

# Vezérműlánc-kopás összehasonlítása motorfékpadon és tribométeren

## Comparison of timing chain wear generated on engine dynamometer and tribometer

PAULOVICS László<sup>1</sup>, SZENTENDREI Dániel<sup>1</sup>, KUTI Rajmund<sup>2</sup>, Jan ROHDE-BRANDENBURGER<sup>1</sup>, TÓTH-NAGY Csaba<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Széchenyi István Egyetem, Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszék, 9026 Győr, Egyetem tér 1., bmt.sze.hu

<sup>2</sup>Széchenyi István Egyetem, Mechatronika és Gépszerkezettan Tanszék, 9026 Győr, Egyetem tér 1., mgt.sze.hu

### Abstract

*The most common solution for wear testing of timing chains is to test the complete chain in a running engine. A more economical, more energy-efficient alternative to this could be a specimen test with one chain link on a tribometer. However, the results of these tests are difficult to compare with the results of tests in a running engine, as they quantify wear by measuring other parameters. Wear depth can be the parameter that allows a direct comparison between wear conditions of the entire chain and tribometer specimens. This can be determined by 3D scanning of wear scars.*

**Keywords:** timing chain, wear, tribometer, radionuclide technique, confocal microscopy

### Kivonat

*A vezérműláncok kopásvizsgálatára a legelterjedtebb megoldás a teljes lánc működő motorban való tesztelése. Ennek egy olcsóbb, energiahatékonyabb alternatívája lehet a láncszemeken végzett próbatestvizsgálat tribométeren. Ezen vizsgálatok eredményei azonban nehezen összehasonlíthatók a motorikus üzemben végzett vizsgálatok eredményeivel, mivel más paraméter mérésével számszerűsítik a kopást. A kopásmélység lehet az a paraméter, mely közvetlenebb összehasonlítást tesz lehetővé a teljes lánc és a tribométer-próbatetek kopása között. Ennek meghatározása a kopásnyomok 3D-szkennelése által lehetséges.*

**Kulcsszavak:** vezérműlánc, kopás, tribométer, radionuklid technika, konfokális mikroszkópia

## 1. BEVEZETŐ

Az utóbbi 20 évben a személygépkocsik motorjaiban alkalmazott kenőolajok minősége nagymértékben megváltozott. A súrlódási veszteségek csökkentése céljából az általánosan alkalmazott 10W-40 viszkozitási osztályról több lépésben 0W-30-ra, majd 0W-20 viszkozitási osztályra tért át az autóipar. A viszkozitás csökkenése mellett azonban a motorok terhelése egyre nőtt az egyre nagyobb fajlagos teljesítménynek köszönhetően, amit a downsizing motorfejlesztési irányzat váltott ki. Az olajcsere-intervallumok hossza is sok esetben nőtt, számos motor esetén 2 évet vagy 30.000 km-t kell szolgálnia az olajtöltetnek két olajcsere között.

A megváltozó követelmények miatt a motorfejlesztőknek számos motorkísérletet és olajvizsgálatot kellett végezni, melyeknek különböző szintjei vannak, attól függően, hogy milyen részletesen kívánják leképezni a valós rendszert [1].

Ha egy új alkatrészt vagy új kenőanyagot kell kipróbálni, a teljes jármű vagy motor üzemi körülmények között vagy fékpadon való vizsgálata a legkézenfekvőbb megoldás. Ezek a valóságos terhelésnek köszönhetően megbízható és releváns információkat szolgáltatnak, de felettébb időigényesek és költségesek, valamint az ökológiai lábnyomuk is jelentős. A másik végletet jelentő modellvizsgálatok és próbatestvizsgálatok legfőbb előnye a költséghatékonyság és a gyorsaság, valamint az eredményt befolyásoló körülmények és paraméterek feletti nagyfokú kontroll. Ezek esetében a vizsgálat szempontjából releváns paraméterek megfelelnek a valóságnak, de többi vizsgálati paraméter standardizált, melynek köszönhetően az

ok-okozati összefüggések hatékonyan feltárhatók, az eredmények pedig összehasonlíthatók más szabványos vizsgálatok eredményeivel [1].

Sokszor célravezető lehet a különféle vizsgálati szintek kombinálása, de összehasonlításuk több szempontból is nehéz. Eltérő a terhelés jellege, eltérők maguk az alkatrészek vagy próbatestek, és sokszor a mért jellemző is. Némely esetben ezek a problémák legalább részben áthidalhatók, lehetővé téve a különféle szinteken végzett vizsgálatok eredményeinek összehasonlítását. Erre szükség lehet például egy vizsgálati módszer validációja alkalmával. A következő fejezetek egy ilyen esetet mutatnak be, vezérműláncok motorfékpadon és tribométeren végzett kopásvizsgálatának összehasonlításával [1].

## 2. VEZÉRMŰLÁNC ONLINE KOPÁSMÉRÉSE MOTORFÉKPADON

Az elmúlt tíz évben a Széchenyi István Egyetem Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszéken több radionuklid technikával [1] végzett kopásmérés került végrehajtásra vezérműláncokon, illetve a motorok egyéb hajtóláncain. Ezek a vizsgálatok általában a változó olajminőség mellett (használt olaj, tüzelőanyaggal szennyezett olaj) jelentkező kopás meghatározására irányultak, és a láncok kopássebessége került kiértékelésre különféle munkapontokban [3].

Az egyik ilyen vizsgálat egy Diesel-motor vezérműláncának kopására irányult különféle motorolajok használata mellett, melyek a következők: új 0W-20, új 0W-30, és utóbbi 200 órát motorfékpadon járt (kb. 15.000 km-rel egyenértékű) változata. A láncokban 10 csapot és hüvelyt kellett aktiválni, melyek együttes kopása ezek után online mérhető volt 0,1 nm felbontással. Minden olajjal ugyanazon 5 különböző fordulatszám-terhelés munkapontban 3 órán keresztül járt a motor, mialatt az olajban lévő, aktivált csapokból és hüvelyekből származó kopadék sugárzása folyamatosan mérve volt. Ennek eredményeképp minden 3 órás munkapontra egy átlagos kopássebesség került megállapításra [1].

Az 1. táblázat tartalmazza olajonként a lánchüvelyek átlagos kopássebességét, az 5 munkapont alatt mért teljes kopást, és a különféle olajokkal mért kopás arányosított értékét, mely esetben a 0W-30 volt a referencia.

1. táblázat – Lánckopás mértéke különféle olajokkal motorfékpadon vizsgálva

olaj	átl. kopássebesség [nm/h]	teljes kopás 15 h [nm]	kopás aránya 0W30-hoz mérten
0W-30	0,72	10,8	100 %
0W-20	0,62	9,3	86 %
0W-20 200 h	8,40	126	1167 %

Az eredmény mindkét fajta friss olajjal az összes munkapontban 0,5 és 0,8 nm/h közötti kopássebesség, ami a tapasztalatok szerint teljesen normális érték. A 0W-30 olaj esetén 0,72 nm/h, a 0W-20 esetén 0,62 nm/h lett az 5 munkapontra vetített átlag, mely összesen 15-15 órányi mérés eredménye. Ez alatt összesen 10,8 nm volt a hüvelyek átlagos kopásmélysége a 0W-30 olajjal és 9,3 nm a 0W-20 olajjal. (Az átlagos kopásmélység alatt jelen esetben 10 db hüvely átlagos kopásmélysége értendő a furat teljes felületére vonatkoztatva, 15 órányi járatás után.) A motorra előírt olajcsere-periódusnak megfelelő üzemidőt elérte, 200 órát használt 0W-30 olajjal ehhez képest jelentősen megnőtt a lánc kopása. A 15 órányi mérés végén 126 nm volt az átlagos kopásmélység a hüvelyek teljes felületén, ami 8,4 nm/h átlagos kopássebességet jelent [1].

A következtetés tehát, hogy az élettartama végén járó, degradálódott és korommal erősen szennyezett olajjal a kopás több mint 10-szeres értékre növekedhet. Ugyanakkor figyelembe véve, hogy a motor nem mindig erősen használt olajjal jár, a használt olajjal mért kopássebesség sem kritikus a lánc élettartama szempontjából. A láncok élettartama során a kopásból eredő maximális megengedett nyúlás 0,5% [4], mely a vizsgált lánc esetén 8-10 nm/h átlagos kopássebességnek felel meg a teljes élettartam alatt, ami jellemzően 300.000 km, azaz kb. 5000 üzemóra. Ez alapján kijelenthető, hogy a lánc élettartama mindegyik olaj használatával biztosított [1].

A fenti eredmények csak egy kis részét képezik a teljes vizsgálatnak, mely során 7-féle tüzelőanyag-motorolaj kombinációval volt összehasonlítva a lánc kopása különböző motor-munkapontokban. Az eredmények ára több mint 250 órányi motorfékpadon járatás, több mint 4000 liternyi elfogyasztott tüzelőanyag. A láncszemek aktiválási költsége pedig az összes elfogyasztott tüzelőanyag árának többszörösét tette ki [1].

### 3. VEZÉRMŰLÁNC-SZEMEK TESZTELÉSE TRIBOMÉTEREN

Mivel a motorfékpadai vizsgálatok meglehetősen költségesek, érdemes gazdaságosabb alternatívát keresni, ha lehetőség van rá. Olaj-összehasonlító vizsgálatok például tribométeren is elvégezhetők, akár a vezérműláncok anyagának figyelembe vételével is, ha a tribométeren szokásosan használt standard próbatestek helyett vezérműlánc-szemeket alkalmazunk [5].

A Belsőégésű Motorok és Járműhajtások Tanszéken kifejlesztésre került egy vizsgálati technológia hüvelyes láncok tribométeren való kopásvizsgálatára. A vizsgálatok Diesel-motorok hüvelyes láncbaiból kiserelt csapokon és hüvelyeken zajlottak, tesztenként 1 db hüvely és 1 db csap felhasználásával [5],[6].

A vizsgálatok egy Plint TE-77 tribométeren folytak, melyben a lánc hüvelyének külső felülete volt a csap felületére nyomva, miközben a hüvely a beállított löketen és frekvencián mozgott. Az így elvégzett kopásvizsgálatok hátránya, hogy a csak relatív összehasonlításra alkalmasak, mint minden modellvizsgálat, de ez sok esetben elegendő. Az összeállítást és a hüvelyen jelentkező kopást az 1. ábra szemlélteti [1].



1. ábra. A tribométerbe szerelt csap-hüvely összeállítás élvi ábrája (balra), a hüvelyen keletkezett kopás szemléltetése (középen) és a kopásnyom digitális mikroszkópos felvétele az átmérők méretével (jobbra)

Ez az összeállítás alkalmas lehet pl. különféle olajminőségek összehasonlítására a lánc anyagának figyelembe vételével. A vizsgálat több fejlesztési lépésen esett át [5],[6],[7], mire az optimális paraméterek kialakultak. Az utolsó változatban 1 mm-es lökettel és 10 Hz frekvencián járt a tribométer, 50 N normálerő és 100 °C olajhőmérséklet mellett. A tesztek időtartama 22 óra volt [7].

A vizsgálatok során mérve van a súrlódási együttható, vizsgálat után pedig mikroszkóppal kerül megmérésre a hüvelyen a kopásátmérő. A csapok kemény kerámia bevonattal rendelkeznek, ezért azokon nem volt mérhető kopás, csupán kissé felpolírozódott és elszíneződött azok felülete. A kopás mértéke így a hüvelyen mért, lökettel párhuzamos és merőleges irányú kopásnyom-átmérők átlagával jellemezhető, hasonlóan a szabványos golyó-tárcsás olajvizsgálatokhoz [8], melyeknél a golyón mért kopásnyom-átmérő az összehasonlítás alapja.

A V6 Diesel-motor fékpadai járatása során alkalmazott olajminőségek a tribométeren is összehasonlításra kerültek. A vizsgálatok után mért kopásnyomok átlagos átmérője és szórása (olajmintánként 3-4 próbatesttel elvégzett tesztek után) a 2. táblázatban látható [1].

2. táblázat – Kopásnyom-átmérők és szórásuk különféle olajokkal tribométeren vizsgálva

olaj	kopásátmérő átlag [ $\mu\text{m}$ ]	kopásátmérő szórás [ $\mu\text{m}$ ]	kopásátmérő rel. szórás [%]
0W-30	364,8	16,1	4,40
0W-20	350,2	16,4	4,68
0W-30 200h	909,8	4,6	0,50

A szórást figyelembe véve a 0W-20 és 0W-30 olajok között nem fedezhető fel szignifikáns különbség, ha a kopásátmérőből indulunk ki. Ez a próbatestek geometriájából adódik, mivel a kopásnyom két henger keresztirányú metszetének felel meg. Ebből fakadóan a kopásátmérőre alapozott kiértékelés egyik hátránya, hogy kis különbségek nem mutathatók ki egyértelműen (a különbség a szórásmezőn belül van), mivel a kopásátmérő növekedése nem arányos a lekopott tömeggel vagy térfogattal, sem a kopásmélységgel. Így ez a módszer csak viszonylag nagy különbségek kimutatására alkalmas. Ahhoz nem elég érzékeny a kopásátmérő változása, hogy kisebb különbséget megbízhatóan mutasson ki a kopás mértékében [1].

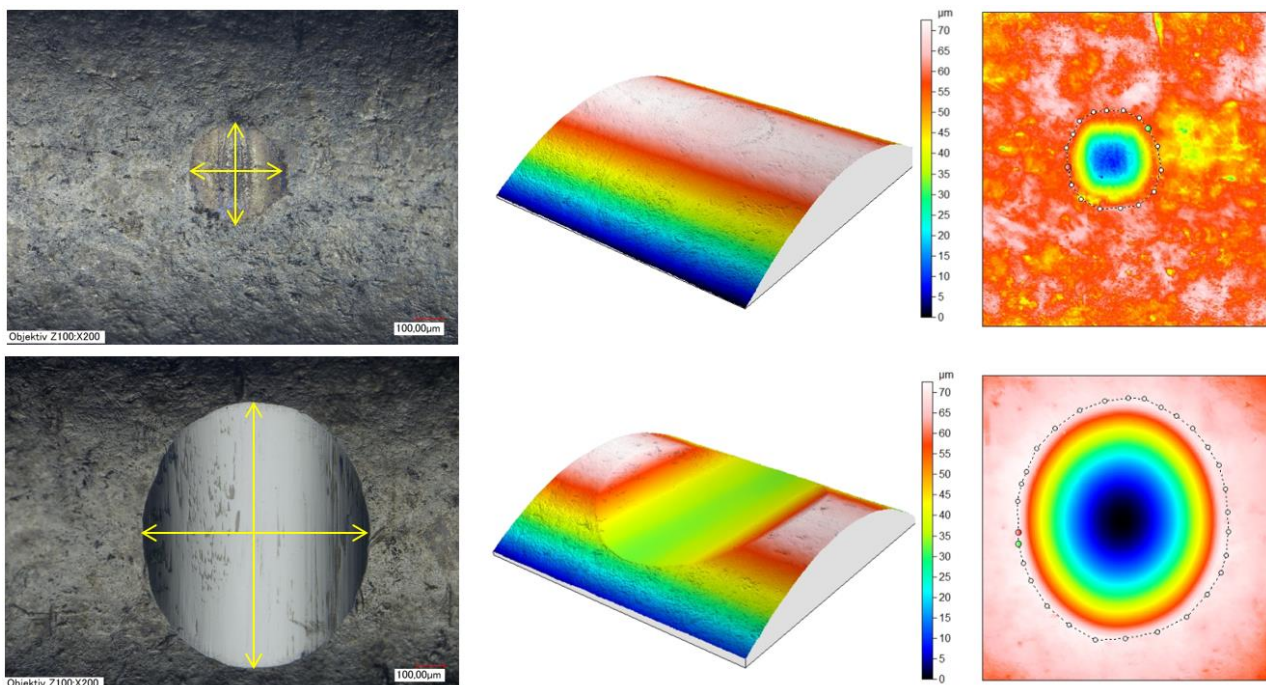
A másik probléma, hogy a tribométeren a kopásátmérőből [ $\mu\text{m}$ ] kapott értékek belsőégésű motoron végzett RNT kopásmérés eredményeivel nem összevethetők, hiszen az utóbbinál a kopás mértéke kopássebességben [ $\text{nm/h}$ ], illetve kopásmélységben [ $\text{nm}$ ] van kifejezve, A vizsgált felület nagyságának és az alkatrész anyagának ismeretében ezekből kopástérfogat és kopástömeg számítható [1].

Az RNT kopásmérés módszere tehát azon alapul, hogy a kopó felület nagyságát állandónak tekintjük. A tribométeres vizsgálatok kiértékelése ezzel szöges ellentétben áll, vagyis a kopó felület nagyságának változását mérjük, ebből is belátható, hogy a standardizált próbatestvizsgálatok és a valós alkatrészekon végzett kopásvizsgálatok eredményei nem összehasonlíthatók, legfeljebb a sorrendiség tekintetében [1].

#### 4. KOPÁSMÉLYSÉG MEGHATÁROZÁSA 3D SZKENNELÉSSEL

A tribométeres vizsgálatok eredményei úgy lesznek összevethetők a motoralkatrészek kopásával, ha meghatározzuk a lekopott térfogat nagyságát vagy a kopás átlagos mélységét. Az előző fejezetben ismertetett tribológiai vizsgálatok után a próbatesteken fellépő kopás térfogatának és kopásnyom átlagos mélységének meghatározása lehetséges a kopásnyom 3D-szkennelésével, ha rendelkezésre áll egy erre alkalmas berendezés, pl. konfokális mikroszkóp vagy fehérfény-interferométer.

A lác próbatesteken fellépő kopás térfogatának és a kopásnyom átlagos mélységének legpontosabb meghatározása a teljes kopásnyomról készített nagy felbontású 3D-topográfia segítségével lehetséges. A kopásnyomok 3D-szkennelésével kapott adathalmazból könnyen kiszámítható a kopásnyom felülete. A kopás mélységének és térfogatának meghatározásához azonban szükséges definiálni egy referenciafelületet, amihez viszonyítható a kopás. A hüvely hengerformája miatt a referenciafelület nem sík, így a kisebb kopásnyomokat nehéz behatárolni a 3D-s ábrán. A hengerpalástot síkba terítve azonban a kopásnyom szélei a kisebb magasságkülönbségek miatt jól kivehetővé válnak (2. ábra). A kiterített felületen a kopásnyom kívüli területre referencia sík illeszthető, így a kopásnyom feletti „hiányzó” térfogat a szkennelt felület és a referenciafelület közötti különbségeként határozható meg. Erre a számításra a konfokális mikroszkóp LeicaMap kiértékelő szoftverének beépített eszköze jól alkalmazható volt [1].



2. ábra. – A felső sorban új, az alsó sorban használt 0W-30 olajjal keletkezett kopásnyomok *digitális mikroszkópos felvétele (balra), konfokális mikroszkóppal beszkenntelt 3D-topográfiaja (középen), valamint a kopástérfogat és kopásmélység kiszámításához kiterített 3D felületi topográfia (jobbra)*

A 3D topográfia alapján számított értékek a kopásnyom felülete, térfogata, maximális és átlagos mélysége. Ezzel a módszerrel az összes próbatest kopásnyoma be lett szkennelve és az előbb említett mennyiségek ki lettek számítva. Olajmintánként 3-4 próbatest adataiból kapott átlagos értékeket és azok relatív szórását a 3. táblázat tartalmazza. A relatív szórás minden esetben 15% alatt volt azonos olajjal vizsgált próbatesteknél [1].

3. táblázat – Kopásnyomból számított paraméterek átlag értékei és szórása

olaj	kopásátmérő		kopásfelület		kopástérfogat		átlagos kopásmélység	
	d [ $\mu\text{m}$ ]	rel. szórás	A [ $\mu\text{m}^2$ ]	rel. szórás	V [ $\mu\text{m}^3$ ]	rel. szórás	h [ $\mu\text{m}$ ]	rel. szórás
0W-30	364,8	4,40%	112 512	14,42%	194 779	14,46%	1,59	10,66%
0W-20	350,2	4,68%	107 711	1,00%	145 316	9,25%	1,35	8,86%
0W-30 200h	909,8	0,50%	603 667	3,60%	9 783 174	10,12%	16,17	6,81%

Annak érdekében, hogy a különféle kopást jellemző paraméterek egymással összehasonlíthatók legyenek, a mérőszámok normalizálva lettek. A tiszta 0W-30 olajjal kapott értékeket tekintjük minden mérési vagy számítási módszernél referenciának, az ezzel az olajjal mért kopás értéke lett minden esetben 100%, a 0W-20 és 200 órát futott 0W-30 pedig ehhez lett viszonyítva. Ezt az összehasonlítást mutatja a 4. táblázat [1].

4. táblázat – Tribométeren és motorfékpadon vizsgált különféle kopásparemeterek egységesített értékei

olaj	kopásátmérő	kopásfelület	kopástérfogat	átl. kopásmélység	RNT átl. kopássebesség
0W-30	100%	100%	100%	100%	100%
0W-20	96%	96%	75%	85%	86%
0W-30 200h	249%	537%	5023%	1018%	1167%

Mindezek alapján megállapítható, hogy a kopásnyomok szkennelése után az átlagos kopásmélység szinte ugyanolyan arányt eredményez a három olajminta esetén, mint a motoron végzett RNT vizsgálattal mért kopás, ami nem meglepő, hisz átlagos kopásmélységet hasonlítunk átlagos kopásmélységhez. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a két esetben más volt a kontaktfelület, hisz a motorban működő láncok esetén a lánc csapja vonalszerűen érintkezik a hüvellyel, míg tribométeren pontszerű érintkezés volt a kiindulási állapot [1].

## 5. ÖSSZEZÉS

Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a tribométeres kopásvizsgálatok során és motorvizsgálatok során különféle kenőolajokkal kapott eredmények egymással jobban összehasonlíthatók, ha a tribométeres vizsgálatok kopását a kopásnyom átmérője helyett a kopásnyom 3D-szkennelése útján kapott térfogattal vagy átlagos kopásmélységgel jellemezzük. Annak ellenére tehát, hogy a próbatestek terhelése erősen eltér, tribométeres kopásvizsgálattal arányaiban jól reprodukálhatók a motorikus üzemben kapott eredmények, a különféle motorolajokkal kapott kopás arányát tekintve. Ennek szignifikanciáját azonban a jelenlegi eredmények nem bizonyítják kétséget kizáróan, így szükséges további méréseket végezni, hogy kellő mennyiségű adat álljon rendelkezésre az összefüggések pontos feltérképezéséhez.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Paulovics L., Tabakov Zs. M., Tóth-Nagy Cs., Rohde-Brandenburger J., Kuti R. *Comparison of timing chain wear produced on engine dynamometer and tribometer using 3D-scanning of wear scar*, Nikodem J; Klempous R. (eds.) 12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2021), Proceedings, Online kiadás, IEEE, 2021, 485-490.
- [2] Scherge M., Pöhlmann K., Gervé A. *Wear measurement using radionuclide-technique (RNT)*. Wear, 2003, 254 (9), 801-817.
- [3] Gergye T., Dreyer M. R., Kehrwald B., Optatzy W. *Analysis of the Wear Behavior of Combustion Engine Components Using Radionuclide-Technique*. SAE-China, FISITA (Eds.) Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, 2012, (1), 171-181.
- [4] Fink T., Hirschmann V. *Kettentriebe für den Einsatz in modernen Verbrennungsmotoren*. MTZ – Motortechnische Zeitschrift 62, 2001, 796–806.
- [5] Paulovics L., Tóth Á. D., Hanula B., Kopp A., Knaup J., *Tribometerversuche an Steuerelementen*. 58. Tribologie-Fachtagung 2017: Reibung, Schmierung und Verschleiß, Forschung und praktische Anwendungen, Gesellschaft für Tribologie, Göttingen, Aachen, 2017, P9
- [6] Paulovics L., Németh M., Knaup J., *Alternative Verschleissmessverfahren für Steuerketten*. Knaup, J. (Ed.) 5. Győri Tribologie- und Effizienztagung, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2018, 199-216.
- [7] Paulovics L., Kuti R., Rohde-Brandenburger J., Tóth-Nagy Cs., *Development of comparative investigation method for timing chain wear analysis using oscillating tribometer*. Acta Technica Jaurinensis, 2021, 14 (4) 406-423.
- [8] *Lubricants — Determination of tribological quantities for oils and greases — Tribological test in the translatory oscillation apparatus*, ISO 19291:2016