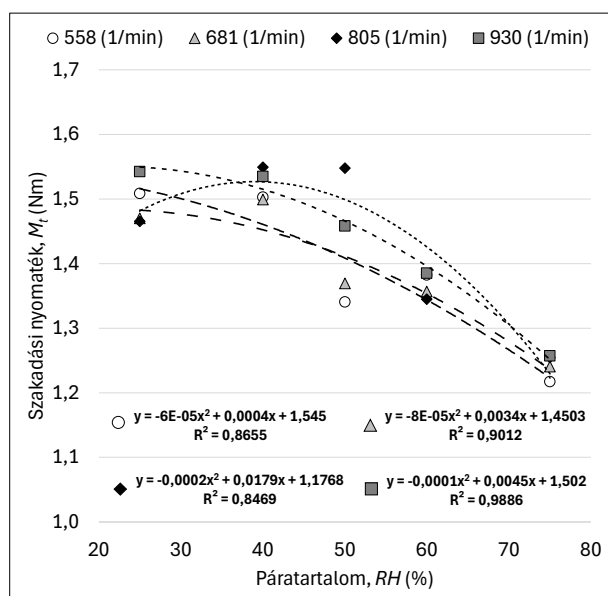
Alacsonyabb nedvességi állapot mellett a fordulatszám hatása kevésbé volt kifejezett, a menetkiszakadási nyomaték értékek viszonylag stabilan alakultak a vizsgált fordulatszám-tartományban. Ezzel szemben magasabb relatív páratartalom esetén a fordulatszám hatása markánsabbá vált, és a menetkiszakadási nyomaték a fordulatszám növekedésével nagyobb mértékű csökkenést mutatott.

Ez a viselkedés a polimer viszkoelasztikus tulajdonságainak nedvességfüggő változásával magyarázható. Magasabb nedvességtartalom mellett a megnövekedett láncmobilitás és csökkent merevség miatt a menetformázás folyamata érzékenyebbé válik a csavarbehajtás dinamikus paramétereire. Ennek következtében a nagyobb fordulatszám a menet kialakulásának kevésbé kedvező feltételeit eredményezi, ami alacsonyabb menetkiszakadási nyomatékként jelentkezik. Hasonló következtetésekre jutottak a szakirodalomban is: Bunn és Garner kimutatták, hogy a PA66 nedvességfelvétele a hidrogénkötések átrendeződésén keresztül csökkenti az anyag merevségét és növeli a láncmobilitást, míg Akay polimer rendszerek esetében igazolta, hogy a nedvességtartalom növekedése jelentős mechanikai

lágyulást eredményez. A menetformázó csavarok működésére vonatkozóan a szakirodalom rámutat, hogy a deformációs és súrlódási viszonyok kulcsszerepet játszanak a menet kialakulásában, ami összhangban van a jelen vizsgálatban tapasztalt fordulatszámfüggő viselkedéssel [13] [14].

A kapott eredmények alapján a csavarbehajtási fordulatszám hatása csak a nedvességi állapottal együtt értelmezhető megfelelően. A két paraméter kölcsönhatása meghatározó a csavarkötések mechanikai viselkedése szempontjából, ami kiemeli a környezeti feltételek figyelembevételének fontosságát a technológiai beállítások során [15].

A 7. ábrán látható eredmények alapján megállapítható, hogy a csavarkötések viselkedését a vizsgált paraméterek együttesen határozzák meg, és a csavarbehajtási fordulatszám hatása csak a nedvességi állapottal együtt értelmezhető megfelelően. A nedvességtartalom növekedésével a fordulatszám hatása kifejezettebbé válik, ami a polimer viszkoelasztikus viselkedésének erősödésével függ össze.



7. ábra. Menetszakadási nyomaték a relatív páratartalom függvényében különböző fordulatszámok esetén

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során vizsgáltuk a csavarbehajtási fordulatszám és a relatív páratartalom hatását fröccsöntött PA66 alapanyagú mintákban kialakított csavarkötések menetszakadási nyomatékára. A kísérleti eredmények egyértelműen igazolták, hogy a polimer nedvességi állapota meghatározó szerepet játszik a kötés mechanikai viselkedésében. A relatív páratartalom növekedésével a menetszakadási nyomaték csökkenése volt megfigyelhető, ami a polimer mechanikai tulajdonságainak nedvességfüggő változására vezethető vissza [16].

A csavarbehajtási fordulatszám hatása a vizsgált tartományban kimutatható, azonban mértéke a nedvességi állapot hatásához képest kisebb. A fordulatszám növekedésével a menetszakadási nyomaték enyhe csökkenése figyelhető meg, amely a menetformázás során kialakuló deformációs és súrlódási viszonyok változásával magyarázható.

A relatív páratartalom által okozott változások nagyságrendje a fordulatszám hatását többszörösen meghaladta, ami aláhúzza a környezeti feltételek domináns szerepét a csavarkötések viselkedésében.

Ipari szempontból az eredmények rámutatnak arra, hogy a csavarkötések stabil minősége nem biztosítható kizárólag nyomaték alapú technológiai beállításokkal. A környezeti feltételek, különösen a relatív páratartalom figyelembevétele elengedhetetlen a megbízható és reprodukálható kötéskialakítás érdekében. A vizsgálatok eredményei hozzájárulnak a műanyag csavarkötések technológiai optimalizálásához, a megfelelő szerelési körülmények és az anyagok tárolása meghatározásához, ugyanis a kötés megbízhatóságát elsősorban a környezeti kondicionálás határozta meg, és csak másodsorban a szerelési sebesség.

5. SUMMARY

This study investigated the effect of screw driving speed and relative humidity on the thread stripping torque of screw joints formed in injection-moulded PA66 specimens. The experimental results clearly demonstrate that the moisture condition of the polymer plays a dominant role in determining the mechanical behaviour of the joint. An increase in relative humidity resulted in a decrease in thread stripping torque, which can be attributed to the moisture-dependent changes in the mechanical properties of PA66 [16].

The influence of screw driving speed was also found to be measurable within the investigated range; however, its effect was less pronounced compared to that of the moisture condition. Increasing the driving speed led to a slight reduction in thread stripping torque, which can be explained by the altered deformation and frictional conditions during the thread-forming process.

The magnitude of the changes caused by relative humidity significantly exceeded the effect of screwdriving speed, highlighting the dominant role of environmental conditions in the behavior of threaded joints.

The results indicate that the behaviour of screw joints is governed by the combined effect of the investigated parameters, and the influence of driving speed can only be properly interpreted in conjunction with the moisture condition. At higher moisture levels, the effect of driving speed becomes more significant, which is related to the increased viscoelasticity and reduced stiffness of the polymer material.

From an industrial perspective, the findings highlight that reliable joint quality cannot be ensured solely by torque-based process control. Environmental conditions, particularly relative humidity, must be considered to achieve consistent and reproducible joint performance.

The results of the study contribute to the technological optimization of plastic threaded joints and support the determination of appropriate assembly conditions and material storage requirements, as the reliability of the joint was found to be governed primarily by environmental conditioning and only secondarily by the assembly speed.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék Műanyagfeldolgozó kutatócsoportjának a vizsgálatok elvégzéséhez biztosított szakmai és laboratóriumi háttérért, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karának nyújtott szakmai támogatásért.

Jelen „A relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám hatása a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött P66 polimerben” c. cikk a 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00021 projekt keretében jött létre. A 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2025-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

7. IRODALOM

- [1] A. Galińska, “Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals - A review”, *Polymers*, vol. 12, no. 10, 2020. doi: 10.3390/polym12102252
- [2] P. Pencom, “Thread forming screws for plastics”, *Technical Bulletin*, 2021.
- [3] J. C. Gupta, “Thread forming screw design guide for thermoplastics”, *Plastics Fastening G.*, 2020.
- [4] Y. Zhao and L. Zhang, “Joining polymer parts with self-tapping screws: an improvement of the screw thread geometry”, *International Journal of Material Forming*, 2021. doi: 10.1007/s12289-020-01593-6
- [5] W. E. Cumbicus, “Analysis of self-tapping screw joints in fibre glass reinforced PEI polymer used in the automotive industry”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023. doi: 10.1007/s00170-023-11422-0
- [6] R. P. Kambour, J. E. Mark and L. H. Sperling, “Mechanical Behavior of Polymers”, 2nd ed., Cambridge University Press, 2018., pp. 312–330., ISBN-13: 978-0521871471
- [7] Kolver, “Fastening into Plastics,” *Kolver Blog*, Nov. 14, 2024. [Online]. Available:

<https://kolver.com/us/blog-detail/fastening-into-plastics> [Accessed: Jun. 1, 2026].

- [8] [C. Eldridge, “Engineering guide to screws for plastics”, *Vital Parts Engineering Guide*, 2025.
- [9] P. Wetzel, A. K. Sambale, K. Uhlig, M. Stommel and B. Schneider, “Hygromechanical behavior of polyamide 6.6: experiments and modeling”, *Polymers*, vol. 15, no. 16, 2023., doi: 10.3390/polym15163387
- [10] Y. Wu, J. Tan, X. Li, and U. Olofsson, “Effect of humidity on the tribological properties of PA66 materials,” *Tribology Letters*, vol. 72, no. 3, p. 85, 2024, doi: 10.1007/s11249-024-01882-0.S.
- [11] S. Satouri, R. Chekkour, G. Chatzigeorgiou, F. Meraghni, G. Robert, “Numerical-experimental approach to identify the effect of relative humidity on the material parameters of a rate-dependent damage model for polyamide 66”, *Mechanics of Materials*, vol. 184, p. 104682, 2023., doi: 10.1016/j.mechmat.2023.104735
- [12] L. Kehrner, J. Keursten, V. Hirschberg and T. Böhlke, “Dynamic mechanical analysis of PA 6 under hydrothermal influences and viscoelastic material modeling,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, doi: 10.1177/08927057231155864
- [13] C. W. Bunn and E. V. Garner, “The crystal structures of two polyamides (‘nylons’),” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 189, no. 1016, pp. 39–68, 1947, doi: 10.1098/rspa.1947.0028.
- [14] M. Akay, “Moisture Absorption and its Influence on the Tensile Properties of Glass-Fibre Reinforced Polyamide 6,6”, *Polymers and Polymer Composites*, 1994, doi: 10.1177/147823919400200601
- [15] Spyros S., Tobias L., Sam A., Neha C., “Investigation of bolt torque and environmental conditioning on the mechanical performance of bolted composite laminates”, *Composite Structures*, 2026., doi: 10.1016/j.compstruct.2026.120080
- [16] Szalai M. L., “A nedvességkondicionálás hatása a polimer-fém csavarkötések mechanikai jellemzőire”, *TDK Konferencia, Neumann János Egyetem, Kecskemét, Magyarország*, 2025.