

OPOTREBENIE A MATERIÁLY ODOLNÉ PROTI OPOTREBENIU

OPOTREBENIE je definované ako nežiadúca zmena povrchu alebo rozmerov tuhých telies, spôsobená buď vzájomným pôsobením funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a nejakého média, ktoré opotrebenie vyvoláva.

Prejavuje sa ako odstraňovanie alebo premiestňovanie častíc hmoty opotrebovávaného povrchu mechanickými účinkami, ktoré môžu byť sprevádzané aj ďalšími vplyvmi, ako napr. chemickými alebo elektrickými.

Opotrebenie delíme na šesť základných druhov:

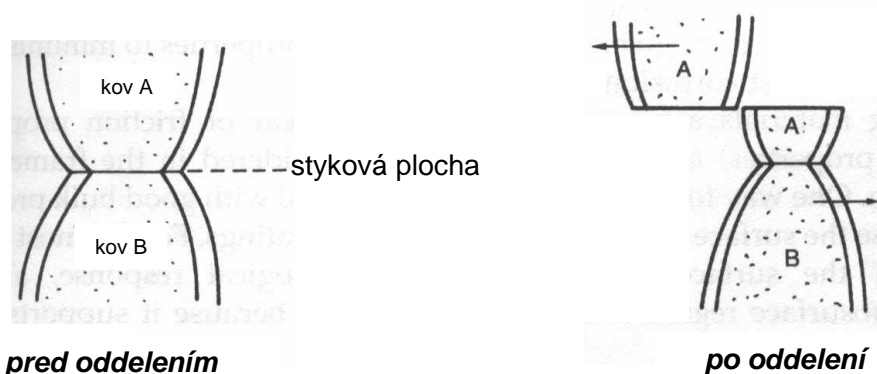
- adhezívne
- abrazívne
- erozívne
- kavitačné
- únavové
- vibračné

1. ADHÉZÍVNE OPOTREBENIE

Je najčastejším spôsobom opotrebovania súčiastok, ktorých funkčné povrchy sa dostali do vzájomného styku pri vzájomnom pohybe. Je charakterizované oddeľovaním a premiestňovaním častíc materiálu, v dôsledku pôsobenia medziatómových síl, uplatňujúcich sa medzi stykovými plochami.

Jeho vznik sa vysvetľuje tým, že povrchy stykových plôch nie sú nikdy hladké, a že ku styku dvoch telies teda nedochádza na celom povrchu, ale na veľkom počte dotkových miest. Pôsobením síl sa vrcholy nerovností na povrchu plasticky deformujú, atómy oboch povrchov sú v tesnom styku a dochádza k vytváraniu mikrospojov. Pri relatívnom pohybe povrchov sa tieto mikrospoje porušujú. Keďže sú povrchové oblasti spevnené plastickou deformáciou, ich pevnosť je vyššia ako pevnosť podpovrchových oblastí, preto k oddeľovaniu materiálu nedochádza v mieste pôvodných stykových povrchov, ale vo vnútri materiálu jedného z telies. Pri porušení mikrospoja dochádza k prenosu častíc z povrchu jedného telesa na povrch druhého. Tieto potom buď zostávajú prichytené na povrchu druhého telesa alebo sa voľne pohybujú medzi oboma funkčnými povrchmi.

Veľkosť oddelených častíc závisí od toho, v akej vzdialenosti od miesta styku k odtrhnutiu došlo. Čím je väčšie spevnenie povrchu, tým sa zvyšuje tendencia k oddeľovaniu väčších častíc.



Obr. 1 Schematické znázornenie princípu vzniku adhezívneho opotrebenia

Rýchlosť adhezívneho opotrebenia možno znížiť:

- zmenšením veľkosti oddelených častíc, zvyčajne zmenšením stykovej plochy oboch materiálov;
- znížením zaťaženia (tlak, resp. sila na plochu);

- zvýšením tvrdosti oboch povrchov (napr. vytváraním tvrdých návarov, chemicko- tepelným spracovaním povrchov- nitridácia, cementácia, boridovanie), resp. použitím dvoch tvrdých materiálov (karbid bóru, titánu, wolfrámu);
- použitím tzv. trecej dvojice- skladajúcej sa z jedného tvrdého a jedného mäkkého materiálu. Používa sa pre prípady, kedy je zabezpečené dobré mazanie a ochrana proti nežiadúcemu pôsobeniu abrazívnych častíc (napr. čistením cirkulujúceho oleja), a kedy je prípustná určitá deformácia mäkkšieho povrchu.

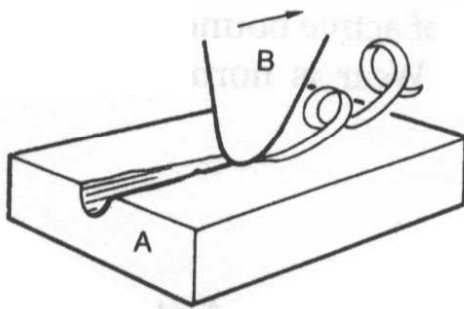
Dobrá odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu majú aj niektoré **plasty** (možno ich použiť bez mazania alebo s minimálnym mazaním)- napr. teflon (polytetrafluóretylén- PTFE), polyamidy (PA), polyoximetylén (POM) a plnené epoxidové živice:

- **PTFE** má veľmi nízky koeficient trenia aj v styku s oceľami a bez použitia mazania; ďalšie zlepšenie odolnosti proti opotrebeniu možno dosiahnuť použitím rôznych plnív (napr. grafitu, práškov neželezných kovov, atď.). Používa sa na prevažne na výrobu samomazných metalo- plastických ložísk (kovová kostra s vrstvou plastu).
- **plnené epoxidové živice** sa využívajú predovšetkým na výrobu lisovacích nástrojov alebo vodiacich plôch obrábacích strojov. Ako plnivo sa používajú napr. prášky z hliníkových bronzov.

2. ABRAZÍVNE OPOTREBENIE

Je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním funkčného povrchu opotrebovávaného telesa ryhovaním a rezaním týmito časticami alebo tvrdým a drsným povrchom druhého telesa, ku ktorému dochádza vtedy, ak pri relatívnom pohybe dvoch telies vnikajú nerovnosti povrchu tvrdšieho telesa do povrchu telesa mäkkšieho.

Typickým poškodením povrchu pri abrazívnom opotrebení sú **ryhy**, viď obr 2.



Obr. 2 Schematické znázornenie princípu vzniku abrazívneho opotrebenia

Abrazívne opotrebenie môže vzniknúť aj z iných typov opotrebenia, v priebehu ktorých sa vytvárajú voľné častice, ktoré sa stávajú tvrdšími než základný materiál, a to buď vplyvom intenzívnej plastickej deformácie alebo oxidácie vzdušným kyslíkom.

Rýchlosť abrazívneho opotrebenia možno znížiť:

- znížením zaťaženia- častice nebudú zatlačané tak hlboko do povrchu materiálu a ryhy budú plytšie;
- zvýšením tvrdosti- s rovnakým efektom ako u predošlej možnosti.

Pri voľbe materiálov odolných proti abrazívnemu opotrebeniu si treba uvedomiť, že v mieste styku funkčného povrchu telesa s abrazívnymi časticami vznikajú veľké merné tlaky s lokálnou plasticou deformáciou pracovného

povrchu a sily majú často charakter rázu. Jedná sa o aplikácie pre napr. lyžice bágrov, čeľuste drvičov kameňov a rúd, články pásových vozidiel, a pod.

Proti takémuto typu opotrebenia sa osvedčili najmä mangánové austenitické ocele, označované ako tzv. **Hadfieldove ocele**, obsahujúce 1,2%C a 13%Mn, prípadne ešte 1%Cr; a to v stave tvárnenom alebo aj liatom. Ich dobrá odolnosť proti opotrebeniu sa dosahuje len v prípadoch, kedy je funkčná povrchová vrstva intenzívne plasticky deformovaná- jedná sa o deformačne indukovanú lokálnu transformáciu austenitu na martenzit.

Druhá možnosť pri abrazívnom opotrebení je, že abrazivo má charakter sypkej hmoty s v mieste jeho styku s pracovným povrchom vznikajú len malé merné tlaky. Jedná sa napr. o aplikácie strojov pracujúcich v hlinitých alebo piesčitých pôdach. V tomto prípade platí, že opotrebenie je tým menšie, čím je tvrdší funkčný povrch. Pre takýto typ abrazívneho opotrebenia sa používajú napr. nízkolegované ocele zušľachtené na vysokú pevnosť, nástrojové ledeburitické ocele alebo biele liatiny. Na rezné časti súčiastok možno použiť aj rôzne návary.

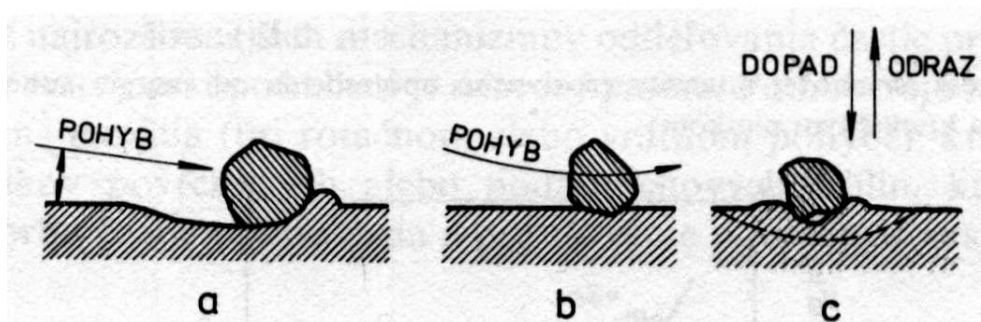
Dobrá odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu majú aj niektoré plasty- čiastočne kryštalické polyamidy, polyformaldehyd a upravený polyetylén a amorfné plasty- napr. polyvinylchlorid (PVC). Používajú sa na oplášťovanie káblov ukladaných do zeme, na podlahoviny alebo na vykladanie prepravníkov sypkých hmôt.

3. EROZÍVNE OPOTREBENIE

Je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním opotrebovávaného povrchu časticami, ktoré sú nesené: • **prúdom kvapaliny**- erózia potrubí a čerpadiel pri hydraulikej preprave rudy, uhlia; erózia vodných turbín znečistenou vodou;

- **prúdom plynu**- erózia trysiek alebo ventilátorov;
- **prúdom kvapaliny, kvapiek, pary alebo plynu**- funkčné povrchy armatúr, ktoré sú v bezprostrednom kontakte s rýchlo prúdiacim plynom alebo kvapalinou; súčasti parných turbín, ktoré pracujú v mokrej pare; erózia kozmických lodí pri prelete atmosférou.

Pre erozívne opotrebenie je typické nerovnomerné poškodenie povrchu a jeho zvlnenie, ktoré je spôsobené turbulenciou (vírením) prúdiaceho média za nerovnosťami povrchu.



Obr. 3 Schematické znázornenie princípu vzniku erozívneho opotrebenia

Intenzita erozívneho opotrebenia závisí od množstva faktorov:

- **unášajúce médium**- jeho relatívna rýchlosť, teplota, chemické zloženie;
- **unášané častice**- ich hmotnosť, veľkosť, tvar, mechanické vlastnosti, kinetická energia a uhol dopadu na exponovaný povrch;

- **vlastnosti opotrebovávaného materiálu**

Na rozdiel od abrazívneho opotrebenia môžu erozívne pôsobiť aj častice, ktoré sú väčšie ako opotrebovaný materiál, a to predovšetkým vplyvom kinetickej energie, s ktorou na povrch materiálu dopadajú. *Uhol dopadu* častíc na povrch môže byť **malý** (uplatňuje sa pri ňom mechanizmus ryhovania) alebo **veľký**.

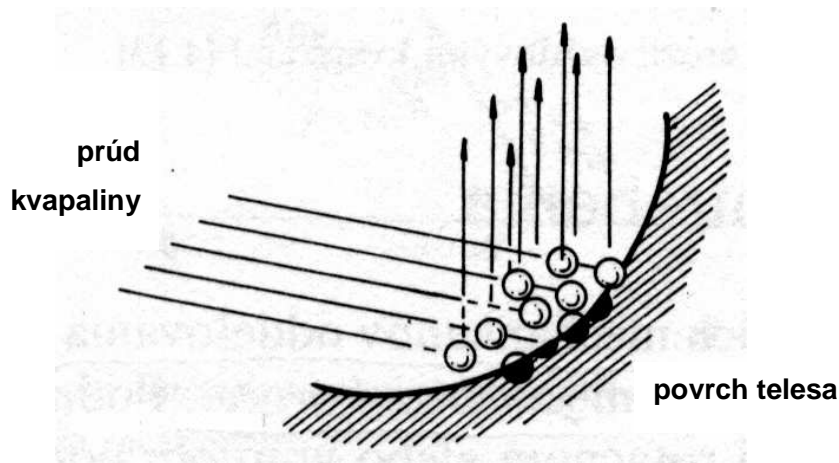
Erozívnemu opotrebeniu **pri malých uhloch** dopadu častíc najlepšie odolávajú tvrdé kovové aj nekovové materiály: • martenzitické biele liatiny vysokolegované- s obsahom 30%Cr, príp. molybdénu alebo vanádu, najlepšiu odolnosť proti erozívnemu opotrebeniu dosahujú so základnou martenzitickou štruktúrou so zvyškovým austenitom a s vylúčenými veľmi tvrdými komplexnými karbidmi typu M_7C_3 ;

- martenzitické biele liatiny nízkokolegované- legované Cr, Ni a Mo, v sumárnom obsahu v intervale 4 až 8%; majú v štruktúre vylúčené karbidy M_3C , ktoré majú menšiu tvrdosť než karbidy M_7C_3 vo vysokolegovaných liatinách, preto majú aj nižšiu odolnosť proti opotrebeniu; izotermickým žíhaním pri teplote 275°C sa zlepšuje ich odolnosť proti rázovému namáhaniu;
- martenzitické ocele s vysokým obsahom uhlíka- ďalej legované Cr, Mo alebo Ni;
- nízkokolegované ocele s nízkym obsahom uhlíka- legované Mn, Cr, Mo, Ni, V, príp. B; používajú sa pre odliatky strojných súčastí, ktoré sú vystavené menej intenzívnemu erozívnemu opotrebeniu; túto ich odolnosť možno zvýšiť zušľachťovaním;
- spekané karbidy- odolný proti erozívnemu opotrebeniu prúdom častíc rovnobežným s povrchom, a to vzhľadom na svoju vysokú tvrdosť; keďže sa zložito opracováva (dá sa len brúsiť diamantovým kotúčom), je použiteľný len v niektorých aplikáciách;
- tavený čadič- odoláva erozívnemu opotrebeniu prúdom častíc, ktoré dopadajú pod uhlom menším ako 5°, pri väčšom uhle dopadu jeho odolnosť rýchlo klesá; zároveň nie je vhodný pre aplikácie, kde majú častice vysokú kinetickú energiu; odlievajú sa z neho transportné žľaby, rúry, armatúry, a pod.
- cementované a nitridované vrstvy, tvrdé návary, korund, atď.

Erozívnemu opotrebeniu **pri veľkých uhloch** dopadu častíc najlepšie odolávajú materiály, ktoré sú schopné bez porušenia absorbovať kinetickú energiu dopadajúcich častíc. Pri menších rýchlostiach dopadajúcich častíc sa dobre osvedčili materiály s malým modulom pružnosti, ako napr. niektoré plasty alebo nezosieťované kaučuky (najčastejšie polyuretánové).

4. KAVITAČNÉ OPOTREBENIE

Je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním povrchu súčiastok v prostredí prúdiacej kvapaliny. Jeho príčinou je tvorba a zánik plyných, resp. mikroskopických bublín pár (= **kavity**) v prúdiacej kvapaline. Objavuje sa najčastejšie na lopatkách vodných turbín a vrtúľ, lodných skrutkách, a pod. Dôsledkom kavitačného opotrebenia je charakteristické **hubovité rozrušovanie** štruktúry materiálu.



Obr. 4 Schematické znázornenie princípu vzniku kavitačného opotrebenia

Predpokladom pre vznik kavitačných dutín je pokles tlaku kvapaliny až na tlak nasýtených pár pri danej teplote, napr. v mieste zúženia profilu potrubia, v dôsledku veľkej rýchlosti prúdenia kvapaliny v potrubí, v potrubí pri rozbehu čerpadla. Vzniknuté dutiny majú mikroskopické rozmery, rádovo 10^{-2} cm. V miestach, kde nastáva opätovné vyrovnanie tlakových pomerov, kondenzuje v dutinách para a okolitá kvapalina vniká do dutiny veľkou rýchlosťou (=implózia). Ak nastane táto implózia dutiny v blízkosti steny, urýchlená kvapalina naráža na materiál, namáha ho opakovanými rázmi a jeho povrch je lokálne plasticky deformovaný. Napadnutie je najskôr povrchové, vo forme jamiek a trhlín, ktoré sa postupne spájajú, prenikajú do hĺbky, až je štruktúra hubovito porušená. Porušovanie je také rýchle, že v priebehu niekoľkých týždňov dochádza k zoslabeniu prierezu alebo k vytváraniu vrubov, ktorých účinkom môže dôjsť k porušeniu súčasti.

Vlastnému kavitačnému opotrebeniu predchádza určitá inkubačná doba, počas ktorej materiál odoláva účinkom kavitácie. Dĺžka inkubačnej doby závisí od vlastností materiálu a charakteru prostredia, v ktorom k opotrebeniu dochádza.

Cyklické rázy spôsobené implóziou mikroskopických dutín spôsobujú porušovanie predovšetkým v štruktúrnych zložkách s nižšou pevnosťou. Kavitačnému opotrebeniu odolávajú materiály s homogénnou štruktúrou, napr. u ocelí sú to tuhé roztoky. U materiálov s heterogénnou štruktúrou (napr. feriticko-perlitickou, feriticko-austenitickou) dochádza k iniciácii porúch na hraniciach fáz a k rozvoju trhlín v najmenej odolnej štruktúrnej zložke.

Kavitačné opotrebenie možno znížiť voľbou vhodného materiálu a ochranou povrchu vhodným povlakovaním, ktoré predlžuje inkubačnú dobu. V uzavretých systémoch možno použiť aj kavitačné opotrebenie minimalizovať pridávaním prísad, ktoré znižujú povrchové napätie kvapaliny a zabraňujú spájaniu menších dutín do väčších.

5. ÚNAVOVÉ OPOTREBENIE

Je charakterizované vznikom porúch a oddeľovaním častíc z povrchovej vrstvy materiálu vplyvom opakovaného stykového napätia určitej veľkosti. V prípade materiálov s nízkou schopnosťou plastickej deformácie sa únavové opotrebenie môže prejavovať aj ako poškodzovanie povrchovej vrstvy krehkým lomom.

Únavové opotrebenie vzniká najčastejšie u ozubených kolies, valivých ložísk, zdvíhatiek ventilov, a pod. V týchto prípadoch sa okrem cyklicky pôsobiaceho napätia uplatňuje aj šmykové napätie, vyvolané trením medzi funkčnými povrchmi. Tento typ opotrebenia sa potom nazýva **kontaktné únavové opotrebenie** alebo **kontaktná únava** a prejavuje sa tvorbou jamiek v hĺbke niekoľko desiatín milimetra. U materiálov húževnatých sú jamky okrúhle, u materiálov tvrdých a krehkých sú jamky hranaté.

Na tvorbe jamiek sa podieľa aj mazivo, ktoré pod veľkým tlakom vniká do povrchových trhlin a prispieva k ich rozvoju. U materiálov s tvrdou povrchovou vrstvou malej hrúbky sa kontaktná únava môže prejavovať prelamaním a odlupovaním tenkej vrstvy.

Únavové opotrebenie možno znížiť predovšetkým znížením stykového napätia, voľbou vhodného materiálu a povrchovými úpravami. Nepriaznivý vplyv na odolnosť materiálu proti únavovému opotrebeniu majú vmestky v povrchových oblastiach, pretože svojimi vrubovými účinkami podporujú vznik prvých mikrotrhlin. Veľmi nepriaznivý vplyv majú najmä oxidy, vzhľadom na ich vysokú tvrdosť a často ostrý tvar. Na odolnosť materiálu proti kontaktnej únave má výrazný vplyv aj drsnosť a kvalita povrchu. Veľké stykové napätia na vrcholoch drsného povrchu vyvolávajú lokálnu plastickú deformáciu a nukleáciu trhlín.

6. VIBRAČNE OPOTREBENIE

Je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním opotrebovávaného povrchu vzájomnými oscilujúcimi tangenciálnymi posunmi stykových povrchov telies pri pôsobení normálového zaťaženia. Voľné častice, ktoré vznikajú v priebehu opotrebenia, sa vzdušným kyslíkom oxidujú, hromadia sa medzi stykovými plochami a poškodzujú povrch abrazívnym opotrebením.

Vibračné opotrebenie sa vyskytuje u súčastí s hybným uložením (valivé ložiská, čapy, hriadele), ale aj u zdanlivo nepohyblivých súčastí, ako sú lisované spoje, nity, skrutky.

Na intenzitu vibračného opotrebenia má vplyv celá rada faktorov:

- **relatívny pohyb stykových povrchov**- výrazne ovplyvňuje veľkosť vibračného opotrebenia; minimálna amplitúda relatívneho pohybu, ktorá je postačujúca pre vznik vibračného opotrebenia je 10^{-3} mm. S rastúcou amplitúdou rastie aj veľkosť vibračného opotrebenia.
- **merný tlak**- s jeho zvyšovaním lineárne rastie aj veľkosť vibračného opotrebenia; v priebehu opotrebenia nie je merný tlak konštantný, pretože produkty opotrebenia vyplňajú nerovnosti povrchu, čím sa zväčšujú stykové plochy a merný tlak klesá.
- **doba vibračného opotrebenia**- jeho priebeh je zo začiatku parabolický, neskôr priamkový; ustálený dej nastáva až po 10^4 kmitoch.
- **charakter prostredia**- zo zložiek atmosféry sa pri vibračnom opotrebení výrazne uplatňuje kyslík, ktorý poškodenie urýchľuje a dusík, ktorý poškodenie spomaľuje.
- **teplota a vlhkosť prostredia**- platí, že s rastúcou vlhkosťou prostredia sa vplyvom zmien trecích vlastností opotrebenie znižuje. U materiálov, ktoré pri nízkych teplotách strácajú plasticitu sa veľkosť vibračného opotrebenia s rastúcou teplotou znižuje.

Pri výbere materiálových dvojíc, ktoré majú odolávať vibračnému opotrebeniu, treba uvažovať s tým, že medzi stykovými plochami sa vytvára oxidická vrstva, ktorá výrazne ovplyvňuje intenzitu opotrebenia. Odolnosť

materiálov potom závisí od vlastností týchto oxidov, ktoré majú spravidla vyššiu tvrdosť a merný objem, než príslušný kov. Rast objemu oxidov medzi stykovými plochami vyvoláva zväčšenie merného tlaku, a tým aj intenzity vibračného opotrebenia. Pre konštrukčné ocele nie je vhodná kombinácia s hliníkom, niklom, cínom, pretože uvedené dvojice majú veľmi nízku odolnosť proti vibračnému opotrebeniu. Podobne nie je vhodná kombinácia liatiny a horčíka, prípadne cínu alebo kombinácia hliník- hliník. Vhodné kombinácie tvoria ocel- striebro, ocel- olovo, ocel- zlato, alebo ocel- PTFE.

Intenzitu vibračného opotrebenia možno znížiť:

- **povrchovými úpravami** (napr. guličkovanie, povrchové kalenie, nitridovanie, sulfonitridovanie, fosfátovanie)
- **mazaním** (len pre súčasti s hybným uložením);
- **zvýšením trenia vyšším merným tlakom;**
- **zdrsnením povrchu;**
- **pokrytím povrchu vrstvou plastu alebo gumy** (platí len pre súčasti nehybným uložením);
- **konštrukčným riešením-** napr. použitím pružného medzičlena, kedy možno v niektorých prípadoch vplyv vibrácií úplne odstrániť.

7. KOMBINOVANÉ OPOTREBENIE

V technickej praxi sa obvykle uvedené typy opotrebenia kombinujú, napr. dochádza ku kombinácii erozívneho a kavitačného opotrebenia. V takomto prípade, keď sa uplatňuje viac typov opotrebenia **súčasne**, označuje sa dej podľa oboch, napr. ak prebieha súčasne erozívne a kavitačné opotrebenie, označujeme dej ako **erozikavitačné opotrebenie**.

Niekedy prechádza jeden typ opotrebenia do druhého- napr. adhezívne do abrazívneho, ak vznikli pri adhezívnom opotrebení voľné častice, ktoré sa stanú vplyvom plastickej deformácie alebo oxidácie tvrdšími než základný materiál.

Všetky typy opotrebenia prebiehajú aj za spolupôsobenia chemických účinkov, ktoré môžu ovplyvňovať priebeh, ale aj intenzitu opotrebenia. Na povrchu súčastky môžu napr. vznikať produkty korózie, ktoré môžu spomaliť priebeh opotrebenia. Ak sa však táto vrstva poruší (vplyvom vysokej teploty, veľkého merného tlaku, atď.), môžu častice odlupované z tejto vrstvy naopak urýchliť opotrebovanie funkčných plôch. Ďalej môžu na povrchu súčastok vznikať korózne splodiny, ktoré sú mäkkšie ako základný materiál (sulfidy, fosfidy, atď.), majú lepšie klzné vlastnosti, a tým znižujú odolnosť proti opotrebeniu. Ak naopak nemajú dobré klzné vlastnosti, môžu sa veľmi ľahko pri relatívnom pohybe súčastok odstrániť a opotrebenie potom prebieha veľmi intenzívne.