

# LENDÍTŐKERÉK-RÖGZÍTŐ CSAVAROK MEGHIBÁSODÁSÁNAK ELEMZÉSE

## FAILURE ANALYSIS OF FLYWHEEL RETAINING BOLTS

*Dr. Jálícs Károly, egyetemi docens  
Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet*

### ABSTRACT

The current paper aims to show the importance of the proper tightening process of bolted joints. Through a real life example, i.e. the damage of flywheel retaining bolts of an internal combustion engine, the damage process of the joint will be shown and conclusions will be drawn regarding the causes of the damage.

### 1. BEVEZETÉS

Gázmotoros kombinált ciklusú erőművek országosan sok helyen üzemelnek. A villamosenergia termelése mellett a belsőégésű motor egyébként veszteségbe menő hőjének felhasználása is sokszor megtörténik. A veszteségével hőcserélőn keresztül meleg vizet állítanak elő, pl. fűtésre, vagy a biogáz előállító fermentorok fűtését valósítják meg.

Gázmotorok sokféle méretben épülnek 4 hengertől egészen 24 hengerig, és ezekhez csatlakozik rugalmas tengelykapcsoló közbeiktatásával az áramtermelő generátor. A gázmotor is belsőégésű motor, amelyet a hengerszám és – elrendezés, valamint a forgattyúcsapok elékelési szögének, a gyújtási sorrend függvényében többé – kevésbé egyenetlen járás jellemez.

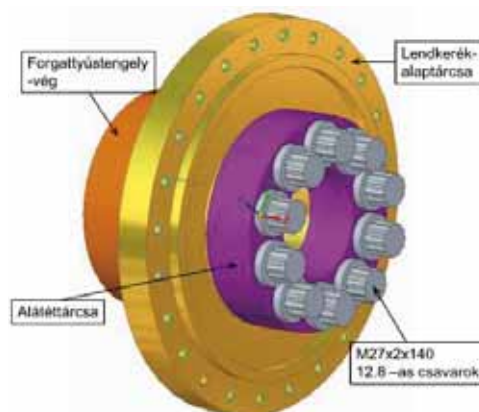
Ezt hivatott részében kiegyenlíteni a lendítőkerék, amelyet a forgattyús tengely generátor felőli oldalára rögzítenek általában csavarkötéssel. Ezen csavarkötések megfelelő meghúzása, állapota elengedhetetlen feltétele a motorok hosszútávú hibamentes üzemeltetésének. A továbbiakban egy ilyen csavarkötés meghibásodását, ill. ennek lehetséges okait mutatom be.

### 2. A VIZSGÁLT CSAVARKÖTÉS BEMUTATÁSA ÉS MEGHIBÁSODÁSA

A kérdéses csavarkötés egy 12 hengeres V elrendezésű biogáz motoron található. A lendítőkerék tárcsát a 12.9 anyagminőségű csavarok (10 db, M27x2 x 140) egy alátét tárcsán keresztül rögzítik a forgattyús tengelyben kialakított zsákfuratokhoz (1. ábra).

Az esetet az teszi különösen érdekessé, hogy a motor nagyjavításon esett át mintegy 6000

üzemórával a csavarok károsodása előtt, ahol mind a 10 csavart gyári újra cserélték. A szemrevételezésből megállapítható, hogy a csavarok a főtengety tárcsa és a lendítőkerék csatlakozási felület síkjában, gyakorlatilag az első terhelt menetnél törtek el (2. ábra). A csavarmenetek terhelésvétele a mérnöki gyakorlatban jól ismert, de természetesen a vonatkozó irodalom is részletesen tárgyalja.

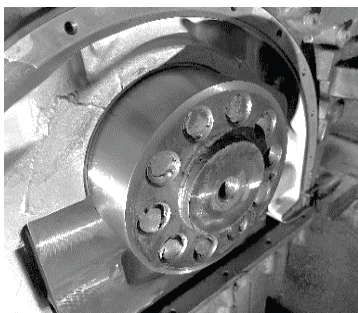


*1. ábra: A csavarkötés felépítése*

A szemrevételezésből megállapítható, hogy a csavarok a főtengety tárcsa és a lendítőkerék csatlakozási felület síkjában, gyakorlatilag az első terhelt menetnél törtek el (2. ábra). A csavarmenetek terhelésvétele a mérnöki gyakorlatban jól ismert, de természetesen a vonatkozó irodalom is részletesen tárgyalja.

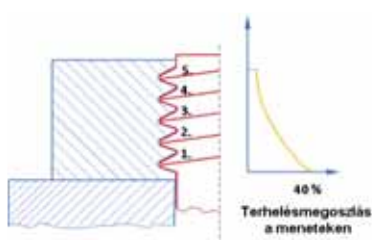
A motort az elektronikus szabályozórendszere 54444 üzemóránál fordulatszám mérési hibára hivatkozva megállította, a motor újraindítása nem volt lehetséges. A további vizsgálatok észlelték az előző fejezetben bemutatott 10 db csavar törését.

Az esetek 60 - 65 % -ban a törés az első teherviselő menetnél történik. A menetprofil, mint éles horony hatásán túl az első menetben lévő erőkoncentráció (3. ábra) a fő oka a csavarok alacsony kifáradási határának. A hagyományos csavarkötések szokásos kialakításánál a menetek nincsenek egyenletesen terhelve.



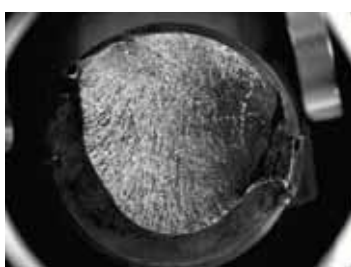
2. ábra: A forgattyústengely-vég a beletört csavarokkal

A 3. ábrán látható, hogy az első teherhordó menet a teljes csavarerő több mint 1/3 át veszi fel, a fáradásos csavartörés ezen a helyen várható leginkább.



3. ábra: A csavarmenetek teherviselésének eloszlása

Fénymikroszkóp segítségével enyhén nagyított képet készítve a csavarok töretfelületeiről megállapítható, hogy megfigyelhető a repedés kezdete, ezen kívül nagyfelületű fáradt törési felületek láthatók, míg kisebb felületek általában a keresztmetszet egyik szélén rideg törésképet mutatnak (4. ábra).



4. ábra: Egy kiválasztott csavar töretfelülete

### 3. A CSAVARKÖTÉS MECHANIKAI VIZSGÁLATA

Az 5. ábra mutatja sematikusan a különböző ciklikus feszültségek hatására kialakuló kifáradási töretfelületeket, nagy és kis névleges feszültségek esetén vázlatosan hornyos és horony nélküli kör keresztmetszetű rudaknál. A világos színnel jelölt töretfelületek a fáradt törési területet, a sötét töretfelület a rideg törést jelölik.

Összehasonlítva az 4. ábra töretfelülete az 5. ábra sematikus töretfelületeivel észrevehető, hogy a jobb oldali 3 oszlopban látható képekhez tudjuk hasonlítani a valós töretfelületeket. Mivel a métermenet éles menet, ezért a táblázatból az éles horony (scharfe Kerbe) oszlopát kell figyelembe venni. Felül szerepel továbbá az alacsony névleges feszültség (niedrige Nennspannung).

Az 5. ábra fekete körrel jelölt töretfelületeit arra utalnak, hogy a törés terjedésekor a csavarfeszültség már alacsony volt. Mint az ábrából látható, magas csavarfeszültség esetén a fáradt töretfelületek lényegesen kisebbek lettek volna. Ez arra utal, hogy a csavarok üzemi ereje (és a fellépő feszültség), amelyet a csavarok megfelelő meghúzásakor állítunk be a fáradt törés terjedése során alacsony volt, azaz vagy a motor működése során a csavarok meglazultak, vagy már szereléskor nem érték el a szükséges üzemi erőt, tehát nem húzták meg megfelelően őket (a kettő kombinációja is előfordulhat). Az, hogy a kettő közül melyik, azt csak a további vizsgálatok elvégzése után tudjuk megmondani.

hohe Nennspannung			niedrige Nennspannung		
ungekerbt	milde Kerbe	scharfe Kerbe	ungekerbt	milde Kerbe	scharfe Kerbe
Rundstäbe					
Zug und Zug – Druck					
einsinnige Biegung					
Hin – Herbiegung					
Umlaufbiegung					
alternierende Torsion					

5. ábra: Köracélok makroszkopikus töretfelületeinek sematikus ábrázolása [3]

A csavarokat nyomatékulccsal egy nyomatéksokszorozó közbeiktatásával húzták meg az előírás szerint összesen 3 lépésben az előírt csavarozási sorrendben. Először 100 Nm nyomatékulccsal, második lépcsőben 300 Nm nyomatékulccsal, végül 120° szögre húzással.

Olyan helyeken, ahol az összeszorító erőt pontosan kell beállítani (a vizsgált alkalmazás is ilyen), a csavarokat a rugalmassági határon túl feszítik elő. Erre azért van szükség, mert a meghúzási szög mérésének pontatlansága van. A rugalmas tartományban meghúzott csavar esetén még igen kis szögelfordulásváltozás is nagymértékű csavarerő változást eredményez, tehát a csavarerő beállítás pontatlan lehet.

Ezért a csavarokat a rugalmas tartományon túl húzzák, ahol a csavarerő változása a szögelfordulás függvényében ellaposodik, így a szögelfordulás változására a csavarerő csak kismértékben változik. Ezzel a módszerrel tehát pontos összeszorító erő beállítás lehetséges. Annak érdekében, hogy a csavarkötés ne lazuljon meg, igen fontos az összeszorító erő helyes tervezéskori megválasztása, és a szereléskor helyes beállítása (megfelelő meghúzási nyomaték, és/vagy szöggel). Rosszul megválasztott összeszorító erő esetén az összenyomott felületek felületi érdességei, egyenetlenségei maradó alakváltozást szenvednek, ami az összeszorító erő csökkenését eredményezi és végeredményben a csavarkötés meglazulásához vezet. Mivel a szögelfordulás viszonylag kis ráfordítással mérhető, ezért ez a módszer nem sokkal költségesebb, mint a nyomtérakra húzás, de nagyobb pontosságú.

Ez előbb leírtak alapján a csavarkötéssel kapcsolatban négyféle ellenőrző számítást kell elvégezni:

- A csavarkötés ellenőrzése a súrlódással átvihető nyomtérakra.
- A csavarkötés ellenőrzése a csavarok nyírásával átvihető nyomtérakra.
- A csavarokban az előírt módon történő meghúzással fellépő feszültségre.
- Felfekvő felületek felületi nyomásra történő ellenőrzése.

Az ellenőrző számítások alapján megállapíthatjuk, hogy a csavarkötés a vizsgált négy feltételnek megfelel. Tehát a csavarokkal összeszorított tárcsák az előírt meghúzási nyomtérakkal és szöggel nagy biztonsággal a tárcsák közti súrlódással átviszik a motor nyomtérkát, esetleges nyírásra történő igénybevétel esetén is sokszorosan túlbiztosítottak, a csavarokban meghúzáskor fellépő feszültség nem lépi túl a csavar szakítószilárdságát (de vélhetően a rugalmassági határt igen), és végül az alátét tárcsa a csavarfej nyomása miatt kialakuló felületi nyomás is határérték alatti. Az alkalmazott csavarkötés mérete, anyagválasztása az adott feladat ellátásához tehát megfelelő volt.

A csavarkötés konstrukcióját vizsgálva észrevehetünk azonban néhány tervezési hiányosságot, amely hozzájárulhatott a csavarok idő előtti töréséhez.

1. A kérdéses csavarkötésben normál csavarszárú nagyszilárdságú csavart alkalmaztak magra gyengített csavar helyett. A magra gyengített csavar egy nagy szilárdsági osztályú, mérhetően rugalmasan nyúló csavar. A vékony és különösen hosszú szárnak köszönhetően

csavarkötésben előfeszített húzórugóként viselkedik. A megfeszített csavarszárban a meghúzáskor keletkező húzóerő csak kismértékben csökken, ha a csavarkötés később a képlékeny alakváltozás miatt enged. A megfelelő csavarkötés ezért további lazulás (elcsavarodás) elleni védelem nélkül is megoldható, nem tud kilazulni, ezért önzáró. Az alkalmazott csavarok nem ilyenek voltak, tehát érzékenyebbek a fáradásos törésre.

2. A csavarkötés tartóssága szempontjából kiemelten fontos a számítás szerint szükséges előfeszítés alkalmazása. Ez különösen a dinamikus terhelte csavarokra vonatkozik. A bizonytalansági tényező a csavarfej súrlódása.
3. A csavar összetett igénybevétele: Meghúzás közben a csavart húzó és csavaró igénybevétel terheli. A csavaró igénybevétel a csavarfej és az összeszorított elem, valamint a menetek közti súrlódásból adódó súrlódó nyomtér. Ha a csavaró igénybevételt kiküszöböljük, akkor a csavarszárat csak húzó igénybevétel éri, így nagyobb előfeszítő erő hozható létre meghúzáskor. Léteznek erre különleges megoldások.

#### 4. AZ ÖSSZESZORÍTOTT ALKATRÉSZEK VIZSGÁLATA

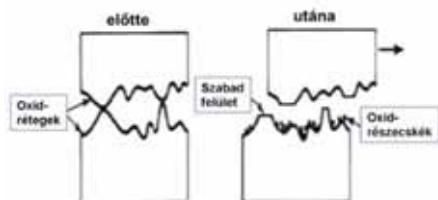
A már korábban említett módon (az 1. ábra szerint) a lendítőkerék felülete érintkezik a forgattyús tengely karimájával, valamint a másik oldalról az alátét tárcsa megfelelő felületével.

Megvizsgálva ezeket a csatlakozó felületeket, már a motor károsodás utáni szétszerelésekor, a felületeken korrózió nyomait fedezhetjük fel. Mivel erre a helyre korrozív közeg nem kerülhet, ezért a korrózió különleges fajtája, az illesztési korrózió (fretting) lépett fel.

Az illesztési korrózió az érintkező terhelte felületek korróziós károsodása, miközben a felületek kis, érintőirányú oszcilláló mozgásokat végeznek. A kopást az érintkezési felületi érdességcsúcsok összetapadása okozza, amelyek később a kis mozgás hatására ismét megszakadnak. A relatív csúszó mozgás amplitúdója gyakran mikrométertől milliméterig terjed, de akár a nanométer tartományba is előfordulhat.

Ekkor a finom részecskék, töredékek kopnak le az egyik vagy mindkét anyagból. Ezek a töredékek kemény, koptató hatású részecskévé oxidálódnak, amelyek tönkre teszik a fémfelületet (6. ábra).

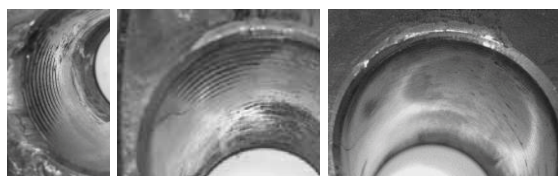
A motor üzemi rezgései legalább is részben felelőssé tehetőek a csavarkötések fellazulásáért. Csavarkötések nem megfelelő csavarbiztosítás miatt (de előírászerűn meghúzva!), az összeszorított alkatrészek csavartengelyre merőleges rezgése miatt gyorsan meglazulhatnak (a vizsgált csavarkötést is elsősorban ilyen jellegű terhelés ér), akár néhány másodperc alatt is, megfelelő keresztirányú rezgés hatására.



6. ábra: Az illesztési korrózió kialakulása

Létezik egy vizsgálat csavarkötések lazulására vonatkozóan, ez a Junker-féle teszt, amellyel részletesen a DIN 65151 (Luft- und Raumfahrt - Dynamische Prüfung des Sicherungsverhaltens von Schraubverbindungen unter Querbeanspruchung (Vibrationsprüfung)) német szabvány foglalkozik. Ezzel a teszttel elvégzett mérési eredmények mutatják, hogy a megfelelően meghúzott csavarkötés is képes másodpercek alatt fellazulni, ha nem megfelelő csavarbiztosítást használunk.

A lendítőkerék tárcsa néhány furatában, a tárcsa forgási irányába mutató oldalán, a csavar menetétől származó, a lenyomatok vannak. Két szomszédos furat esetén kifejezett lenyomatokról van szó, egy harmadik, szintén szomszédos furat esetén még éppen kivehető a menet lenyomata (7. ábra).



7. ábra: Menet lenyomatok a lendítőkerék tárcsa furataiban

A lenyomatok jelenléte arra utal, hogy egy nem meghatározható ideig, csak ez a három csavar, nyírásra (és hajlításra) igénybevéve vitte át a motor nyomatékát. A többi csavar vagy már eltörött, vagy már lényegesen kisebb összeszorító erőt biztosított az előírtnál, azaz meglazultak.

Mivel a vizsgált motor esetén az összeszorított elemek bizonyíthatóan egymáshoz képest relatív mozgást, és a csavarok hossztengetelyre merőleges rezgést végeztek, ezért

a csavarkötések a motor üzeme közbeni fellazulása nem zárható ki.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK

A V12 felépítésű motorok üzem közben fellépő, a motormechanikából, gázerőkből stb. adódó rezgései (hosszanti, kereszt, függőleges és torziós) az összes motortípusénál lényegesen jobbak. Természetesen rezgések ennek ellenére jelen vannak, amelyek hozzájárulhatnak, de nem okozhatják egyedülként a csavarok lazulást 6000 üzemóra alatt. Annál inkább sem, mivel az eredeti gyári csavarok mintegy 48000 üzemórát üzemeltek hibátlanul.

Lehetséges azonban az is, hogy a nem megfelelően beállított összeszorító erő miatt a motorrezgések képesek voltak a tárcsákat egymáshoz képest elmozdítani, amelyek további, végzetesnek bizonyuló csavarlazulást okoztak.

Az a tény, hogy a motor a csavartörés előtt csak kb. 6000 üzemórát járt az újonnan beépített csavarokkal, inkább ez utóbbit valószínűsíti. Megvizsgálva a javítás előtti és utáni rezgésmérési eredményeket, nem találunk említésre méltó eltéréseket az össz- rezgésebesség értékei között, és a vizsgált spektrumok sem adnak részletesebb tájékoztatást a káresemény bekövetkezéséről

E helyen hívom fel a figyelmet a csavarkötés méretezésére akár a végeleges módszert segítségül hívva is [4] még a tervezési fázisban, amellyel a hasonló káresemények elkerülhetők.

## IRODALOM

- [1] Reichle. M.: Scharaubenverbindungen, DHBW Stuttgart,
- [2] Konecki, K., Talaska, K.: Analysis of Wedge Lock Washer using the Finite Element Method, MATEC Web Conf. 357 02025, 2022, DOI: 10.1051/mateconf/202235702025
- [3] Macherauch, E., Zoch, H.W.: Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg + Teubner, 11. kiadás, 2011, p.407.
- [4] Sarka, F. (2023). Examination of Bolt Connection with Finite Element Method. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_19)