Spremljanje in preprečevanje nevarnosti tvorjenja usedlin in lakastih oblog

Milan Kambič

Izvleček:
Lakaste obloge (angl. varnish) predstavljajo enega ključnih, a pogosto spregledanih vzrokov za zmanjšano zanesljivost sodobnih hidravličnih in mazalnih sistemov. Njihova problematika se ne kaže v nenadnih okvarah, temveč v postopnem poslabševanju delovanja, ki lahko vodi v zatikanje ventilov, zmanjšano učinkovitost regulacijskih elementov in nepredvidene izpade opreme. Nastanek lakastih oblog je povezan s kompleksnimi mehanizmi kemijske in fizikalne degradacije maziva, pri čemer klasični parametri analize olja pogosto ne zaznajo zgodnjih faz tega pojava.
Prispevek obravnava mehanizme nastajanja lakastih oblog, omejitve rutinske analize olja ter sodobne diagnostične pristope za spremljanje potenciala nastanka laka s poudarkom na preventivnem upravljanju mazalnih sistemov.

Ključne besede:
lakaste obloge, oksidacija, MPC, hidravlični sistem, maziva

1 Uvod

Lakaste obloge (angl. varnish) predstavljajo enega najzahtevnejših in hkrati pogosto spregledanih izzivov pri obratovanju sodobnih hidravličnih in mazalnih sistemov. Njihova problematika ni povezana z nenadnimi, spektakularnimi okvarami, temveč z dolgoročnim in postopnim poslabševanjem delovanja, ki se lahko več mesecev ali celo let razvija brez očitnih opozorilnih znakov. Posledice se praviloma pokažejo šele v obliki zatikanja ventilov, nestabilnega delovanja regulacijskih elementov, zmanjšane učinkovitosti prenosa toplote ali nepredvidenih izpadov opreme, ki imajo lahko visoke neposredne in posredne stroške.

Številne študije in industrijske analize potrjujejo, da je pojav lakastih oblog tesno povezan s procesi oksidacije, toplotne degradacije baznega olja in postopnega izčrpavanja aditivov. Posebno problematično je dejstvo, da do teh procesov pogosto prihaja tudi v sistemih, kjer so klasični parametri analize olja – kot so kislinsko število (TAN), viskoznost ali FT-IR oksidacija – še vedno znotraj sprejemljivih mej [1], [2]. To ustvarja lažen občutek varnosti in prispeva k temu, da se tveganje za nastanek laka podcenjuje.

2 Nastanek lakastih oblog in njihov fizikalno-kemijski značaj

Lakaste obloge so polarni, submikronski produkti degradacije maziva, ki se lahko pojavljajo v dveh oblikah: kot topni lak, raztopljen v olju, ali kot netopni depoziti, izločeni na kovinskih površinah. Njihov nastanek je rezultat kombinacije več mehanizmov, med katerimi imajo ključno vlogo termooksidativna razgradnja baznega olja, razpad antioksidantov in drugih funkcionalnih aditivov, lokalne vroče točke v sistemu, mikrodizel učinek (implozije zračnih mehurčkov) ter elektrostatične razelektritve v filtrih in cevovodih.

Prisotnost zraka in vode dodatno pospešuje degradacijske procese. Zrak deluje kot vir kisika in sprožilec mikrodizel učinka, voda pa zmanjšuje topnost polarnih produktov ter katalizira oksidacijo [2], [3], [4].

Posebnost laka je njegova termodinamična občutljivost. Pri višjih temperaturah se lahko polarni degradacijski produkti ponovno raztopijo v olju, medtem ko se pri nižjih temperaturah ali ob spremembi obratovalnih pogojev izločijo na površinah. To pomeni, da prisotnost laka ni zgolj funkcija kemijskega stanja olja, temveč tudi trenutnih obratovalnih razmer, kar dodatno otežuje diagnostiko [2].

Cikel tvorjenja lakastih usedlin prikazuje *slika 1*. Med uporabo se olja kemično razgradijo na nepovraten način, pri čemer nastane topni lak, ki se kopiči v olju (1. korak). Ko se topni lak kopiči v olju, to sčasoma doseže točko nasičenosti. Po tej točki bo vsaka dodatna količina, ki nastane, netopna. Nadaljnja razgradnja nasičenega olja povzroči netopne delce laka (2. korak). Ti delci se sčasoma aglomerirajo in tvorijo usedline (3. korak) [5].

Fazne spremembe med topnim in netopnim lakom so fizikalne narave, zato so reverzibilne. Ker so ravni laka odvisne od temperature, je mogoče po nanosu laka pogoje spremeniti tako, da se ravnovesje pozitivno premakne in se nanosi vrnejo v raztopljeno stanje. Ta sposobnost spreminjanja ravnovesja je ključna za popolno odstranitev laka in zmanjšanje tveganj, povezanih z njim [5].

Dr. Milan Kambič, univ. dipl. inž., Olma d. o. o., Ljubljana

© The Authors 2026. CC-BY 4.0

https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-2.23

1

Cikel tvorjenja lakastih usedlin (Vir: [5])

3 Vpliv lakastih oblog na delovanje opreme

Lak lahko vpliva na delovanje opreme na več načinov [6], [7]. Lakaste obloge vplivajo na zanesljivost sistema na več ravneh. Poleg pospešene razgradnje olja zmanjšujejo zračnosti v ventilih, tuljavah in ležajih, kar vodi v povečano trenje in zatikanje mehanskih komponent. Zaradi svoje polarne narave privlačijo druge onesnaževalce, s čimer pospešujejo obrabo strojnih delov in povečujejo obremenitev filtracijskih sistemov.

Poleg mehanskih težav imajo lakaste obloge tudi izrazit toplotni vpliv. Zmanjšujejo učinkovitost toplotnih izmenjevalnikov, kar vodi v višje obratovalne temperature, te pa dodatno pospešujejo degradacijske procese v olju. Tako nastane začarani krog, v katerem se tveganje za nastanek laka s časom še povečuje [6], [7].

4 Omejitve klasične analize olja

Oksidacija je glavni dolgoročni mehanizem degradacije maziv. Z napredovanjem oksidacije se bazno olje in aditivi razgrajujejo v polarne produkte, ki povečujejo nagnjenost k nastanku laka in mulja. Hitrost oksidacije je neposredno povezana s temperaturo, prisotnostjo zraka, vode in katalitičnih kovin [3].

V praksi se pogosto srečujemo s primeri, kjer so rezultati rutinske analize olja stabilni, kljub temu pa so na kritičnih komponentah že vidne lakaste obloge (*slika 2*). Takšni primeri jasno kažejo, da oksidacija ni edini mehanizem degradacije. Toplotna degradacija, ki lahko poteka tudi brez prisotnosti kisika, proizvaja polarne produkte, ki prispevajo k nastanku laka, ne da bi se to nujno odrazilo v povišani vrednosti TAN ali značilnih vrhovih FT-IR [1].

To jasno kaže, da standardni analitski parametri ne odražajo topnosti polarnih degradacijskih produktov in da je lahko olje blizu kritične točke nasičenosti, še preden so klasični kazalniki degradacije povišani [1].

Zato se zanašanje izključno na klasične analitske parametre pogosto izkaže za nezadostno. Ključno sporočilo za prakso je, da lahko lak nastaja tudi v sistemih, ki so z vidika standardnih analiz videti »zdravi«.

5 Diagnostika potenciala nastanka laka

Za oceno tveganja nastanka lakastih oblog se je v industriji uveljavila metoda membranske kolorimetrije (MPC, ASTM D7843). MPC ne meri količine že izločenega laka, temveč potencial olja za tvorbo laka, saj zajame tako topne kot netopne polarne produkte [8].

Rezultat je izražen kot ΔE (barvna razlika glede na čisto membrano). Kritična napaka v praksi je obravnava MPC kot absolutne meje (npr. ΔE < 15 = varno). V resnici sta olji z MPC 14 in MPC 16 praktično enako tvegani, če trend narašča. MPC ni konkretna številka. Pove nam, kakšna sta potencialna nevarnost in tveganje za nastanek laka. Višja, kot je vrednost MPC, večje je tveganje za drago okvaro, povezano z lakom. Ne smemo misliti, da delovanje pod mejo ΔE < 15 pomeni, da smo popolnoma varni. Pomembno je torej poudariti, da MPC ni absolutna meja varnosti. Treba je spremljati trend vrednosti ΔE, saj je dinamika naraščanja pogosto pomembnejša od same številčne vrednosti.

Delujmo proaktivno. Z ustrezno opremo odstranimo topne in netopne produkte razgradnje, kontaminante in lak. Olje naj bo čim bolj čisto in nenasičeno. Na ta način lahko ohranimo vrednosti MPC čim bližje ničli. Navsezadnje skoraj ničelne vrednosti MPC pomenijo skoraj ničelno tveganje [8].

Raziskave so pokazale, da spremljanje zgolj netopnega laka ni zadostno, saj ne zazna zgodnje faze nasičenja olja s topnim lakom, ki je predhodnik depozitov [9]. Spremljanje MPC v trendu omogoča zgodnje zaznavanje naraščajočega deleža topnega laka, kar je ključno za preventivno ukrepanje. Raziskave in industrijska praksa kažejo, da se večina težav z lakom razvije v fazi, ko je olje še vizualno in analitsko »sprejemljivo«, a že kemijsko nestabilno [4], [8], [9].

2

Lakaste obloge v ležaju (Vir: [5])

6 Strategije preprečevanja in obvladovanja

Najbolj učinkovit pristop ni naknadna sanacija sistema po nastanku lakastih oblog, temveč preventivno upravljanje degradacijskih procesov v olju. To izvajamo na naslednje načine [7], [9], [2], [6]:

- stalno spremljanje vrednosti MPC (topni in netopni produkti),
- nadzor vsebnosti vode,
- preprečevanje previsokega deleža zraka v olju (pomen hitrosti izločanja zraka iz olja),
- učinkovito toplotno upravljanje (odprava vročih točk),
- izbira baznih olj in aditivov z visoko oksidacijsko stabilnostjo,
- uporaba namenskih sistemov za odstranjevanje laka (elektrostatični filtri, ionske smole, globinski filtri – glede na stanje laka),
- načrtovanje menjav olja na podlagi stanja, ne koledarja.

Učinkovito obvladovanje lakastih oblog torej zahteva prehod od reaktivnega k preventivnemu upravljanju mazalnega sistema. Lakaste obloge niso posledica posameznega dejavnika, temveč rezultat kombinacije kemijske degradacije maziva, obratovalnih pogojev in zasnove sistema.

Klasični parametri analize olja pogosto ne zaznajo zgodnjih faz nastajanja laka, zato je nujno dopolniti nadzor s ciljno diagnostiko, kot sta membranska kolorimetrija (MPC) in spremljanje stanja antioksidantov. Posebej pomembno je spremljanje trendov, saj topni lak predstavlja zgodnji kazalnik nasičenja maziva s produkti degradacije.

Na hitrost nastajanja lakastih oblog pomembno vplivajo obratovalni pogoji. Vzdrževanje stabilne temperature, preprečevanje lokalnih pregrevanj ter preprečevanje vnosa in zadrževanja zraka v olju zmanjšujejo tveganje za mikrodizel učinek in pospešeno razgradnjo olja. Enako pomembno je spremljanje vsebnosti vode, ki deluje kot katalizator oksidacijskih procesov in zmanjšuje topnost produktov degradacije.

Kadar se lak že pojavlja, morajo sanacijski ukrepi temeljiti na dejanskem stanju laka. Odstranjevanje zgolj netopnih delcev pogosto ne odpravi vzroka, zato je treba tehnologije sanacije prilagoditi razmerju med topnim in netopnim lakom. Dolgoročno pa ima ključno vlogo pravilna izbira maziva z ustrezno oksidacijsko stabilnostjo in primerno formulacijo aditivov.

Celovit, diagnostično podprt pristop omogoča stabilnejše delovanje sistema, podaljšanje uporabne dobe olja in zmanjšanje tveganja za nepredvidene izpade.

7 Zaključek

Lakaste obloge so sistemska težava, ki odraža ravnovesje med kemijsko stabilnostjo maziva in obratovalnimi pogoji sistema. Njihova prisotnost ni naključna, temveč logična posledica degradacijskih procesov, ki jih klasična analiza olja pogosto ne zazna pravočasno. Razumevanje mehanizmov nastanka laka, uporaba ustreznih diagnostičnih metod in preventivno upravljanje mazalnega sistema so ključni elementi za dolgoročno zanesljivo obratovanje hidravličnih in mazalnih sistemov.

Viri

[1] „Causes of darkening hydraulic fluid," Noria Corporation [elektronski]. Available: https://www.machinerylubrication.com/Read/29148/darkening-hydraulic-fluid. [Poskus dostopa 9. 1. 2026.]

[2] A. Sitton in T. Sirisithichote, „The varnish Issue: Strategies for successful monitoring and acceptable levels," Focuslab [elektronski]. Available: https://www.machinerylubrication.com/Read/29768/varnish-levels-monitoring. [Poskus dostopa 9. 1. 2026.]

[3] „How the oxidation rate affects oil change frequency," Noria Corporation [elektronski]. Available: https://www.machinerylubrication.com/Articles/Print/31454. [Poskus dostopa 9. 1. 2026.]

[4] G. E. Totten, Handbook of lubrication and tribology, 2 ured., Boca Raton: CRC Press, 2006, p. 1224.

[5] H. J. Molla, „Resolving varnish challenges using soluble varnish removal technology," Saudi Aramco [elektronski]. Available: https://www.machinerylubrication.com/Read/32423/using-soluble-varnish-removal-technology. [Poskus dostopa 9. 1. 2026.]

[6] OpenAI, „ChatGPT (različica-5.2)," 2026 [elektronski]. Available: https://openai.com. [Poskus dostopa 8. 1. 2026.]

[7] F. d. S. Ramos, „Lubricant varnish: How to detect, prevent and fight this silent enemy" [elektronski]. Available: https://precisionlubrication.com/articles/lubricant-varnish/. [Poskus dostopa 12. 1. 2026.]

[8] P. Dufresne, „MPC varnish testing: It's not just about the number," EPT Clean Oil [elektronski]. Available: https://www.machinerylubrication.com/Read/32026/mpc-varnish-testing. [Poskus dostopa 9. 1. 2026.]

[9] „Soluble and insoluble varnish test methods for trending varnish buildup in mineral turbine oil," Noria Corporation [elektronski]. Available: https://www.machinerylubrication.com/Articles/Print/32319. [Poskus dostopa 9. 1. 2026.]

Monitoring and prevention of the risk of deposit and varnish formation

Abstract:
Varnish deposits represent one of the key, yet often overlooked, causes of reduced reliability in modern hydraulic and lubrication systems. Their impact does not manifest as sudden failures, but rather as a gradual degradation of performance, which can lead to valve sticking, reduced efficiency of control components, and unplanned equipment downtime. The formation of varnish is associated with complex mechanisms of chemical and physical lubricant degradation, while conventional oil analysis parameters often fail to detect the early stages of this phenomenon.
This paper discusses the mechanisms of varnish formation, the limitations of routine oil analysis, and modern diagnostic approaches for monitoring varnish potential, with an emphasis on preventive management of lubrication systems.

Keywords:
varnish deposits, oxidation, MPC, hydraulic system, lubricants