

Delaminacija premaza sa strojarski obrađene metalne površine

Fotografska analiza adhezijskog loma na glodanoj/tokarenoj podlozi



Slika 1. Opsežno odvajanje premaza sa strojarski obrađene metalne površine. Vidljivi su tragovi glodanja/tokarenja i lokalno izložen osnovni metal.

Ključni nalaz: Adhezijski lom na granici metal/premaz; najvjerovatnije zbog slabe pripreme strojarski obrađene površine i moguće kontaminacije obradnim sredstvom.

1. Sažetak nalaza

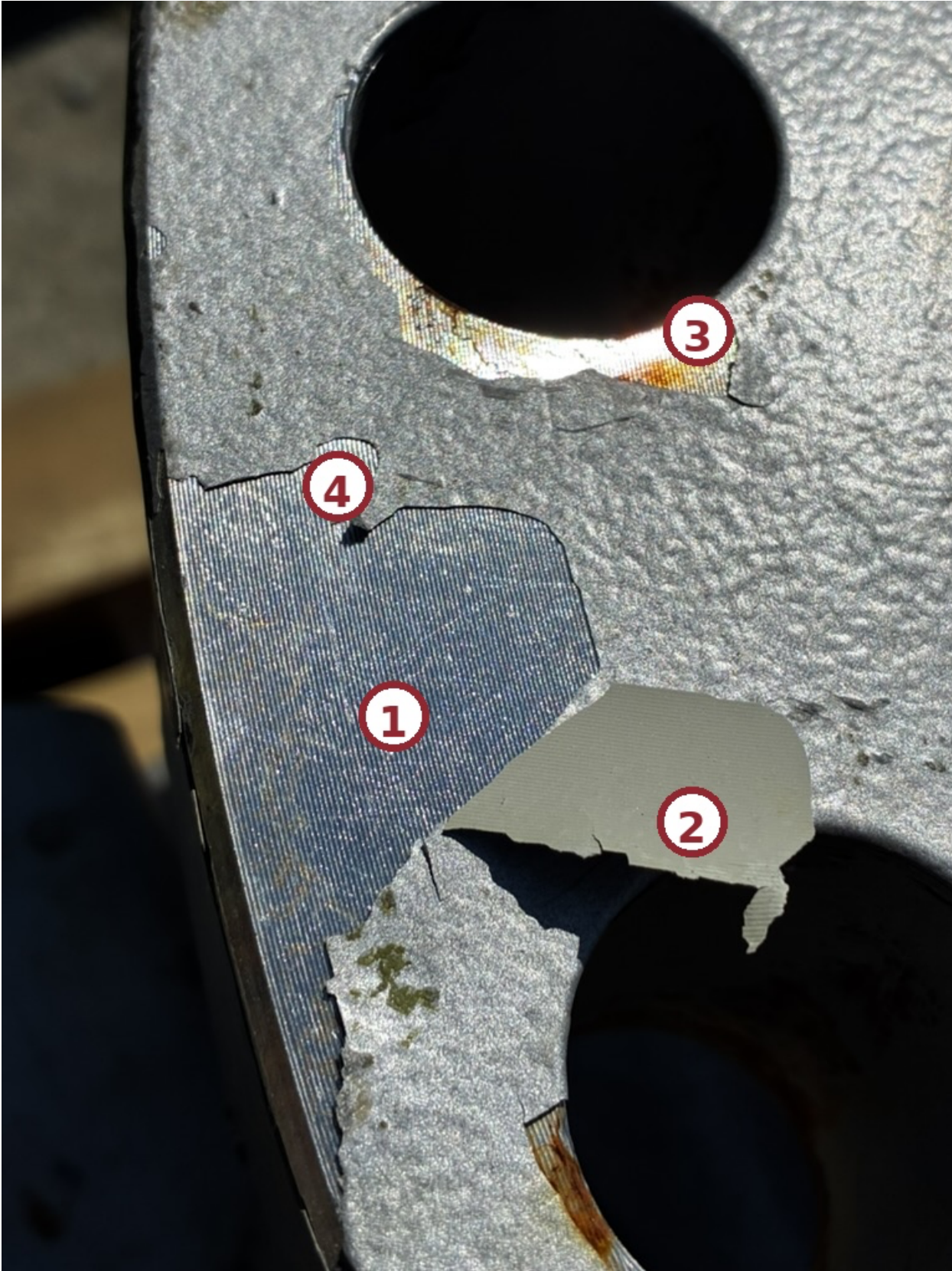
Na fotografiji se vidi strojarski obrađena metalna komponenta s jasno izraženim tragovima glodanja ili tokarenja. Zaštitni premaz odvaja se u velikim, kohezivno cjelovitim listovima, a ispod njega ostaje gotovo čista obrađena metalna površina. Takva morfologija najviše odgovara adhezijskom lomu na granici podloga ili premaz, a ne pucanju unutar filma.

Glavni tehnički problem nije kemija premaza, nego nepovoljno stanje strojarski obrađene površine. Površina je relativno glatka, usmjerena i često nosi mikroskopski film obradnog ulja, emulzije, inhibitora korozije ili ostataka rashladno-podmazujuće tekućine. Ako takva površina nije pravilno odmašćena i mehanički profilirana prije premazivanja, vezivo ne ostvaruje dovoljno vlaženje, stvarnu kontaktnu površinu ni mehaničko sidrenje.

Stupanj sigurnosti

Visok za klasifikaciju adhezijskog loma. Srednje visok za uzrok: fotografija snažno podržava nedovoljnu pripremu strojarski obrađene površine, ali konačna potvrda traži podatke o odmašćivanju, abrazivnoj obradi, premaznom sustavu i ravni loma.

2. Što se vidi na fotografiji



Slika 2. Numerički označene zone za analizu. Oznake su namjerno postavljene bez tekstualnih okvira kako se ne bi zaklanjao detalj površine.

1 - izložena obrađena površina: Na podlozi su vidljive paralelne linije strojne obrade. Gotovo da nema kohezivnog ostatka temeljnog premaza, što upućuje da se lom odvijao neposredno na sučelju metal-premaz.

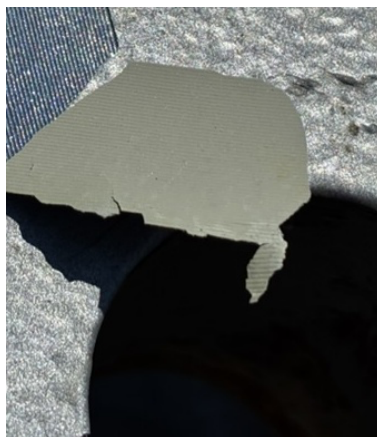
2 - odvojeni list premaza: Film ostaje relativno cjelovit i savitljiv. Kohezijska čvrstoća filma veća je od njegove adhezijske čvrstoće prema podlozi.

3 - lokalna korozija uz otvor: Smeđe obojenje pojavljuje se uz rubove i oštećene zone. To je vjerojatno sekundarna posljedica izlaganja osnovnog metala nakon lokalnog gubitka zaštite, a ne primarni uzrok opsežnog ljuštenja.

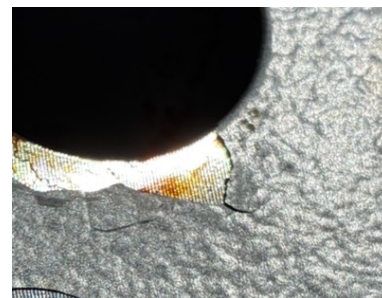
4 - usmjereni tragovi glodanja ili tokarenja: Takva topografija može izgledati hrapavo oku, ali često daje nizak efektivni profil u smjeru odvajanja i malu površinu za trodimenzionalno sidrenje premaza.



Tragovi obrade i čista ravnina loma



Odvojeni film bez raspada



Korozija i prekid zaštite uz rub

3. Najvjerojatniji mehanizam nastanka

3.1. Zaostala kontaminacija nakon strojne obrade

Glodanje i tokarenje gotovo uvijek uključuju ulja, emulzije ili rashladno-podmazujuće tekućine. Čak i kada površina vizualno izgleda suho, tanki organski film može ostati u mikrožljebovima. Takav film smanjuje površinsku energiju metala i sprječava potpuno vlaženje. Premaz se tada ne veže za metal, nego za slabo vezani sloj kontaminanta.

Za dobro vlaženje površinska napetost tekućeg premaza mora biti dovoljno niska u odnosu na površinsku energiju podloge. Organska ulja tu energiju bitno snižavaju, kontaktni kut raste, a stvarni kontakt veziva i metala se smanjuje. Posljedica je prividno uredan film sa slabom početnom adhezijom.

3.2. Nedovoljan profil i usmjerenost tragova obrade

Strojno obrađena površina može imati jasno vidljive brazde, ali to nije isto što i kontrolirani abrazivni profil. Brazde su pravilne i usmjerene, često sa zaobljenim vrhovima i malim brojem podrezanih mikrošupljina. Premaz zato nema dovoljno trodimenzionalnih točaka sidrenja. Ako se sila odvajanja razvija paralelno s tragovima obrade, pukotina može napredovati vrlo lako duž ravnine metal/premaz.

3.3. Oksidni film na čeliku

Svježe obrađeni čelik brzo stvara nanometarski oksidni sloj. Sam oksid nije nužno štetan ako je tanak, kompaktan i čist, ali u prisutnosti vlage, ostataka emulzije ili vremena skladištenja može nastati slabo vezani međusloj. Ako se premaz nanese bez neposredne pripreme, adhezija ovisi o stabilnosti tog filma, a ne o čvrstoći osnovnog metala.

3.4. Naprezanja u filmu kao pokretač širenja

Nakon sušenja ili kemijskog umrežavanja premaz razvija zaostala vlačna naprezanja. Deblji i krući film skladišti više elastične energije. Kada je adhezija slaba, ta energija postaje pokretačka sila za širenje delaminacije. Voda i temperaturna cikličnost dodatno snižavaju međufaznu čvrstoću, pa se početni mali defekt širi u veliko ljuštenje u listovima.

Bitna dijagnostička razlika

Visok DFT, toplinsko cikliranje ili mehaničko savijanje mogu ubrzati odvajanje, ali bez prethodno slabe veze na strojarski obrađenoj površini obično ne bi proizveli ovako čistu i opsežnu ravninu loma.

4. Rangiranje mogućih uzroka

Mogući uzrok	Vjerojatnost	Veza s fotografijom	Potvrda
Zaostalo obradno ulje / emulzija	Vrlo visoka	Čist adhezijski lom na obrađenom metalu	Water-break test, solvent wipe, FTIR, analiza procesa odmašćivanja
Nedovoljna mehanička priprema	Vrlo visoka	Jasni tragovi glodanja/tokarenja bez kontroliranog abrazivnog profila	Mjerenje profila, mikroskopija, zapis pripreme
Neodgovarajući primer za glatki metal	Visoka	Film je kohezivno čvrst, ali se odvaja od podloge	TDS, preporuka proizvođača, probno polje
Flash rust / oksidni međusloj	Srednja	Lokalna korozija i moguće vrijeme između obrade i premaza	Pregled zapisa, presjek i mikroskopija
Prevelik DFT / unutarnja naprezanja	Srednja	Objašnjava širenje u velikim listovima	DFT karta i laboratorijski presjek
Pogrešan omjer ili nepotpuno umrežavanje	Niža do srednja	Moguće samo ako je film mekan ili ljepljiv	MEK rub, tvrdoća, DSC/FTIR po potrebi

5. Plan dokazivanja korijenskog uzroka

1. Dokumentacija procesa. Utvrditi je li obrada bila mokra ili suha, koje su tekućine korištene, kako je provedeno odmašćivanje, koliko je vremena prošlo do premazivanja i je li površina dodatno abrazivno obrađena.

2. Ravnina loma. Pregledati metalnu podlogu i donju stranu odvojenog filma. Zabilježiti postotak adhezijskog i kohezivnog loma te postoji li masni, sjajni ili praškasti međusloj.

3. Adhezija. Provesti pull-off prema ISO 4624 ili ASTM D4541 na neoštećenim i graničnim zonama. Uz MPa obavezno zapisati tip i postotak loma.

4. Kontaminacija. Provesti water-break test na reprezentativnoj očišćenoj površini, ciljano brisanje otapalom te po potrebi FTIR analizu organskog ostatka.

5. Topografija. Izmjeriti hrapavost i promatrati površinu pod povećanjem. Usporediti stvarni profil s preporučenim profilom za konkretan primer.

6. Usporedno probno polje. Napraviti tri varijante: samo odmašćeno, odmašćeno i mehanički matirano, te potpuno abrazivno pripremljeno. Nakon stvrdnjavanja usporediti adheziju i ravninu loma.

6. Preporučeni sanacijski postupak

- Ukloniti sav premaz koji nema čvrstu vezu. Kod velikih kontinuiranih zona lokalno krpanje nije pouzdano jer se delaminacija može nastaviti ispod prividno zdravog filma.
- Prvo provesti temeljito odmašćivanje metodom kompatibilnom s prisutnim obradnim sredstvom. Čišćenje otapalom mora koristiti čiste krpe i višestruke prolaze; razmazivanje ulja nije čišćenje.
- Nakon odmašćivanja provesti abrazivno čišćenje ili drugo kontrolirano mehaničko profiliranje do čiste, jednolike matirane površine. Ciljani standard i profil moraju slijediti specifikaciju sustava i TDS proizvođača.
- Ukloniti prašinu i provjeriti čistoću prije premazivanja. Površinu zaštititi od ponovnog dodira rukama, uljem iz komprimiranog zraka i kondenzacijom.
- Nanijeti primer izričito odobren za strojarski obrađeni ugljični čelik i predviđeni profil. Ne oslanjati se na činjenicu da je isti proizvod prije radio na pjeskarenoj površini.
- Kontrolirati DFT po slojevima. Izbjegavati nepotrebno debele nanose koji povećavaju skupljanje i zaostala naprezanja.
- Prije pune sanacije izvesti probno polje i nakon potpunog stvrdnjavanja potvrditi pull-off rezultat i prihvatljivu ravninu loma.

7. Zaključak

Oštećenje je najdosljednije adhezijskom lomu premaza sa strojarski obrađene metalne podloge. Jasni tragovi glodanja/tokarenja, gotovo čista površina nakon odvajanja i cjelovit odvojeni film upućuju na to da je kohezija premaza bila bolja od njegove veze s podlogom. Najvjerojatnija kombinacija uzroka je zaostala organska kontaminacija nakon strojne obrade i nedostatak kontroliranog abrazivnog profila, uz moguće dodatno djelovanje neodgovarajućeg primera i visokih unutarnjih naprezanja filma.

Najvažniji inspektorski zadatak je potvrditi ravninu loma i dokazati stanje podloge. Bez toga bi se sanacija mogla svesti na ponovno nanošenje istog sustava na jednako glatku ili kontaminiranu površinu, pa bi se kvar ponovio.

8. Ograničenja studije

Analiza je izrađena na temelju jedne fotografije. Nisu dostupni podaci o vrsti metala, premaznom sustavu, pripremi, DFT-u, okolišu, starosti i rezultatima adhezijskih testova. Zaključci zato predstavljaju stručno rangiranu hipotezu i plan potvrde, a ne konačno forenzičko vještačenje.

9. Relevantne norme i literatura

1. ISO 8501-1 - Vizualna procjena čistoće čeličnih površina nakon pripreme.
2. ISO 8503 - Karakteristike hrapavosti abrazivno očišćenih čeličnih podloga.
3. ISO 8502 - Ispitivanja čistoće površine prije nanošenja premaza.
4. ISO 4624 - Pull-off ispitivanje prionjivosti premaza.
5. ASTM D4541 - Pull-off strength of coatings using portable adhesion testers.
6. ISO 12944-4 - Vrste površina i metode pripreme za zaštitne sustave premaza.
7. Roberge, P. R., Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill.
8. Schweitzer, P. A., Paint and Coatings: Applications and Corrosion Resistance, CRC Press.