



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN OBNOVY



Přednáška vznikla za podpory Národního plánu obnovy v rámci projektu Akcelerace zelených dovedností a udržitelnosti na VUT v Brně. Registrační číslo: NPO_VUT_MSMT-2143/2024-5.

přednáška

Zelená tribologie

ZTR Tribologie

Ing. **Per Šperka**, Ph.D.

Petr.Sperka@vut.cz

Spoluautor: Ing. **Michal Okál**, Ph.D.

Brno, 2025



Verze pod licencí **CC BY-NC-SA 4.0**
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.cs>

Obsah

- Bio-lubrikanty
- Recyklace a obnovitelné zdroje
- Nízkoenergetické technologie
- Monitorování a diagnostika

Fig.

Fig.

Fig.

Fig.

Úvod k bio mazivům

Standartní maziva:

- Dosud převážná část maziv jsou bázi ropy (minerální oleje) - 42,1 milionu tun ročně
- Obsahují těžké kovy a aromatické uhlovodíky
- Třeba je vylepšovat přidáním aditiv (Baryum, Fosforové sloučeniny, zinečnaté dialkylditiofosfáty)- **toxické**
- Spalováním se do ovzduší uvolňuje do ovzduší těžké kovy, fosfor, železo, zinek, a pevné částice.



Bio-maziva:

- Jsou biologicky rozložitelná - 2 miliony tun ročně
- Vyrábějí se z obnovitelných zdrojů, jako jsou rostlinné oleje (např. řepkový, sójový, slunečnicový)
- Vysoký viskozitní index a mazací schopnost díky polární povaze esterů, vysoký bod vzplanutí
- **Ekologická rozložitelnost, ne-toxicita a obnovitelnost**
- Nízká oxidační stabilita, vysoká viskozita při nízkých teplotách

Fig.

Murru, Badía-Laino and Díaz-García (2021) – Oxidative Stability of Vegetal Oil-Based Lubricants

Zdroje bio-lubrikantů a jejich povaha

Rostlinné oleje:

- Řepkový olej, slunečnicový olej, sójový olej, palmový olej, kokosový olej, ricinový olej, lněný olej.
- hodné pro širokou škálu aplikací, včetně motorových olejů, hydraulických olejů, plastických maziv, maziv pro převodovky.

Živočišné tuky:

- Tuku z ryb, hovězí a ovčí tuky
- Méně běžné než rostlinné oleje, nachází se ve specifických aplikacích, např. v mazivech pro potravinářský průmysl.

Syntetické estery:

- Estery mastných kyselin a alkoholu, esterifikované rostlinné
- Používají se tam, kde je požadována vyšší stabilita a výkon v extrémních podmínkách, například v leteckých mazivech

Vlastnost	Rostlinné oleje	Živočišné tuky	Syntetické estery
Mazivost	Dobrá	Velmi dobrá	Vynikající
Oxidační stabilita	Nízká (vyžaduje úpravy)	Střední (možnost zlepšit)	Vysoká
Biologická odbouratelnost	Vysoká	Vysoká	Závisí na typu esteru
Výkon při vysokých teplotách	Nízký	Střední	Vysoký
Výkon při nízkých teplotách	Střední	Vysoký (zejména rybí tuky)	Vysoký
Cena	Nízká	Střední	Vysoká
Ekologický dopad	Nízký (obnovitelné, šetrné)	Nízký (obnovitelné, šetrné)	Střední (závisí na výrobě)

*Mazivost – schopnost maziva snižovat koeficient tření a opotřebení mezi dvěma povrchy v kontaktu.

Chemické úpravy biolubrikantů

Hydrogenace:

- Tento proces se používá k nasycení nenasycených vazeb v rostlinných olejích. Hydrogenace zvyšuje oxidační stabilitu a zlepšuje viskozitní vlastnosti, což činí biolubrikanty vhodnějšími pro použití v širokém teplotním rozsahu.

Transesterifikace:

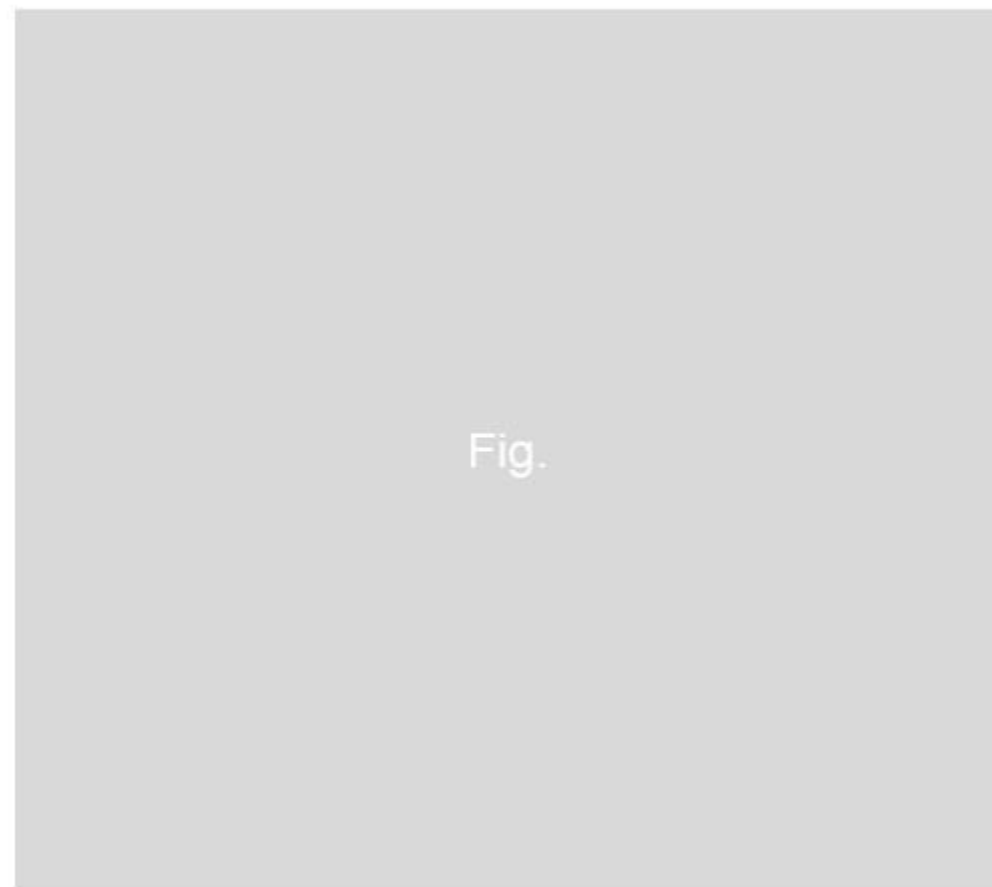
- Tento proces zahrnuje reakci rostlinných olejů nebo živočišných tuků s alkoholy (např. methanolem) za vzniku estery. Transesterifikace zlepšuje vlastnosti biolubrikantů, jako je bod tuhnutí, viskozita a tekutost při nízkých teplotách

Epoxidace:

- Epoxidace je proces, při kterém se do oleje přidává epoxidová skupina, což zlepšuje jeho oxidační stabilitu a poskytuje lepší přilnavost k povrchům kovů.

Polymerizace:

- U některých biolubrikantů se může provádět polymerizace, což zvyšuje viskozitu a zlepšuje jejich výkon při vysokých teplotách.



Amina Hamnas, G. Unnikrishnan (2023) – Bio-lubricants from vegetable oils: Characterization, modifications, applications and challenges – Review

Výzvy spojené s bio-lubrikanty

Vlastnosti při nízkých teplotách:

- Rostlinné oleje mají špatné vlastnosti při nízkých teplotách, stávají se zakalené, srážejí se a tuhnou kolem 10°C, což omezuje jejich použití v chladných prostředích.

Hydrolytický rozklad:

- Rostlinná maziva jsou náchylná k hydrolytickému rozkladu, zejména při vysokém obsahu esterových skupin. Přítomnost vlhkosti může vést k korozi a rozkladu esterů na kyseliny a olefiny, což ovlivňuje jejich výkon.

Tepelná stabilita a oxidace:

- Rostlinné oleje mají slabou stabilitu vůči oxidaci, náchylné k chemickému rozkladu při vysokých teplotách. To je zvláště problematické kvůli vysokému obsahu polynenasycených mastných kyselin

Cena

- Bio-lubrikanty jsou o **30-40 % dražší** než konvenční oleje. V některých zemích se silně spoléhají na dovoz olejů.

Fig.

Amina Hamnas, G. Unnikrishnan (2023) – Bio-lubricants from vegetable oils: Characterization, modifications, applications and challenges – Review

Příklady použití bio olejů

Bio-lubrikant	Aplikace	Vlastnosti
Pongamový olej	Antikorozní nátěry a aplikace v transformátorech	Při středním zatížení minimální třecí ztráty, nízké emise, nízká specifická spotřeba paliva a dobrá tepelná účinnost.
Olej z jatrofy	Bionafta	Vysoký VI, malá ztráta hmotnosti opotřebením.
Řepkový olej	Hydraulické kapaliny, aplikace v transformátorech, maziva	Zlepšené vlastnosti při nízkých teplotách, lepší oxidační stabilita a nízký koeficient tření.
Palmový olej	Kapaliny pro obrábění kovů (MWFs)	Vysoká viskozita, nízký koeficient tření a menší korozivita.
Slunečnicový olej	Bionafta, hydraulické oleje, motorové oleje, barvy, detergenty	Vysoký VI, vyšší bod vzplanutí než u standardních olejů, lepší mazivost, nižší odpar a nižší koeficient tření.
Kokosový olej	Motorové oleje	Lepší mazivost, nízký koeficient tření a vysoká odolnost proti opotřebením.
Kanolový olej	Převodové kapaliny, hydraulické kapaliny, penetrační oleje	Vysoký VI, vyšší bod vzplanutí než u standardních olejů, lepší mazivost, nižší odpar a nižší koeficient tření.
Lněný olej	Nátěry, laky, barvy	Vysoký VI, vyšší bod vzplanutí než u standardních olejů, lepší mazivost, nižší odpar a nižší koeficient tření.
Ricinový olej	Maziva, převodové oleje	Nízká těkavost, vysoké množství antioxidantů a nízká tvorba usazenin.

*Mazivost – schopnost maziva snižovat koeficient tření a opotřebením mezi dvěma povrchy v kontaktu.

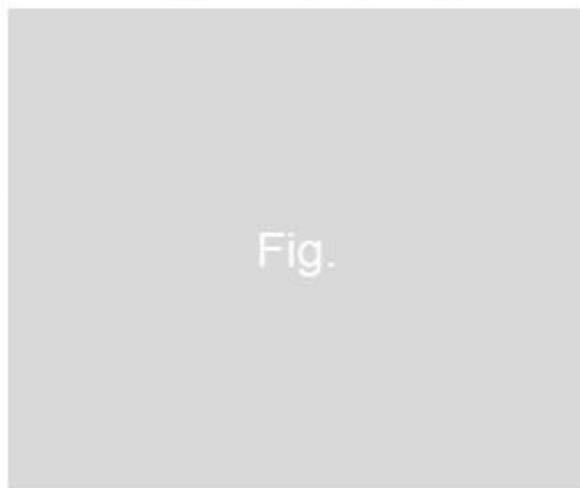
*VI – index viskozity

Inovativní systémy s biolubrikanty

- **Biolubrikanty** jako kyselina hyaluronová, fosfolipidy nebo mucin vykazují extrémně nízké tření v biologických systémech (lidské klouby); některé dosahují **superlubricity** ($\mu < 0,01$).
- **Hydratované biopolymery** (např. mucin, glykoproteiny) umožňují superlubrikaci ve vodném prostředí – klíčové pro biomedicínu a zelená maziva.
- **Hybridní systémy** kombinující biolubrikanty s **2D materiály** (grafen) vykazují vysokou výkonnost i ekologickou šetrnost.

Yun Long et al. (2022) – Mechanism of superlubricity of a DLC/Si₃N₄ contact in the presence of castor oil and other green lubricants

- **Ricinový olej** v kontaktu s **amorfními uhlíkovými povlaky** (DLC) na keramikách (Si₃N₄).
- Při **několika-nanometrové vrstvě** maziva lze dosáhnout **superlubricity** (součinitel tření $< 0,01$).
- Vysokým tlakem rozkládá olej na grafitické vrstvy a saturuje fragmenty H/OH, čímž se snižuje tření



Bio-plastická maziva

Bioplastická maziva jsou využívána v různých odvětvích, včetně železniční dopravy, potravinářství a obecného průmyslu, kde nahrazují tradiční maziva a přispívají k udržitelnějšímu provozu.

Základový olej (70–90 %)

- Rostlinné oleje: řepkový, slunečnicový, sójový, ricinový olej
- Syntetické estery: Vyrobené z přírodních zdrojů, jako jsou mastné kyseliny a alkoholy
- Recyklované oleje: Například oleje z použitých kuchyňských olejů nebo jiných odpadních zdrojů

Zahušťovadla olej (10–15 %)

- Přírodní polymery: celulóza, chitosan, deriváty celulózy (ethylovaná, methylovaná celulóza)
- Organické kyseliny a estery: kyselina 12-hydroxystearová nebo její deriváty
- Minerální látky: jílové minerály (bentonit) nebo oxid křemičitý

Aditiva:

- Antioxidanty: Zvyšují odolnost proti oxidaci (např. přírodní fenoly).
- Proti otěrová aditiva: Snižují tření a opotřebení (např. borové sloučeniny).
- Antikorozní aditiva: Chrání kovové povrchy před korozí.

Příklady bioplastických maziv:

Klüberbio ALO 32-4000: Syntetické, biologicky snadno odbouratelné mazivo na výhybky s vysokou odolností proti opotřebení a vymývání vodou.

INNOVATIVE SPECIALTY LUBRICANTS BIOGEL AP2: Průmyslové plastické mazivo na bázi rafinovaného řepkového oleje, vhodné pro široké spektrum průmyslových aplikací.



Bio-maziva vs standartní (stern-tube)

- Ložiska běží v olejové náplni (minerální nebo syntetický olej).
- Ložisko je obvykle bronzové nebo kompozitem.
- Olej cirkuluje v uzavřeném stern-tube prostoru a chladí se chladičem.
- Olej zároveň maže i těsnění a chrání kovové povrchy proti korozi.
- Lepší mazací film, vyšší životnost, nižší tření.
- **Nevýhoda:** riziko úniku oleje do moře – dnes často používány **biologicky odbouratelné oleje (EAL)** podle regulací (např. US EPA VGP).

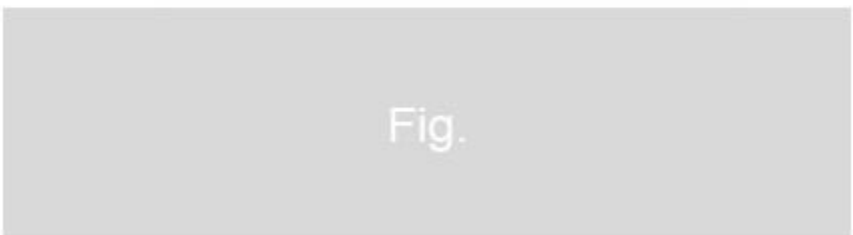
Cenové srovnání po dobu 25 letou

Panolin STERN TUBE LUBE 100 (bio-based EAL) vs. Mobil Stern Tube Lubricant



<https://fhdbearings.com/blog/stern-tube-bearings/>

Kluzná ložiska



Bio-maziva vs standartní (stern-tube)

Parametr	Hodnota	Poznámka
Objem náplně	1 500 l	typická velká nákladní loď
Životnost lodi	25 let	obchodní plavba
Interval výměny	5 let	při drydocku
Počet výměn	5x (vč. první)	roky: 0, 5, 10, 15, 20
Cena Panolin EAL	452 CZK/l.	bio-based syntetický ester
Cena Mobil Stern Tube Lubricant	394 CZK/l.	minerální olej
Servisní náklady výměny	31 500 CZK na výměnu	práce, filtrace, likvidace starého oleje

Položka	Panolin EAL	Mobil Stern Tube Lubricant
Celkový náklad (25 let)	3 500 000 CZK	3 100 000 CZK
Bio-based	>90 % bio-based	(minerální báze)
Biologická odbouratelnost	(>60 % OECD 301B)	(neplní VGP EAL)
Regulační compliance (VGP, VIDA)	Splňuje	Nutné doložit výjimku pro USA
Environmentální dopad při úniku	Nízký	Vysoký
Cena	Vyšší	Nižší
Studené starty	Vyžaduje správnou volbu viskozity	Velmi dobré

Shrnutí

Finančně: Mobil Stern Tube Lubricant je levnější o cca **400 000 CZK** za 25 let (při nezapočtení rizika úniku a pokut).

Regulačně a ekologicky: Panolin EAL je jistější volba pro provoz v oblastech s přísnými ekologickými pravidly (USA, EU přístavy s ESG požadavky).

Technicky: Mobil má velmi dobrou spolehlivost v náročných podmínkách (slaná voda, emulze), Panolin vyžaduje správnou specifikaci pro stejné výsledky.

Recyklace a obnovitelné zdroje

Rostoucí ekologická zátěž výrobků

- Výrobky mají stále vyšší energetickou a emisní stopu během výroby, přepravy i likvidace.
- Omezené zásoby surovin, především vzácných kovů a plastů.

Recyklace šetří výrazně energii oproti výrobě z nových surovin, které vyžadují těžbu a náročné zpracování. Například výroba hliníku z recyklátu spotřebuje až o 95 % méně energie. Tím recyklace šetří přírodní zdroje a snižuje emise, což pomáhá chránit životní prostředí.

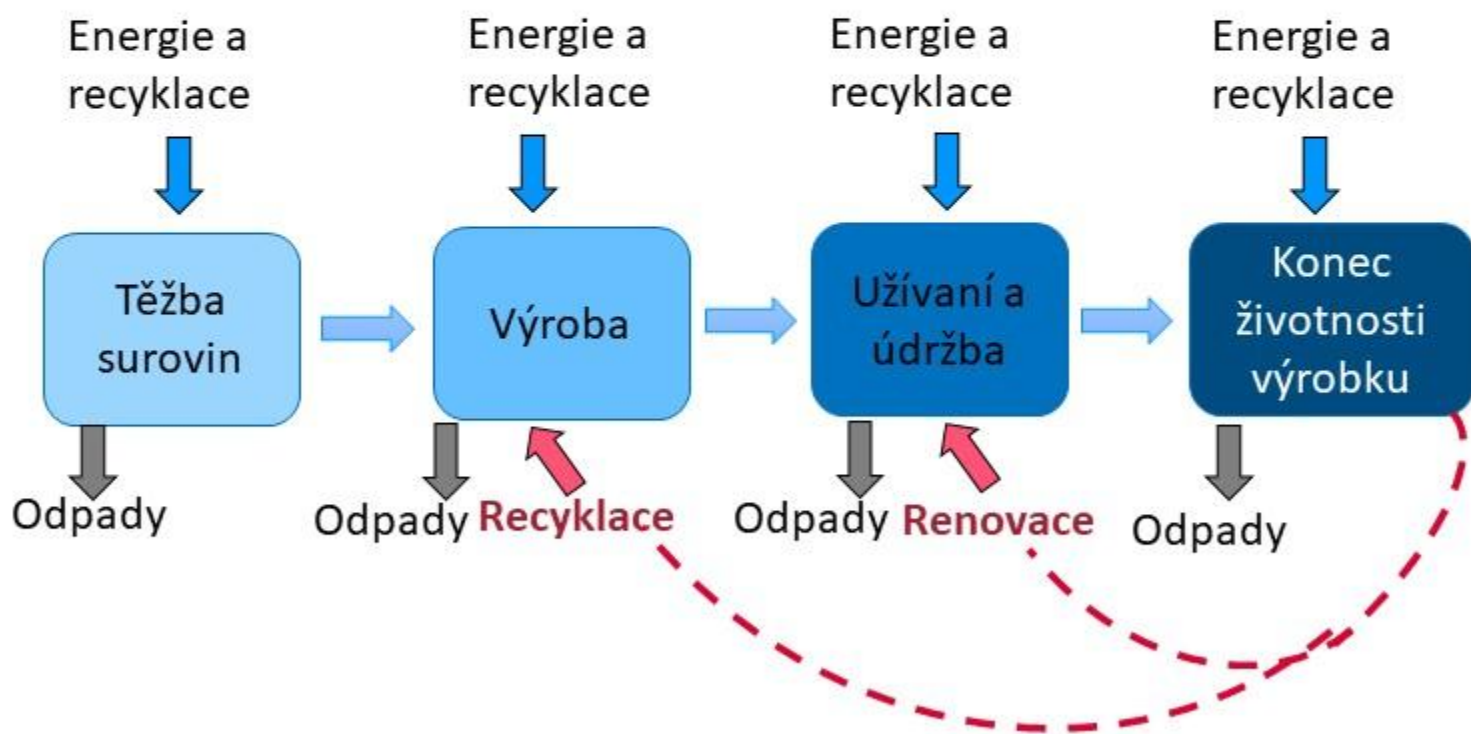
Fig.

<https://thundersaidenergy.com/downloads/recycling-global-overview/>

Fig.

Recyklace a obnovitelné zdroje

Životní cyklus výrobku:



Obecná míra recyklace:

- Hliník: až 95 %
- Ocel a železo: 90-95 %
- Sklo: 80-90 %
- Papír: 60-80 %
- PET plast: 50-70 %
- Baterie: 60-70 %
- Dřevo: 50-60 %
- Textil (bavlna, vlna): 40-50 %
- Elektronický odpad (e-waste): 30-40 %
- Plasty obecně: 10-30 %

Recyklace a obnovitelné zdroje

Výkup chytrého telefonu?

- Recyklací jednoho smartphonu lze ušetřit energii na výrobu nového zařízení až **35-50 %** oproti výrobě z nových surovin.
- Snižování odpadu a toxických látek - obsahují nebezpečné látky (rtuť, olovo, kadmium), které by při špatném likvidování ohrožovaly půdu a vodu.
- Snížení uhlíkové stopy při recyklaci jednoho telefonu může být kolem 30–70 kg CO₂ ekvivalentu (záleží na modelu a způsobu recyklace).

V telefonu je zlata kolem 0,03 gramu, což je sice málo, ale oproti třeba 1-3 gramům zlata na tunu rudy je to mnohem koncentrovanější zdroj.

- Zlato (0,034 g)
- Stříbro (0,34 g)
- Měď (15 g)
- Kobalt, palladium...

Fig.

	Těžba z rudy	Recyklace z elektroniky
Zlato (1 g)	~500–1500 kWh energie	~50–100 kWh energie
Kobalt (1 kg)	~40 000 l vody, toxický odpad	~10 % vody a odpadu
Měď (1 kg)	~20–40 MJ energie	~5 MJ energie
CO ₂ emise	Vysoké (např. zlato: 20 kg CO ₂ /g)	O 90–95 % nižší při recyklaci

Recyklace a obnovitelné zdroje

Osobní automobil?

- Celková míra recyklace moderního automobilu dosahuje až 85–95 %
- Každý rok se v Evropě recykluje více než 8 milionů vozidel – z nich se získá tolik oceli, že by to stačilo na postavení více než 100 Eiffelových věží.



Kategorie	Použití	Recyklovatelnost	Poznámky
Kovy	Ocel a železo (karoserie, rám, podvozek)	95–100 %	Snadno recyklovatelné v hutích
	Hliník (motory, disky, části karoserie)	90–95 %	Vysoká míra recyklace
	Měď (kabeláž, elektromotory, alternátory)	95–100 %	Důležitá pro výrobu vodičů a elektrických komponent.
Plasty	Nárazníky, interiér, palivové nádrže, světlomety	20–50 %	Některé plasty lze recyklovat, směsné složení nebo příměsi mohou recyklaci komplikovat.
Sklo	Okna, čelní sklo	90 %	Recyklaci ztěžují vrstvy laminace
Kapaliny	Palivo, oleje, chladicí kapaliny, brzdová kapalina	Omezeně	Lze regenerovat nebo ekologicky likvidovat, motorový olej se často regeneruje na nové mazivo.
Textilie a pěny	Sedadla, čalounění	20–40 %	Obtížně recyklovatelné

Recyklace olejů a kapalin

	Recyklovatelnost	Funkčnost po recyklaci	Poznámka
Motorové oleje	75–90 %	Velmi dobrá	Nutná re-rafinace a odstranění kontaminantů
Průmyslové mazací oleje	60–85 %	Dle typu	Může se použít jako palivo nebo znovu jako mazivo
Hydraulické kapaliny	70–90 %	Dobrá	Biologicky odbouratelné se recyklují hůře
Chladicí kapaliny (řezné oleje)	50–70 %	Omezená	Emulze je třeba separovat a přečistit
Solventy	až 95 %	Velmi dobrá	Destilací lze získat téměř čisté rozpouštědlo
Chladicí kapaliny pro klimatizační systémy	až 99 %	Výborná	Nutná filtrace, tlakování, ekologický význam

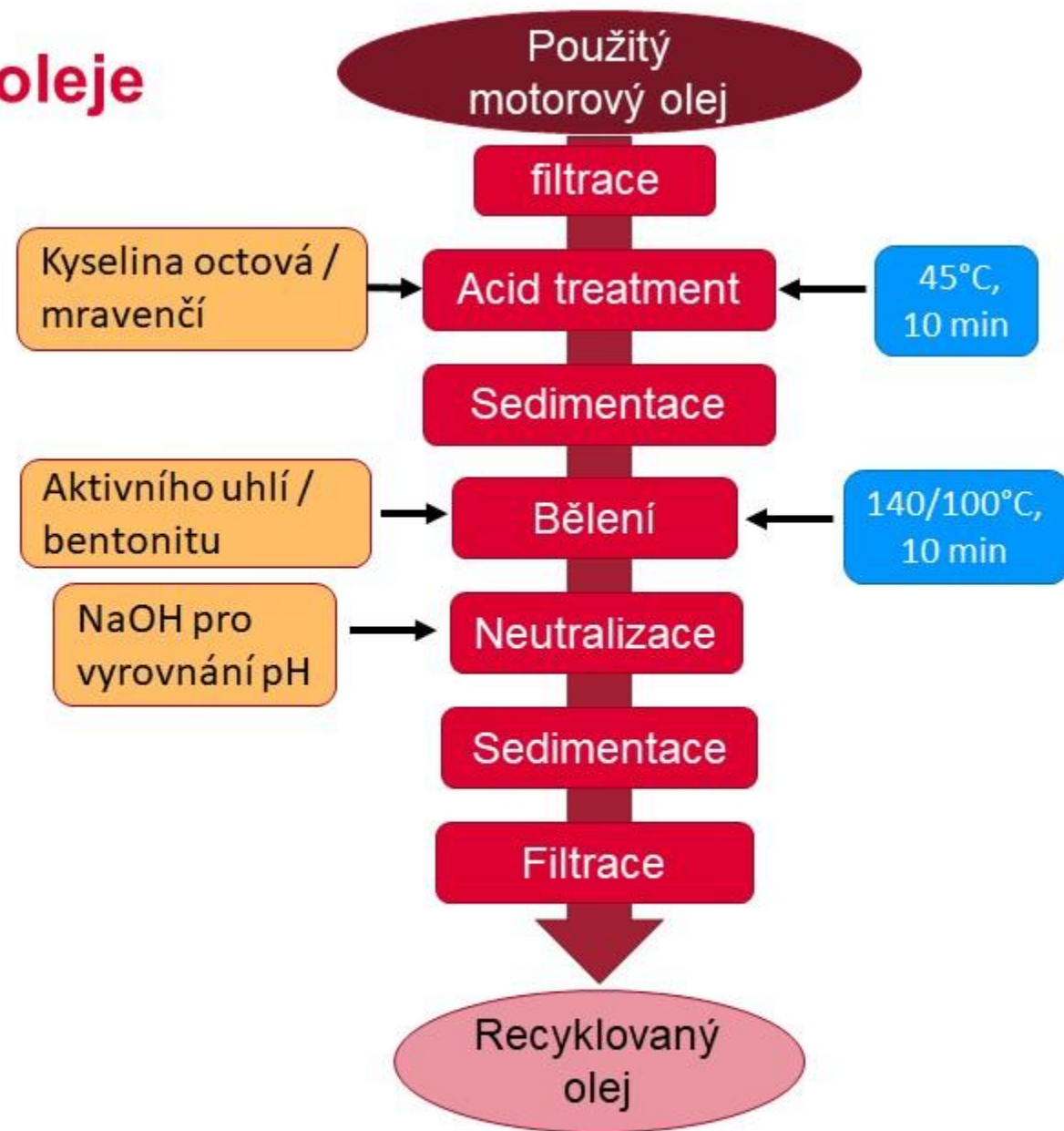
Fig.

Recyklace motorového oleje

Čerství x Použitý motorový olej

- Při vysokých teplotách dochází k oxidaci oleje, což vede ke vzniku kalů a oxidů.
- Aditiva jsou spotřebovaná nebo degradovaná
- Obsahují otěrové částice, které urychlují další opotřebení
- Také obsahují nečistoty ze spalování paliva, které způsobují zahušťování oleje a zvýšenou kyselost

Fig.

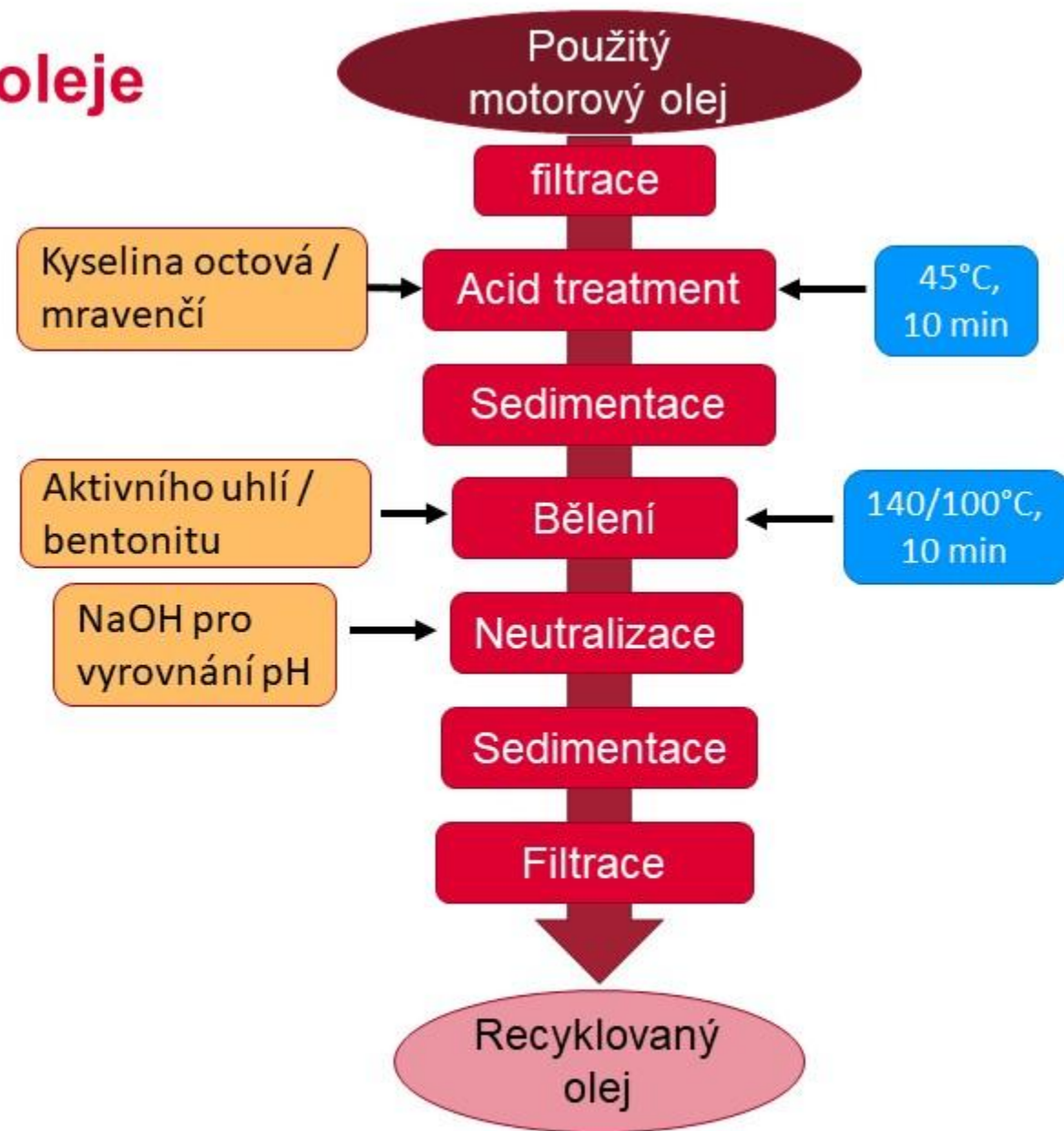


Recyklace motorového oleje

Čerství x Použitý motorový olej

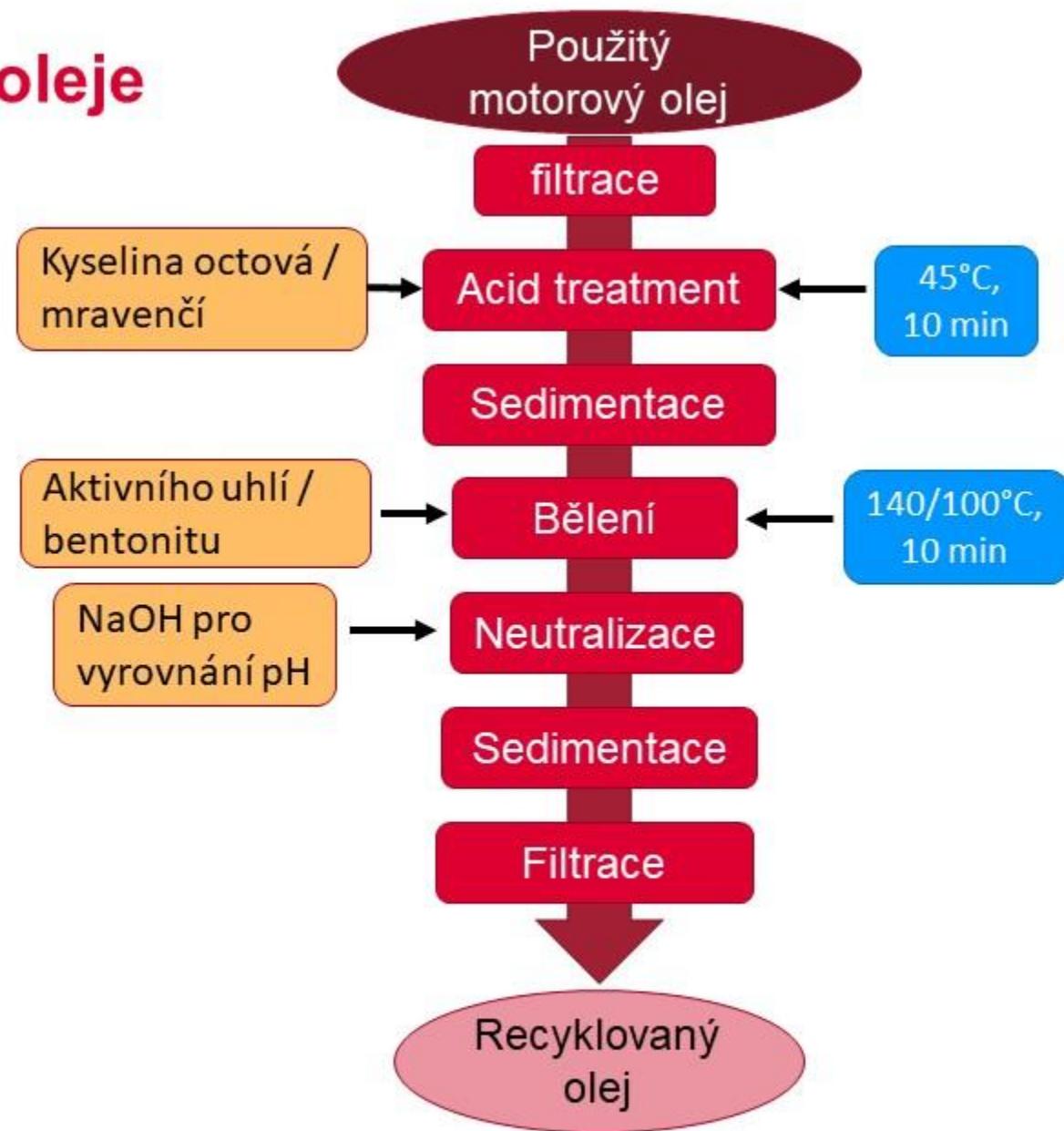
- Při vysokých teplotách dochází k oxidaci oleje, což vede ke vzniku kalů a oxidů.
- Aditiva jsou spotřebovaná nebo degradovaná
- Obsahují otěrové částice, které urychlují další opotřebení
- Také obsahují nečistoty ze spalování paliva, které způsobují zahušťování oleje a zvýšenou kyselost

Fig.



Recyklace motorového oleje

- **Neutralizace:** přidání zásady, např. hydroxidu sodného, k odstranění přebytečných kyselin.
- **Filtrace a adsorpce:** použití aktivního jílu nebo uhlí pro odstranění zbývajících nečistot.
- **Destilace:** slouží k získání regenerovaného základového oleje.



Recyklace motorového oleje

- Do recyklovaného základového oleje se přidávají nové aditivní balíčky (proti oxidaci, opotřebení, detergenty atd.)
- Recyklační procesy umožňují vyrábět oleje srovnatelné s produkty z primární ropy

Aplikace:

- **Motorové oleje pro spalovací motory**

Po přidání nových aditiv lze recyklovaný olej opět použít v automobilech, zejména v komerční dopravě, vozidlech státní správy a ve vozových parcích.

- **Průmyslová maziva**

Slouží jako základ pro výrobu hydraulických olejů, převodových kapalin a dalších typů maziv.

- **Alternativní palivo**

Nižší kvalita recyklovaného oleje může být využita jako palivo pro průmyslové kotle a spalovací zařízení.

- **Maziva pro méně náročné aplikace**

Používá se v zemědělských strojích nebo technice s nižšími požadavky na kvalitu maziva.

- **Ekologické využití díky moderní technologii**

pokročilé recyklační procesy umožňují vyrábět oleje srovnatelné s produkty z primární ropy, což podporuje cirkulární ekonomiku.

Fig.

Fig.

Biodegradabilní plasty v tribologii

Většina plastů používaných pro tribologické účely biodegradabilní není, protože jejich vývoj cílí na dlouhodobou mechanickou a chemickou stabilitu – což je v přímém rozporu s rychlým rozkladem v přírodě.

Příklady **nebiodegradabilních** materiálů:

- **PTFE** (polytetrafluorethylen) – extrémně nízký koeficient tření, výborná chemická odolnost, omezená pevnost a únosnost; vhodný pro těsnění, kluzné fólie.
- **PE-UHMW** (ultra-high molecular weight polyethylene) – nízké tření, odolnost proti abrazi, používá se na dopravníky, vodící lišty.
- **PEEK** (polyetheretherketon) – vysoká mechanická pevnost, odolnost do 250–300 °C, často plněn uhlíkovými vlákny nebo PTFE.
- **PPS** (polyfenylensulfid) – dobrá odolnost proti opotřebení a chemikáliím, stabilní při teplotách do cca 220 °C.
- **POM** (polyoxymethylen, acetal) – nízké tření, dobrá tuhost a rozměrová stabilita, vhodný na ozubená kola, ložiskové vložky

Použití:

- Kluzná ložiska (samomazná, bezúdržbová)
- Vodící lišty dopravníků a manipulačních zařízení
- Radiální a axiální ložiska pro nízké/střední zatížení
- Lineární vedení (vodící lišty, kolejnice, kluzné bloky)
- Ozubená kola (tichý chod, nízké tření, nižší hmotnost)
- Povlaky a vložky z PTFE
- Opěrné lišty pro těžké pásové dopravníky

<https://www.kmsbearings.com/standard-bearings/plastic-radial-ball-bearings.html>



Uvolňování mikro plastů
do prostředí, zejména
během dlouhodobého
opotřebení.

Biodegradabilní plasty v tribologii

Srovnání biodegradabilních a nebiodegradabilních plastů pro tribologii:

Vlastnost	Biodegradabilní plasty (PLA, PBS, PBAT, PHA, biokompozity)	Nebiodegradabilní plasty (PA, POM, UHMWPE, PTFE, PEEK)
Cena (Kč/kg)	obvykle 75–175 Kč, některé (PHA, bio-PBS) > 175 Kč; vyšší než běžné technické plasty	běžně 50–125 Kč pro PA, POM, UHMWPE; špičkové PEEK 1500–2000 Kč
Koeficient tření (suchý)	vyšší, typicky 0,3–0,6 proti oceli (bez mazání); s plnivý možné snížení na ~0,15–0,3	nižší, často 0,05–0,25 (UHMWPE, PTFE)
Opotřebení / životnost	nižší odolnost, omezená PV (tlak × rychlost); citlivost na teplotu > 60–80 °C; kompozity a plniva zlepšují	vysoká odolnost vůči opotřebení; vhodné i pro vysoké PV; často provozní teploty > 150 °C
Teplotní stabilita	obvykle max. 60–120 °C (PLA křehne nad 60 °C)	80–300 °C podle typu (PA, POM, UHMWPE, PEEK)
Chemická odolnost	dobrá vůči organickým rozpouštědlům; horší vůči vlhkosti a hydrolyze	velmi dobrá, zejména u PTFE, UHMWPE a PEEK
Ekologický profil	obnovitelné zdroje, biodegradace v průmyslovém kompostu; nižší CO ₂ stopa (pokud z bio-surovin)	dlouhá životnost, recyklovatelnost (mechanická/chemická), ale bez biodegradace
Typické aplikace v tribologii	nízkozatížená kluzná pouzdra, vodící lišty, malé ozubené převody, biomedicína (dočasné implantáty), vodou mazané ložisko v lehkých aplikacích	kluzná ložiska, vysoce zatížené ozubení, těsnění, vodící lišty pro těžký provoz, letectví, kosmické aplikace

Biodegradabilní plasty v tribologii

Srovnání biodegradabilních a nebiodegradabilních plastů pro tribologii:

- **Biodegradabilní plasty:** ekologicky příznivé, ale **mechanicky a tribologicky limitované**; vhodné pro lehčí a krátkodobé aplikace. Možnost degradace materiálu během používání, což může ovlivnit jeho výkon. Cena obvykle vyšší než u běžných plastů stejné třídy.
- **Nebiodegradabilní plasty:** lepší **poměr cena/výkon** pro náročné tribologické aplikace; extrémní odolnost a delší životnost, ale bez biologického rozkladu.

Biodegradabilní kluzné ložiska v zdravotnických přístrojích

Materiál: PLA/PTFE nebo PHA/PTFE kompozity

Aplikace: Jednorázové nebo krátkodobé kluzné komponenty, např. pohyblivé části laboratorních pipet, dávkovačů nebo katétrů.

Výhoda proti klasickým plastům: Po použití lze výrobky bezpečně zlikvidovat, minimalizuje se plastový odpad a riziko kontaminace.

Automobilový průmysl

•Součástky / mechanismy:

- **Interiérová kluzná vedení** u sedadel, posuvné lišty a držáky panelů.
- **Ložiska ventilů nebo vícekotoučové kluzné systémy** v doplňkových mechanismech (např. posuvné kryty, odklápěcí prvky).

•**Proč biodegradabilní:** krátkodobé díly, snížení ekologické stopy při výrobě a recyklaci, kde není nutná dlouhodobá mechanická odolnost

Recyklace - závěr

Recyklace = Šance i nutnost

- S rostoucími cenami surovin stoupá hodnota recyklovaných materiálů
- Efektivní recyklační procesy snižují výrobní náklady a zvyšují konkurenceschopnost Firmy, které investují do recyklace
- Investice do moderních technologií recyklace přináší dlouhodobé úspory a lepší návratnost
- Celosvětově se recykluje přibližně 30-35 % všech vyrobených materiálů (kovy, plasty, papír atd.)
- Podle dostupných dat je recyklace průmyslových olejů (včetně maziv) na světové úrovni kolem 50–70 % , tedy Celosvětově se tedy ročně recykluje přibližně 20 až 35 milionů tun průmyslových olejů a maziv

Fig.

Nízkoenergetické technologie

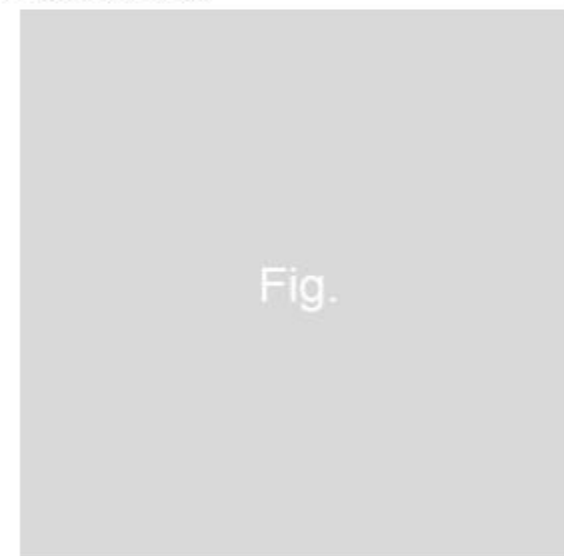
Rostoucím požadavek ke snižování emisí CO₂ => vývoj nízkoenergetických tribologických technologií. Často jsou až nutností pro moderní průmyslové aplikace.

Aplikace:

- **Automobilový průmysl** – Nízko třecí povlaky na pístních kroužcích a ložiskách mohou snížit spotřebu paliva až o 5 %.
- **Výroba elektrické energie** – Větrné turbíny s optimalizovaným mazáním mají delší životnost a vyšší účinnost.
- **Kosmické aplikace** – Samomazné materiály eliminují potřebu kapalných maziv v extrémních podmínkách.
- **Těžký průmysl** – Pokročilé povlaky a maziva snižují energetické ztráty ve velkých strojních celcích.

Příklady:

- Nízko-třecí povlaky (DLC, MoS₂)
- Samomazné materiály (grafit, PTFE)
- Nano-aditiva v mazivech
- Superlubricita
- Magnetická a elektrostatická levitace



Nízkoenergetické technologie

Vlak | Velmi vysoké (40–70 mil. Kč) | Vysoké (součást provozních nákladů) | Vysoké (energie, servis) | Vysoká investice, významné úspory díky efektivním technologiím a dlouhé životnosti. Náklady na opravy a provoz jsou podstatné.

Osobní auto | Nízké až střední (0,4–1,2 mil. Kč) | Střední (častější opravy, údržba) | Střední až vysoké (palivo, servis) | Nižší pořizovací náklady, vyšší frekvence oprav a provozu znamená rychlý růst nákladů. Úspory v provozu mají rychlý dopad.

Větrná turbína | Velmi vysoké (60–100 mil. Kč) | Střední až vysoké (specializovaná údržba, náročné opravy) | Nízké (žádné palivo, údržba) | Vysoké počáteční investice, nízké provozní náklady, drahé, ale méně časté opravy. Dlouhodobá návratnost investice.

Fig.

Velmi drahá technika s **dlouhou životností** (30+ let). Spotřebovávají velké množství energie **Nízko třecí povlaky** (např. DLC, MoS₂) Prodloužit servisní intervaly. Omezit nákladné výluky kvůli poruchám.

Zelená tribologie

Fig.

Ve světě jich je **více než 1,4 miliardy** — i malá úspora se násobí. Náklady na údržbu a spotřebu tvoří velkou část celkových nákladů. Nižší spotřebu paliva a opotřebení dílů

Fig.

Extrémně drahé opravy kvůli špatné přístupnosti. Dlouhodobý bezporuchový provoz = klíč k ekonomické návratnosti. Povlaky mohou: Zlepšit životnost ložisek a omezení poruchy, které by vedly k odstávce.

Nízko-třecí povlaky

- **DLC (Diamond-Like Carbon)** – Používá se v automobilovém, leteckém a strojírenském průmyslu pro součástky vystavené vysokému opotřebení, například vačkové hřídele, pístní kroužky nebo ložiska.
- **MoS₂ (Molybdenum Disulfide)** – Vhodné pro vakuové a kosmické aplikace.
- **WS₂ (Tungsten Disulfide)** – Podobné MoS₂, ale s lepšími vlastnostmi při vysokých tlacích a teplotách.
- **TiN (Titanium Nitride)** – Často používaný na nástroje a formy.
- **CrN (Chromium Nitride)** – Odolný vůči opotřebení a korozi, používá se v automobilovém a lékařském průmyslu.
- **PTFE (Polytetrafluoroethylene, Teflon)** – Extrémně kluzký povlak vhodný pro ložiska a skluzné plochy.

Materiál	Koeficient tření	Tvrдость (HV)	Způsob výroby
DLC	0,05–0,3	1 500–3 000	PVD, CVD
MoS ₂	0,01–0,1	200–400	PVD, sprej, elektrostatické nanášení
WS ₂	0,03–0,07	300–500	PVD, CVD, práškový nástřik
TiN	0,4–0,6	2 000–2 500	PVD, CVD
CrN	0,4–0,7	1 500–2 000	PVD, CVD
PTFE	0,04–0,1	<10	Sprej, elektrostatické nanášení

PVD (Physical Vapor Deposition) – zahrnuje depozici materiálu na povrch substrátu pomocí fyzikálních procesů jako je odpařování nebo spékání.

CVD (Chemical Vapor Deposition) – chemická reakce v plynném prostředí, která umožňuje depozici uhlíkových povlaků na substrátu.

Nízko-třecí povlaky (DLC)

- Struktura DLC obsahuje hybridizaci uhlíku sp^2 (grafitická složka) a sp^3 (diamantová složka)
- Koeficient v rozmezí 0,05–0,3.
- Tloušťka povlaků se pohybuje od 1 do 5 mikrometrů

Použití:

- Vačkové hřídele a vahadla motorů
- Pístní kroužky a čepy
- Vstřikovací systémy
- Ložiska turbín a kompresorů
- Kluzná pouzdra a ventily
- Mechanismy v satelitech
- Řezné a tvářecí nástroje
- Formy pro vstřikování plastů
- Implantáty (vyšší biokompatibilita a odolnost)
- Chirurgické nástroje (odolnost vůči opotřebení a sterilizaci)
- Komponenty kol a motocyklů (nižší tření, delší životnost)

<https://www.wolf-gruppe.com/en/coating-parts-2/dlc-coating/>

Fig.

Fig.

<https://www.calicocoatings.com/coatings/dlc-coatings/>

Samomazné materiály (Grafit, MOs_2 , PTFE)

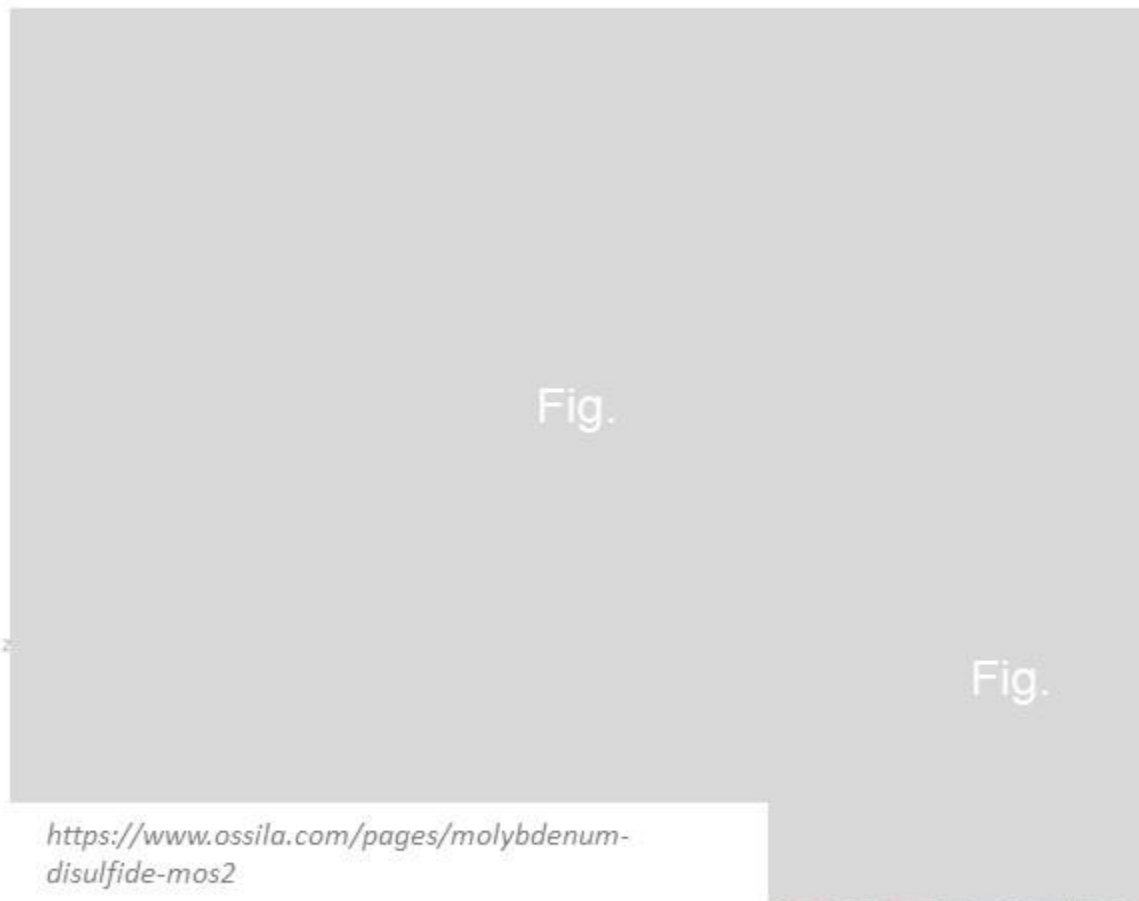
Schopnost snižovat tření mezi styčnými povrchy, díky specifické mikrostruktuře materiálu, která umožňuje vytvoření kluzké vrstvy na povrchu při mechanickém zatížení.

1. Vrstvová struktura (např. grafit, MoS_2 , WS_2)

- Tyto materiály mají krystalovou strukturu složenou z vrstev atomů spojených slabými van der Waalsovými silami.
- Pod zatížením se vrstvy snadno od sebe oddělují a vytvářejí kluzkou mezivrstvu, která snižuje tření.

2. Nízká koheze a přilnavost (např. PTFE)

- PTFE má mimořádně nízkou povrchovou energii proto se na něj obtížně lepí jiné látky a zároveň se snadno posouvá po jiných površích.
- Polymery jako PTFE nebo UHMWPE (ultra vysokomolekulární polyetylen) vytvářejí mezi styčnými plochami „mazací film“, který snižuje tření.



Samomazné materiály (grafit, MoS₂, PTFE)

Uhlíková forma a MoS₂

- **Ložiska a kluzná pouzdra** – například v turbínách, pecích, čerpadlech a průmyslových ventilátorech. Povlaky u umožňují fungování ložiska bez maziva i při vysokých teplotách (např. nad 500 °C).
- **Těsnění a pístní kroužky** – grafitová těsnění se používají v parních a plynových turbínách, protože odolávají vysokým teplotám a chemikáliím.
- **Elektromotory – uhlíkové kartáče**
- **Kosmické aplikace** – díky samomazné vrstvě se grafitové materiály používají v ložiscích a pohyblivých částech satelitů

PTFE (Teflon)

- **Kluzná ložiska a vedení** – například v automobilovém průmyslu (ložiska podvozků, tlumiče), v průmyslových strojích nebo medicínských zařízeních (kloubní náhrady).
- **Těsnění a ventily** – díky své chemické odolnosti se PTFE těsnění používají v chemickém a farmaceutickém průmyslu, kde musí odolávat agresivním látkám.
- **Povlaky kuchyňského nádobí** – zabraňují přilnavosti potravin a umožňují snadné čištění.
- **Biomedicína** – používá se v chirurgických nástrojích nebo cévních protézách kvůli biokompatibilitě a chemické inertnosti.

Grafit, MoS₂ i PTFE se často používají jako **aditiva** v mazivech nebo jako **výplňové materiály** pro zlepšení vlastností



Fig.

Nano-aditiva A 2D materiály v mazivech

Nano-aditiva: malé částice (obvykle nanometry), které se přidávají do maziv s cílem zlepšit jejich výkon. Mezi běžné typy nanoaditiv patří částice oxidu kovů, uhlíkových nanotrubiček, nanostrukturovaného grafenu nebo MoS₂ (disulfid molybdenu).

Jak fungují:

1. **Tvořit ochranné vrstvy** na povrchu třecích materiálů, což snižuje přímý kontakt mezi kovovými povrchy a tím i tření.
2. **Zlepšení nosnosti maziva:** schopnost maziva zůstat mezi třecími povrchy i při vysokých tlacích. Malé částice mohou pomáhat oddělit třecí povrchy a pomáhají zaplnit nepravidelnosti, čímž se snižuje jejich potencionální tření.
3. **Chemické interakce:** Některá reagují s povrchy, aby vytvořila stabilní tenkou vrstvičku, která působí jako bariéra proti přímému kontaktu. Tato vrstvička redukuje tření a zároveň chrání proti opotřebení a korozi.
4. **Zlepšení tepelné stability:** zlepšují tepelnou stabilitu maziva



Fig.



Fig.

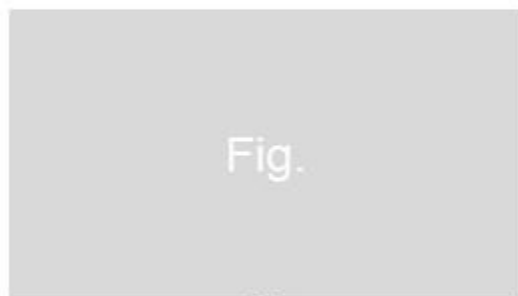
Liu et al., Effects of Nanoadditives on the Anticorrosion Performance of Nanocomposite Coatings, ACS Omega, 2023

Nano-aditiva v mazivech

- a) Válcovací mechanismus
- b) Opravný mechanismus
- c) Leštící mechanismus
- d) Ochranný film



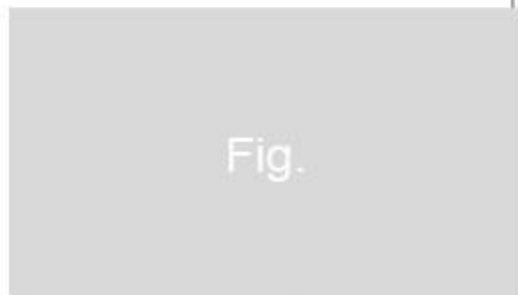
(a)



(b)



(c)



(d)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319324228#f0015>

Nejčastější nano-aditiva:

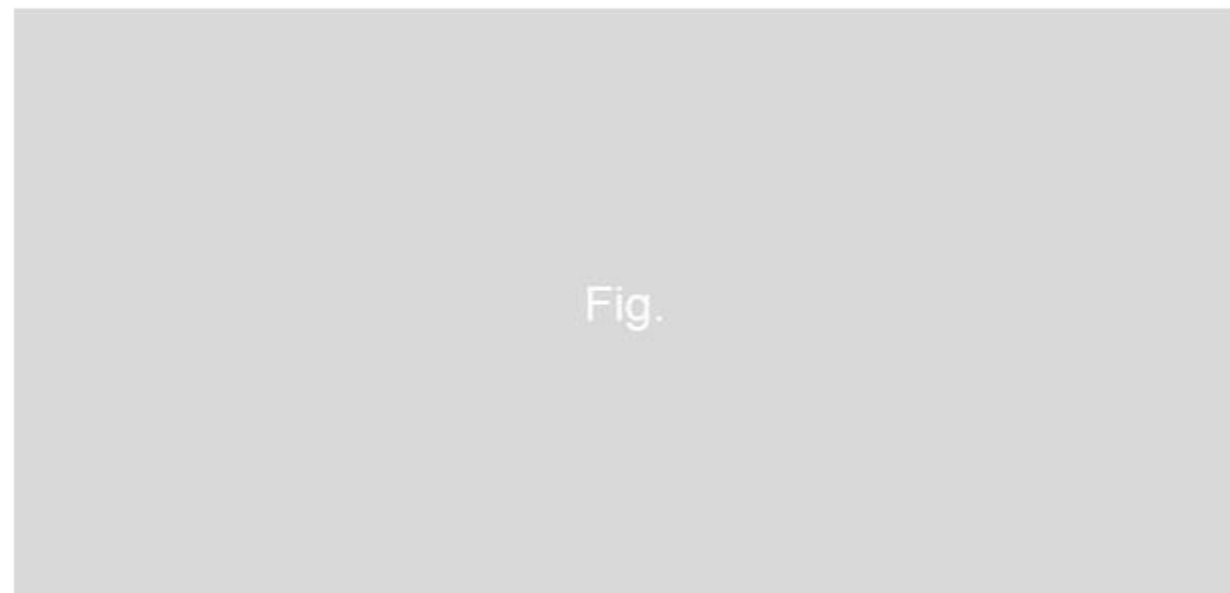
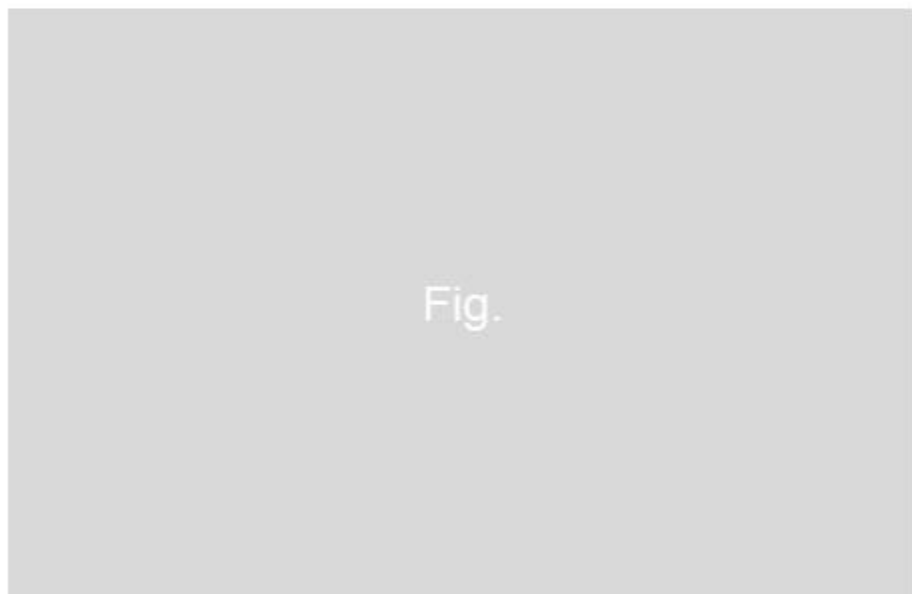
Nanoaditivum	Vlastnosti
MoS ₂	Snižuje tření a opotřebení, tvoří kluzné vrstvy mezi povrchy
Grafen	Zvyšuje stabilitu a odolnost při vysokých teplotách a tlacích
Uhlíkové nanotrubičky (CNT)	Zvyšují nosnost maziv, stabilitu při vysokých teplotách
Al ₂ O ₃	Zvyšuje odolnost proti opotřebení a korozi
TiO ₂	Stabilizuje maziva a zlepšuje výkon při vysokém tlaku
ZnO	Zlepšuje tribologické vlastnosti a ochranu proti korozi
WS ₂	Snižuje tření a opotřebení
CuO	Zlepšuje mazací a snižuje opotřebení
SiO ₂	Zvyšuje stabilitu maziv při vysokých teplotách
Fullereny	Snižují tření

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnm.4c01347>

Superlubricita

Koeficient tření pod 0,01

- Strukturální superlubricita, elasto-hydrodynamická superlubricita, mechanická superlubricita, mezimolekulární superlubricita
- **Vrstvené materiály:** Grafen, Grafit, MoS₂, WS₂, NbSe₂
- **Nanočásticové materiály:** Nanodiamanty, Mxeny, C60
- **Povlaky s nízkou adhezí:** DLC, Teflon
- **Kapalné a hybridní systémy:** Iontové kapaliny, glycerol s vodou



Chen & Li, Superlubricity of Carbon Nanostructures, 2020

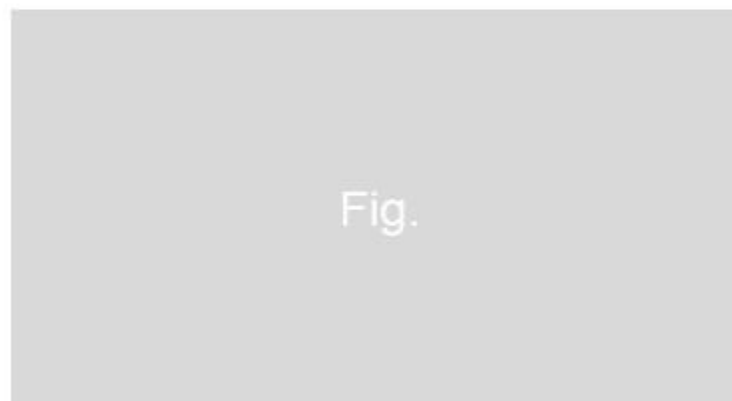
Aplikace superlubricity

Valivé ložisko mazané plastickým mazivem x Valivé ložisko s DLC povlakem mazané glycerolem

Björling, M. & Shi, Y. (2019). DLC and Glycerol: Superlubricity in Rolling/Sliding Elastohydrodynamic Lubrication. Tribology Letters, 67(1).

Parametr	Tradiční mazivo	DLC + glycerol
Životnost ložiska	10 let	20 let
Pořizovací cena ložiska	2 000 Kč	2 000 Kč
Povlak	–	4000 Kč
Mazivo / doplňování	100 Kč	100Kč
Celkové náklady materiálu	2180 Kč	6100 USD
Koeficient tření	0,02–0,04	<0,01
Energetická úspora	0 %	~50 %
Technický přínos	Standardní	Superlubricita, menší opotřebení

- DLC + glycerol má vyšší počáteční náklady, ale životnost ložiska je prakticky dvojnásobná.
- Nižší tření = významné úspory energie/paliva, menší opotřebení komponent, vhodné pro kritické aplikace (např. automobil, větrné turbíny, kosmický průmysl)



<https://aptbearing.com/dlc-coated-ball-bearings/>

- **Odhadni** třecí moment z katalogu výrobce nebo výpočtem.
- **Spočítej** úhlovou rychlost ω otáček.
- **Vypočítej** ztrátový výkon
- **Převeď** na energii za rok (podle počtu hodin provozu).
- **Vynásob** cenou kWh → dostaneš finanční ztrátu

Aplikace Superlubricity

Fig.

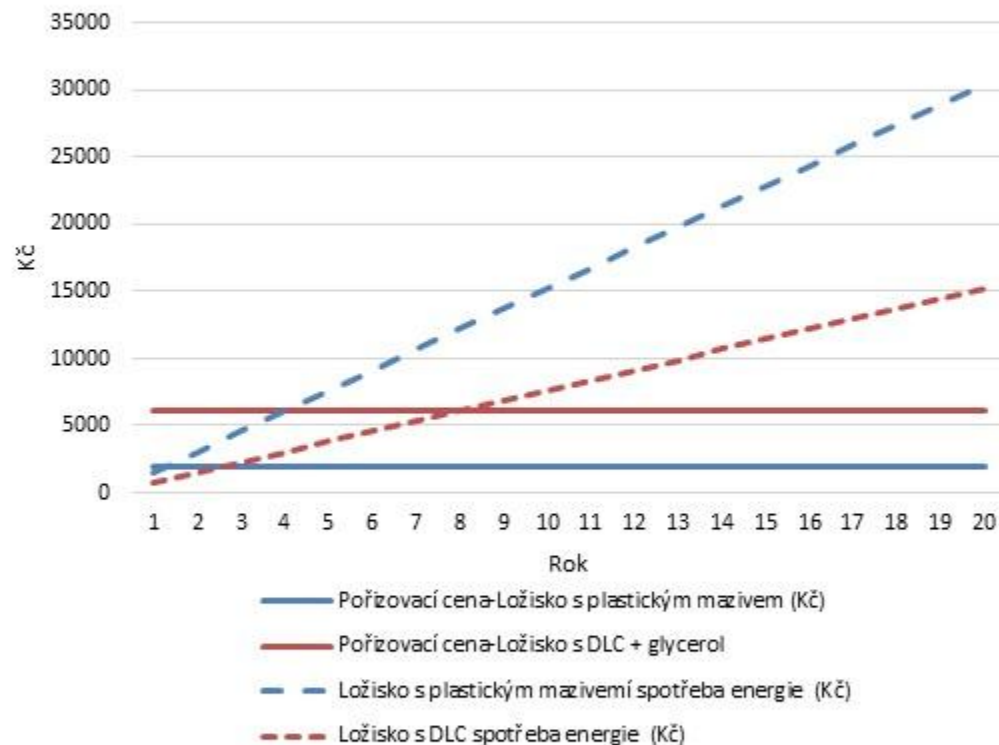
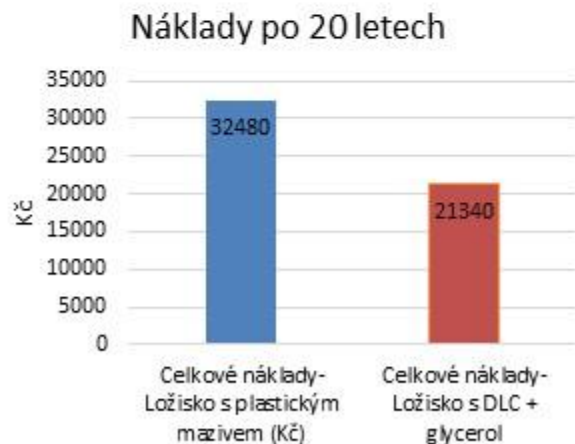
Valivé ložisko mazané plastickým mazivem x Valivé ložisko s DLC povlakem mazané glycerolem

Střední otáčky (1500 ot/min)

Nepřetržitý provoz (8 760 h/rok)

7,62 Kč/kWh (Konstatní, ale reálně bude narůstat)

- DLC + glycerol má vyšší počáteční náklady, ale i životnost se zdvojnásobí.
- Energetické ztráty se sníží zhruba o polovinu, což výrazně snižuje celkové provozní náklady a environmentální dopad.



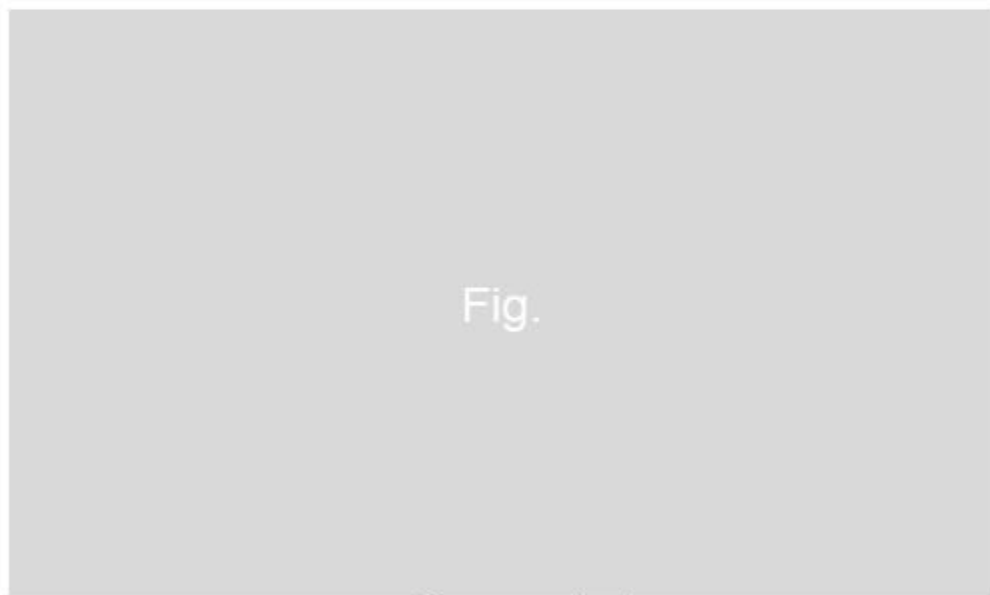
Magnetická a elektrostatická levitace

Tyto technologie umožňují bezkontaktní pohyb mezi povrchy, čímž výrazně snižují opotřebení a energetické ztráty.

- **Elektromagnetická levitace** – využívá aktivní elektromagnety ke generování síly.
- **Supravodivá levitace** – založená na Meissnerově efektu, kdy supravodič vytlačuje magnetické pole a udržuje objekt ve vznášení.

Příklady:

- Magnetická ložiska – používaná v přesných strojích, turbínách, kosmických systémech.
- Magnetické pohony – eliminují tření v lineárních a rotačních mechanismech.
- Magneticky levitující dopravní systémy – vysokorychlostní MagLev vlaky.



<https://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/maglev-rychlavlaky>



<https://www.indiamart.com/proddetail/turbo-molecular-pump>

Monitorování a diagnostika

Monitorování a diagnostika tribologických systémů jsou klíčové pro predikci opotřebení, prevenci poruch a optimalizaci mazání. Moderní technologie umožňují sledovat stav maziv, tření, vibrací a opotřebení v reálném čase, což vede ke snížení nákladů na údržbu a prodloužení životnosti strojů.

Vibrační diagnostika – sleduje změny vibrací v ložiskách a převodech, které mohou indikovat opotřebení, kavitaci nebo vznik mikrotrhlin.

Akustická emise (AE) – zachytává ultrazvukové signály generované třením a poškozením povrchu.

Termografie – využívá infračervené kamery ke sledování nárůstu teploty způsobeného zvýšeným třením.

Sledování změn elektrických veličin – užitečné například při hodnocení mazacího filmu v EHL kontaktu.

Tribodiagnostika maziva – analýza složení maziva, velikosti a typu opotřebinových částic, oxidačních změn nebo kontaminace.

<https://www.cbmpartners.com/services/condition-monitoring/>

Fig.

Fig.

Vibrační diagnostika

Vibrační diagnostika se zakládá na měření a analýze vibrací pomocí senzorů (akcelerometrů). Každý mechanický systém má své přirozené frekvence a charakteristické vibrace. Pokud dojde k opotřebením, nesprávnému mazání nebo jiným anomáliím, vibrace se změny, což lze detekovat a analyzovat.

Hlavní kroky vibrační diagnostiky:

- Sběr dat – Měření vibrací pomocí akcelerometrů nebo laserových vibrometrů.
- Spektrální analýza – Převod signálu z časové oblasti do frekvenční oblasti pomocí FFT (Fast Fourier Transform).
- Identifikace poruch – Porovnání naměřených dat se standardními vzory chování nebo modely opotřebením.
- Interpretace výsledků – Na základě změn ve frekvencích a amplitudách se stanoví možné příčiny problémů.

Co se k vibrační diagnostice používá:

- Sběr dat – Měření vibrací pomocí akcelerometrů nebo laserových vibrometrů.
- Spektrální analýza – Převod signálu z časové oblasti do frekvenční oblasti pomocí FFT (Fast Fourier Transform).
- Identifikace poruch – Porovnání naměřených dat se standardními vzory chování nebo modely opotřebením.
- Interpretace výsledků – Na základě změn ve frekvencích a amplitudách se stanoví možné příčiny problémů.

Vibrační diagnostika

- **Diagnostika valivých ložisek** – Detekce pittingu, zadírání nebo špatného mazání na základě harmonických frekvencí.
- **Opotřebení ozubených kol** – Identifikace lomů zubů nebo nevhodné geometrie kontaktu.
- **Kontrola účinnosti mazání** – Nedostatečné mazání vede k vyšším vibracím a lze jej včas detekovat.
- **Monitorování třecích spojení** – U kluzných ložisek nebo kloubových spojů.
- **Snímače:** piezoelektrický akcelerometr, kapacitní MEMS akcelerometr, piezorezistivní MEMS akcelerometry.

<https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>

Fig.

Fig.

Fig.

Akustická emise

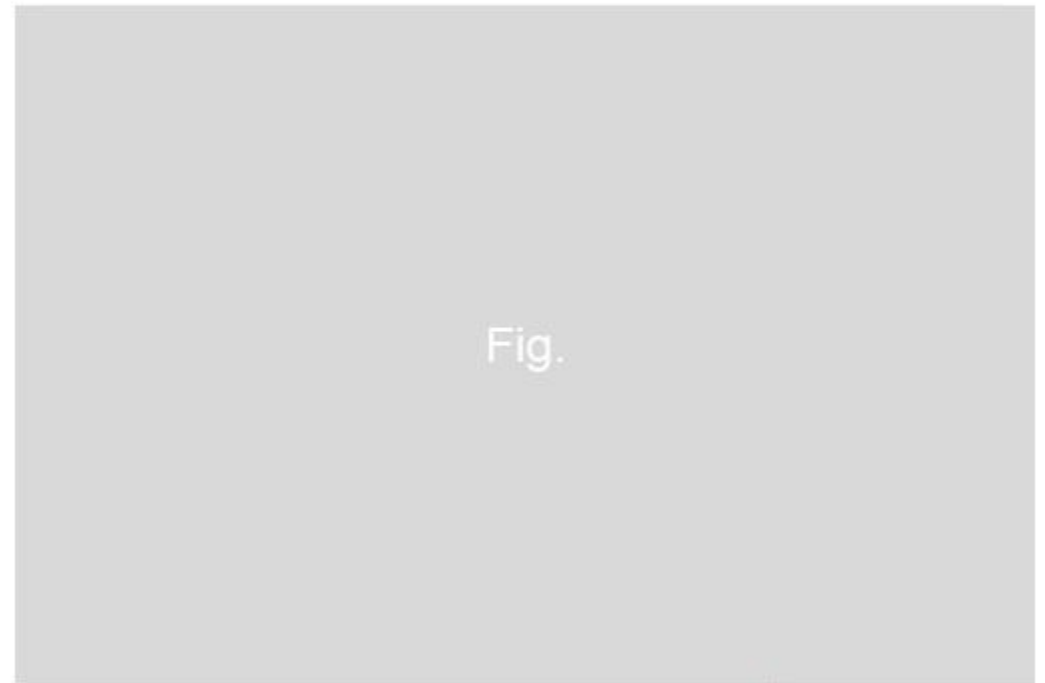
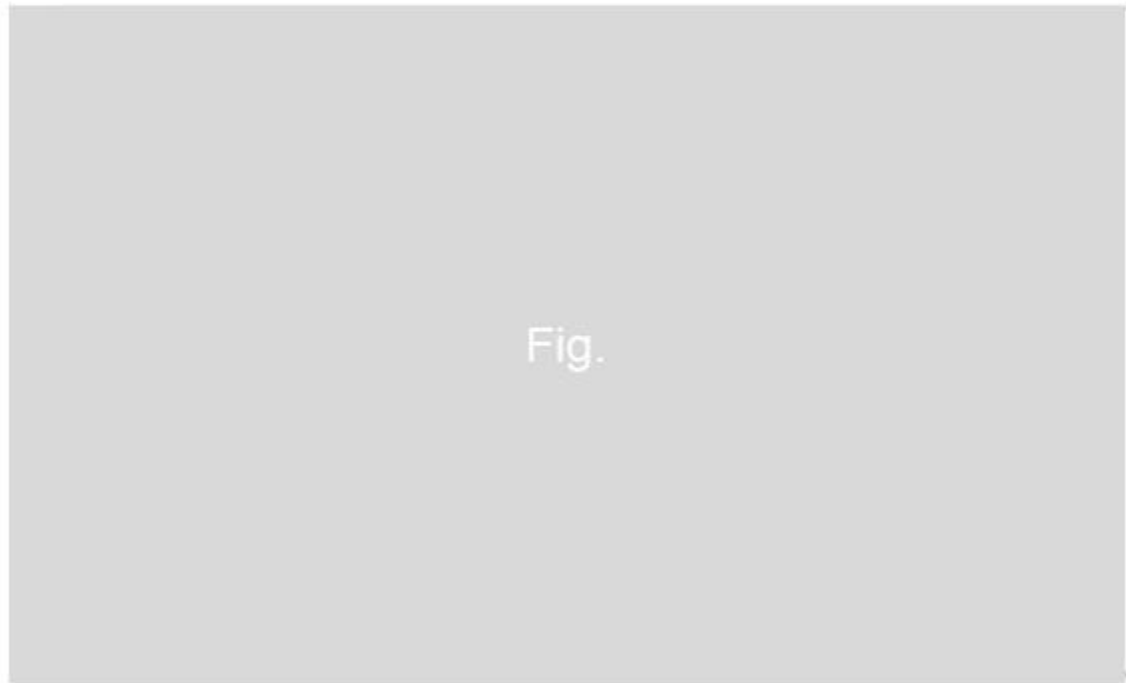
- Akustická emise je jev, při kterém materiály při mechanickém zatížení (např. tažení, ohýbání nebo praskání) uvolňují elastické vlny. Tyto vlny se šíří materiálem a mohou být detekovány senzory na povrchu. Typicky vznikají při tvorbě nebo šíření trhlin, pohybu dislokací či jiných strukturálních změnách.
- Parametry signálu:
 - Tvar a doba trvání pulsu
 - Rychlost šíření
 - Útlum
 - Odraz
 - Frekvenční spektrum
 - Energie



Termografie a infračervené sledování

Termografie je bezpečný a bezkontaktní způsob měření teploty povrchů na základě infračerveného (IR) záření, které objekty emitují v závislosti na své teplotě.

Stankovic, S., & Malinowski, P. (2022). Infrared Thermography in Structural Health Monitoring: A Review. Micromachines, 13(10), 1644)



Sledování změn elektrických veličin

Tato metoda využívá změny elektrických veličin (odpor, kapacita, indukčnost, proud, napětí) k detekci poruch, degradace nebo změn stavu mechanického systému. Při změně fyzikálních nebo strukturálních vlastností materiálu či součásti dochází ke změnám elektrického chování, což lze měřit a vyhodnocovat.

Elektrický odpor- Detekce prasklin, únavy, opotřebení, deformací.

Kapacita - senzorů pro sledování mezer, deformací, změn polohy

Indukčnost (L) - Využívá se např. u senzorů vibrací nebo polohy

Proud a napětí - Kontrola zatížení motorů, elektromagnetických pohonů, detekce závad.

Tenzometry (strain gauges) – měření deformací pomocí změny odporu.

Piezoelektrické senzory – sledují změny tlaku a vibrací s převodem na napětí.

Kapacitní senzory – sledují změny vzdálenosti, pohybu nebo deformací.

Hallové senzory / magnetoinduktivní senzory – pro sledování pohybu, vibrací, poruch ložisek.

Sledování proudu a napětí motorů – detekce zvýšeného tření, poruch ložisek

Fig.

Fig.

<https://eluc.ikap.cz/lekce/snimace-mechanickeho-namahani-odporove-tenzometry>

Sledování změn elektrických veličin

Kapacitní metoda pro měření tloušťky filmu v ložisku

Mazací film mezi valivými elementy a drahami ložiska působí jako dielektrikum mezi dvěma vodivými povrchy, čímž vytváří elektrický kondenzátor. Celková kapacita ložiska je funkcí:

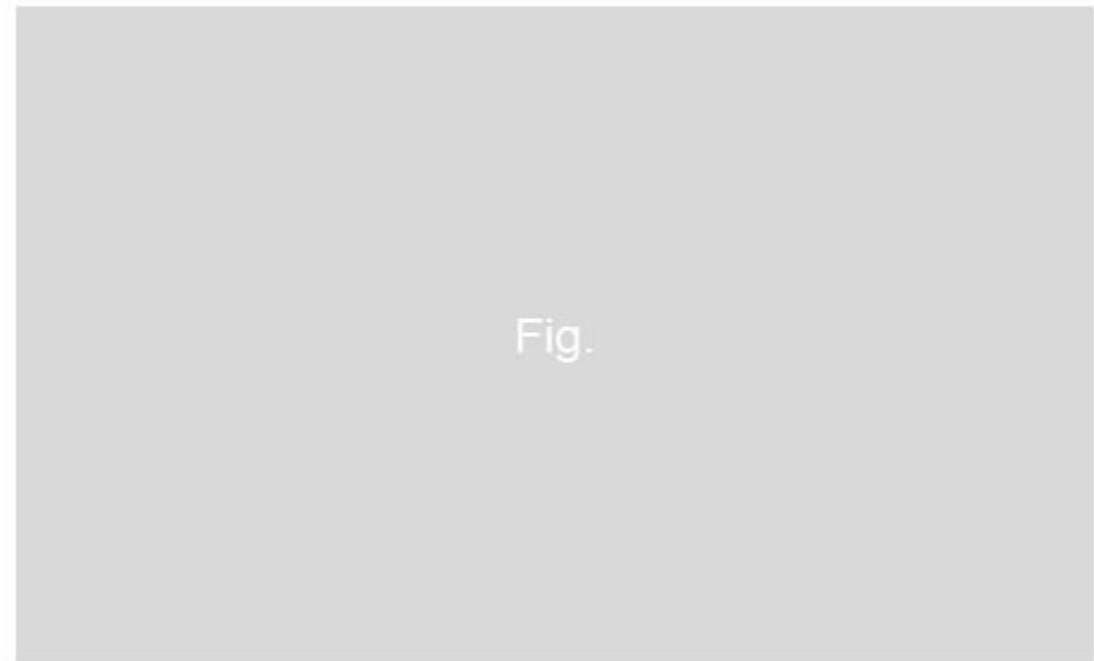
- Tloušťky mazacího filmu
- Dielektrické konstanty maziva
- Kontaktní plochy mezi valivými elementy a drahami

Měřením změn kapacity lze nepřímo určit tloušťku mazacího filmu.

In-situ měření: Umožňuje sledování v reálném čase bez demontáže

Vysoká citlivost: Schopnost detekovat i velmi tenké filmy

Vhodná pro různé režimy mazání



Cen, H., Lugt, P. M., Morales-Espejel, G. E., & Pasaribu, H. (2019). An experimental study on film thickness in a rolling bearing for fresh and mechanically aged lubricating greases. Tribology International, 133, 206–215.

Diagnostika systému vs Pevný výměnný interval

Diagnostika systému (senzory, měření vibrací, teploty, analýza maziva, akustika)

Výhody:

- Umožňuje **stavově řízenou údržbu**
- Přesné zjištění opotřebení, znečištění, nebo blížícího se selhání
- Prodlužuje životnost komponent – **výměna jen, když je to nutné.**
- Snižuje riziko neplánovaných odstávek
- Vyšší návratnost u drahých, obtížně přístupných nebo kritických zařízení

Vhodné aplikace:

- Větrné turbíny (obtížný přístup, vysoké náklady na opravy)
- Lokomotivy (dlouhé servisní cykly, důraz na dostupnost)
- Průmyslové převodovky, turbíny, letectví, těžký průmysl

Závisí na:

- Ceně zařízení
- Náročnosti přístupu nebo servisu
- Kritičnosti pro provoz (ztráty při odstávce)
- Variabilitě provozních podmínek (zatížení, teplota, prostředí)

Fig.

<https://www.windpowerengineering.com/extending-wind-turbine-life-with-pitch-bearing-upgrades/>

Diagnostika systému vs Pevný výměnný interval

Výměnné intervaly

(pravidelná výměna oleje, ložisek, filtru apod.)

Výhody:

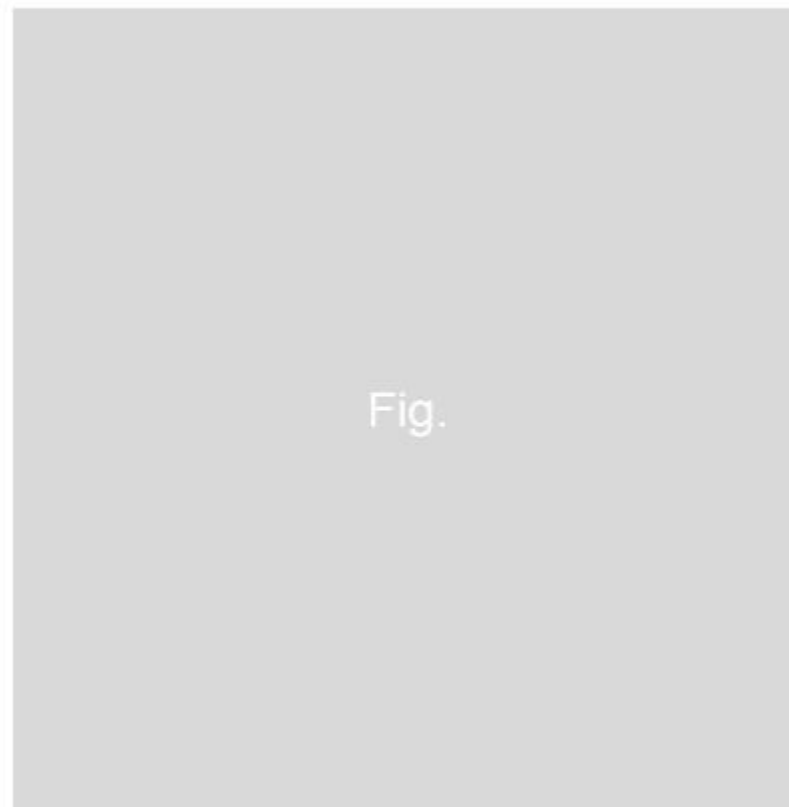
- Jednoduché plánování servisu
- Nižší pořizovací náklady (nepotřebuje senzory ani analýzy)
- Vhodné pro **méně kritické nebo standardizované stroje**

Nevýhody:

- Riziko **předčasných výměn** – vyšší provozní náklady
- Nebo naopak pozdních zásahů – riziko poškození zařízení
- Nezohledňuje skutečné provozní zatížení a podmínky

Vhodné aplikace:

- Osobní automobily (standardní servisní režim)
- Malé stroje s nízkou pořizovací cenou
- Jednodušší provoz bez online monitoringu



Využití diagnostiky a monitorování

Diagnostická data jsou cenným zdrojem pro výrobce. Umožňují zlepšovat konstrukci, zpřesňovat servisní intervaly.

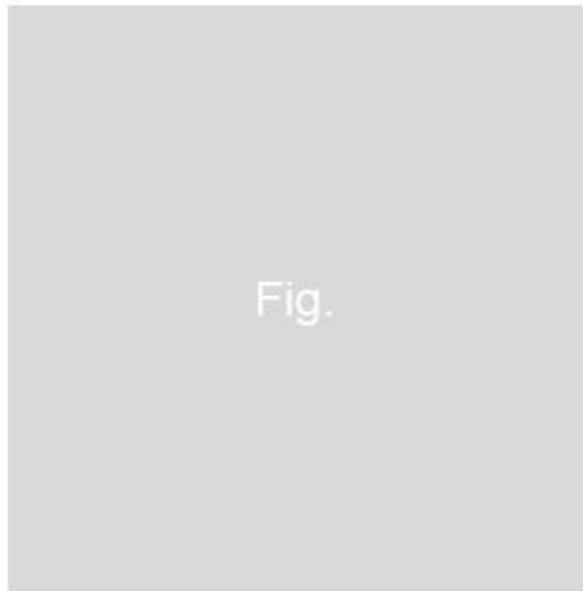
- Zpětná vazba na konstrukci a návrh > optimalizace
- Optimalizace údržbových intervalů
- Vývoj prediktivních služeb > Výrobce může nabídnout stavový řízený servis
- Zjištění nejčastějších poruch a reklamací
- Digitalizace a vývoj digitálních dvojčat



Monitorování a diagnostika- Úprava konstrukce

Náročná výměna celého ložiska

Sférické válečkové ložisko



<https://bearingtech.co.uk/cdn/shop/products/Spherical-Roller-Bearing>



Levnější výměna pouze segmentu

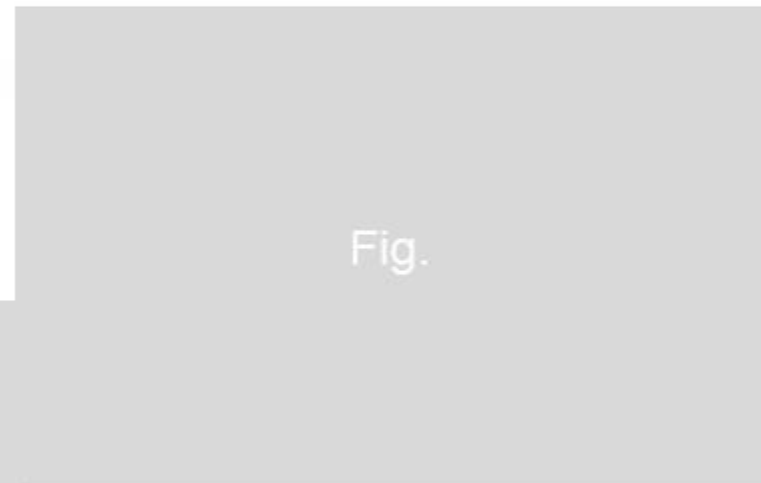
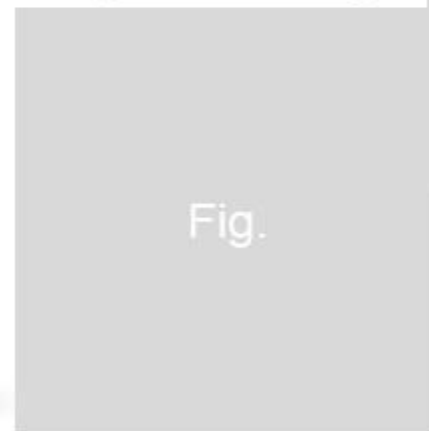
Segmentové sférické válečkové ložisko



<https://cdn.skfmediahub.skf.com/>



Diagnostika



<https://www.windpowerengineering.com/extending-wind-turbine-life-with-pitch-bearing-upgrades/>

Monitorování a diagnostika - Úprava konstrukce

Fig.

Sférické válečkové ložisko

- Sférické válečkové ložisko (celistvé)
- Pořizovací cena: 80 000 – 150 000 €
- Výměna celého ložiska: 150 000 – 450 000 € čas: několik týdnů zahrnuje kompletní demontáž, montáž, jeřáb a logistiku

Segmentové sférické válečkové ložisko

- Segmentové sférické válečkové ložisko
- Pořizovací cena nového ložiska: 100 000 – 180 000 €
- Výměna jednoho segmentu: 30 000 – 60 000 € čas: 1 týden zahrnuje demontáž, montáž, jeřáb a logistiku

ORIENTAČNÍ CENY

- Výměna jednoho segmentu segmentového ložiska: **15 000 – 60 000 €**, ztráta výroby cca **1 týden**
- Kompletní výměna ložiska: až **300 000 – 330 000 €**, zahrnuje jeřáb a demontáž rotoru
- Použití ložiska s delší životností může snížit celkové náklady na vlastnictví (TCO) až o **100 000 € na jednu turbínu** během její životnosti

<https://www.acoem.com/en/case-studies/wind-case-study-bearing-defect-on-2-3mw-turbine.com>

<https://www.windsystemsmag.com/wind-energy-lcoe-bearing-purchase-price-vs-total-cost-of-ownership/>

Závěr

Fig.

Cíl: Klimatická neutralita EU do roku 2050.

- Biomaziva: Ekologické alternativy k fosilním palivům. Často šetrnější k přírodě.
- Recyklace: Minimalizace odpadu, podpora cirkulární ekonomiky. Často levnější zdroj.
- Nízkoenergetické technologie: Optimalizace procesů pomocí AI a chytrých technologií. Z dlouhodobého horizontu šetří náklady na provoz
- Monitorování a diagnostika: jsme schopni efektivně předcházet poruchám, optimalizovat údržbu a výrazně snížit provozní náklady

Tlak na změnu: Nárůst cen energií (elektrina, plyn) a omezenost surovin zvyšuje potřebu:

- Intenzivnější recyklace.
- Přechodu na obnovitelné zdroje (solární, větrná energie, biomasa).



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



NÁRODNÍ
PLÁN OBNOVY



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

*Přednáška vznikla za podpory Národního plánu obnovy v rámci projektu Akcelerace zelených dovedností a udržitelnosti na VUT v Brně.
Registrační číslo: NPO_VUT_MSMT-2143/2024-5.*

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Petr Šperka,

Petr.Sperka@vut.cz

Spoluautor: **Michal Okál**

Brno, 2025



Verze pod licencí CC BY-NC-SA 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.cs>

www.ustavkonstruovani.cz