

Kielski kanal povezuje Kielski zaljev u Baltičkom moru s ušćem Labe u Sjevernom moru. Radovi su na kanalu započeli 1887, a završeni 1895. godine. Kanal je dug 98,65 km, a bio je širok 67 m na površini i dubok 9 m. Kielski kanal počinje prevodnicom u Kielskoj luci a završava ustavom. Poslije je, između 1907. i 1914. godine, proširen na 102 m na površini (na dnu 44 m), a dubina je povećana na 11,35 m. Zbog postepenog zatrpavanja kanal se mora stalno jaružati. Najveći dopušteni gaz brodova iznosi 9,5 m, što omogućuje prolaz brodova do nosivosti 18000 t. Brodovi do nosivosti od 6000 t mogu ploviti kanalom bez ograničenja, dok se brodovi veće nosivosti moraju prilikom susreta sklanjati u proširenja (postoji 11 proširenja).

Korintski kanal spaja Jonsko i Egejsko more. Završen je 1893. godine. Brodovi s gazom do 7,3 m mogu ploviti kanalom ako im paluba nije šira od 14 m, dok brodovi široki 16,5 m mogu ploviti ako im gaz nije veći od 6,2 m. Izgradnjom Korinskog kanala skraćena je plovidba između Pireja i jadranskih luka za ~250 km.

Plovidbeni sustav St. Lawrence povezuje Atlantski ocean s Velikim jezerima u Sjevernoj Americi (sl. 27). Ostvaren je regulacijom i kanalizacijom rijeke St. Lawrence u duljini od 193 km, te izgradnjom niza kanala. Taj plovni sustav omogućuje plovidbu morskih brodova nosivosti 5000...10000 t, ovisno o tipu broda. Plovni put St. Lawrence spojen je čikaškim kanalom na riječni sustav Mississippi—Missouri—Ohio.

LIT.: Enciklopedija plovidbe. Saobraćajno izdavačko preduzeće Ministarstva saobraćaja, Beograd 1948. — H. Press, Binnenwasserstrassen und Binnenhäfen. Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1956. — A. B. Михайлов, Судходные шлюзы. Транспорт, Москва 1966. — Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин, Судходные каналы, шлюзы и судоподъемники. Транспорт, Москва 1970. — A. Agatz, Empfehlungen des Arbeitsausschusses »Üfereinfassungen«. Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin-München-Düsseldorf 1976. — D. Muškairović, Unutrašnji plovni putovi i pristaništa. Građevinski fakultet, Beograd 1979.

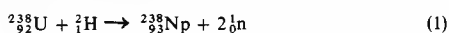
M. Pršić Z. Tadejević Ž. Vuković

PLUTONIJ, plutonijum (Plutonium, Pu), hemijski element s atomskim brojem 94 i s relativnom atomskom masom najstabilnijeg izotopa 244. U tablicama se često kao relativna atomska masa plutonijuma navodi 242, što je masa njegova drugog po redu izotopa s obzirom na stabilnost. Plutonijum se nalazi u sedmoj periodi i u IIIA skupini periodnog sistema elemenata i pripada aktinidima, velikoj grupi unutrašnjih prelaznih elemenata, koja započinje elementom aktinijumom, a završava lorencijumom (v. *Aktinijum i aktinidi*, TE 1, str. 46). Plutonijum ujedno pripada i grupi transurana, nestabilnih, radioaktivnih elemenata s atomskim brojem većim od uranijuma, koji se, uz iznimke, ne nalaze u prirodi, već ih je čovjek sam stvorio. Elektronska konfiguracija plutonijumova atoma jeste $[Rn] 5f^6 7s^2$.

Plutonijum je radioaktivan element, tj. ne sadrži stabilnih izotopa. Danas je poznato 15 radioaktivnih izotopa plutonijuma (tabl. 1), i to redom od izotopa s atomskim brojem 232 do 246 (^{232}Pu ... ^{246}Pu).

Laki izotopi plutonijuma nisu mnogo važni. Izotop ^{238}Pu važan je kao izvor energije u različitim manjim uređajima, a najvažniji je svakako izotop ^{239}Pu , koji podleže fisiji delovanjem neutrona, pri čemu se oslobađa ogromna energija. Zbog toga je plutonijum, nakon što je uspješno rešena njegova proizvodnja u velikim količinama, postao vrlo važan i tražen, a ujedno i skup metal. Plutonijum je danas ključni materijal u industrijskoj primeni nuklearne energije (v. *Nuklearna energija*, TE 9, str. 431), služi kao gorivo u nuklearnim reaktorima (v. *Nuklearna energetska postrojenja*, TE 9, str. 386; v. *Nuklearni reaktor*, TE 9, str. 464) i kao bitan eksplozivni sastojak nuklearnog oružja (v. *Nuklearno oružje*, TE 9, str. 530).

Plutonijum je potkraj 1940. godine otkrila grupa američkih naučnika (G. T. Seaborg, E. M. McMillan, J. W. Kennedy i A. C. Wahl) kada je uranijum u ciklotronu bombardovan deuteronom



Hemijskim postupkom odvojen je uranijum i neptunijum, dok je jedan deo materijala ciklotronske mete zaostao i pokazivao je drugačije osobine. Te su osobine bile pripisane elementu s rednim brojem 94. Njegovi pronalazači dali su mu ime plutonijum po planeti Pluton, jer se u periodnom sistemu plutonijum nalazi iza elementa neptunijuma, kao što se planeta Pluton, s obzirom na udaljenost od Sunca, nalazi iza Neptuna. Opisanoj metodom dobijen je izotop plutonijuma ^{238}Pu , a godinu dana kasnije pronađen je i najvažniji izotop, ^{239}Pu . Nakon što je otkriveno da izotop ^{239}Pu podleže fisiji sa sporim neutronima bolje od izotopa uranijuma ^{235}U , počeo se intenzivno proučavati plutonijum i njegova jedinjenja.

Mnogo pre nego što su veštački dobijeni, pokušavali su se transuranski elementi otkriti u prirodi. Ti su pokušaji dugo ostali bez rezultata, no iznimka je u tome upravo plutonijum. Danas je poznato da se plutonijum nalazi u prirodi, iako je njegova količina u Zemljinoj kori ekstremno malena. Plutonijumov izotop ^{239}Pu pronađen je u uranijumovim mineralima, u kojima njegov udeo, s obzirom na uranijum, iznosi $0,7 \cdot 10^{-11}$... $2,0 \cdot 10^{-11}$. Pretpostavlja se da ^{239}Pu u prirodi nastaje od ^{238}U pod dejstvom neutrona koji se stvaraju pri spontanoj fisiji ^{238}U i ^{235}U . Osim izotopa ^{239}Pu , dokazano je 1971. godine postojanje prirodnog izotopa ^{244}Pu , za koji se veruje da datira još od vremena stvaranja našeg Sunčeva sistema

Tablica 1
IZOTOPI PLUTONIJUMA I NJIHOVE KARAKTERISTIKE

Izotop	Relativna atomska masa	Tip radioaktivnog raspada ¹	Energija i udeo radioaktivnog raspada	Vreme poluraspada
^{232}Pu	232,0411	e.z.	($\leq 98\%$)	36 min
		α	6,58 MeV ($\geq 2\%$)	
^{233}Pu	233,0427	e.z.	(> 99%)	20 min
		α	6,30 MeV (0,12%)	
^{234}Pu	234,0433	e.z.	(94%)	9 h
		α	6,19 MeV (6%)	
^{235}Pu	235,0453	e.z.	(99%)	26 min
		α	5,85 MeV ($3 \cdot 10^{-3}\%$)	
^{236}Pu	236,0461	α	5,76 MeV 5,72 MeV 5,61 MeV 5,45 MeV	2,85 a
		e.z.	(99%)	
^{237}Pu	237,0483	α	5,65 MeV 5,36 MeV ($3,3 \cdot 10^{-3}\%$)	45,6 d
		e.z.	(99%)	
^{238}Pu	238,0495	α	5,50 MeV (72%) 5,45 MeV (28%)	86,4 a
		e.z.	(99%)	
^{239}Pu	239,0522	α	5,15 MeV (72%) 5,14 MeV (17%) 5,10 MeV (11%)	$2,439 \cdot 10^4$ a
		e.z.	(99%)	
^{240}Pu	240,0540	α	5,12 MeV (24%) 5,04 MeV (76%)	$6,62 \cdot 10^3$ a
		e.z.	(99%)	
^{241}Pu	241,0567	β^-	0,02 MeV (99%)	13,3 a
		α	4,90 MeV	
^{242}Pu	242,0587	α	4,90 MeV 4,85 MeV	$3,75 \cdot 10^5$ a
		e.z.	(99%)	
^{243}Pu	243,062	β^-	0,57 MeV (53%) 0,47 MeV (35%) 0,37 MeV (12%)	4,98 h
		e.z.	(99%)	
^{244}Pu	244,0642	α	4,59 MeV 4,55 MeV	$7,6 \cdot 10^7$ a
		e.z.	(99%)	
^{245}Pu		β^-	1,2 MeV 0,9 MeV	11 h
		e.z.	(99%)	
^{246}Pu		β^-	0,33 MeV 0,15 MeV	10,85 d
		e.z.	(99%)	

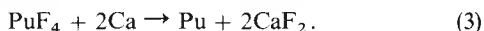
¹ e.z. = elektronski zahvat u jezgro

i postanka Zemlje. S obzirom na njihovu radioaktivnu prirodu i nestabilnost ocenjuje se da današnje količine tih prirodnih izotopa u Zemljinoj kori ne prelaze nekoliko kilograma.

Međutim, osim navedenih, prirodno nastalih izotopa plutonijuma, nalazi se u prirodi i plutonijum oslobođen u dosadašnjim eksplozijama atomskih bombi. Prva takva eksplozija u kojoj je oslobođen plutonijum bila je pokusna eksplozija u julu 1945. godine iznad pustinje u američkoj saveznoj državi New Mexico, a sledila ju je eksplozija atomske bombe 9. VIII 1945. godine nad japanskim gradom Nagasakijem pri kraju drugoga svetskog rata. Taj veštački stvoren plutonijum (izotopi ^{129}Pu i ^{240}Pu) danas je na Zemljinoj kugli široko rasprostranjen kao radioaktivno zagađenje u vazduhu, vodi i površinskom sloju tla.

ELEMENTARNI PLUTONIJUM

Osobine. Plutonijum je težak metal srebrnastobebe boje. Tvrd je i krt, a može se liti, topiti i obrađivati. Njegove se legure mogu valjati u tanke folije ili izvlačiti u žice. U čistoj se formi metalni plutonijum može pripremiti reakcijom plutonijum(III)-fluorida ili plutonijum(IV)-fluorida s kalcijumom



Neke važnije fizikalne osobine elementarnog plutonijuma navedene su u tabl. 2. Za plutonijum je karakteristično da pri zagrevanju od sobne do temperature topljenja može da postoji u 6 alotropskih modifikacija, od kojih se čak dve kontrahiraju povišenjem temperature, što je među metalima jedinstveno. Temperature prelaza među modifikacijama jesu 122 °C, 210 °C, 315 °C, 455 °C i 475 °C. Te se modifikacije po svojoj gustini međusobno prilično razlikuju, što je jedan od razloga što se plutonijum kao nuklearno gorivo ne može u metalnom obliku upotrebiti.

Tablica 2
FIZIKALNE OSOBINE PLUTONIJUMA

Osobine		Vrednost
Temperatura topljenja	°C	639,5
Temperatura isparavanja	°C	3200
Gustina, na 25 °C	g cm ⁻³	19,7
Gubitak gustine zbog zračenja, u 100 dana	g cm ⁻³	6 · 10 ⁻³
Toplota isparavanja	kJ mol ⁻¹	350
Specifični toplotni kapacitet, na 27 °C	J mol ⁻¹ K ⁻¹	32,5
Toplotna provodnost, na 40 °C	J cm ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹	0,035
Koeficijent linearnog toplotnog istezanja	K ⁻¹	50 · 10 ⁻⁶
Električna otpornost	μΩ cm	145

Poluprečnik jona Pu^{3+} iznosi 0,107 nm, a jona Pu^{4+} 0,086 nm. Elektroodni potencijal plutonijuma $E^\ominus(\text{Pu}^{3+}|\text{Pu})$ jest -2,03 V (u kiselim rastvorima).

Plutonijum je u hemijskom smislu vrlo reaktivan. Kiseonik iz vazduha oksiduje metalni plutonijum, a brzina reakcije i sastav oksida zavisi od vlažnosti i temperature vazduha. U vlažnom vazduhu plutonijum se oksiduje brže i pri tom se stvara plutonijum(IV)-oksid, PuO_2 . Povećanjem temperature (do približno 300 °C) može da dođe do samozapaljenja plutonijuma na vazduhu. Metalni plutonijum reaguje s vodom, čak i na nižim temperaturama (25...50 °C). Na temperaturi ~200 °C reakcija s vodom vrlo je brza i nastaje plutonijum-hidrid, PuH_3 .

Vrlo čisti plutonijum (>99% Pu) lako se i brzo rastvara u hlorovodoničnoj kiselini raznih koncentracija. Inertan je prema koncentrovanoj sumpornoj i octenoj kiselini, ali s razblaženim kiselinama reaguje sporo. U alkalnim rastvorima plutonijum se slabo rastvara.

U vodenim rastvorima plutonijum postoji u obliku hidratisanih jona sa stepenom oksidacije +3 do +7. To su joni Pu^{3+} , Pu^{4+} , PuO_2^+ , PuO_2^{2+} i PuO_3^{3+} okruženi molekulima vode, od kojih je poslednji stabilan samo u alkalnim rastvorima. Interesantno je i među metalima jedinstveno da su rastvori, koji istodobno sadrže jone stepena oksidacije +3, +4, +5 i +6, termodinamički stabilni. Hidratisani plutonijumovi joni, posebno Pu^{4+} , skloni su hidrolizi, a grade i vrlo stabilne kompleksne jone, koji služe pri odeljivanju i čišćenju plutonijuma.

Plutonijum ima vrlo izraženu tendenciju da gradi intermetalna jedinjenja. Osim toga on obrazuje i čvrste rastvore s metalima kojima se prečnik atoma ne razlikuje više od 15% od prečnika plutonijumova atoma. Poznate su i legure plutonijuma, koje mogu, osim drugim metodama, nastati i neposrednim dejstvom elemenata (npr. legura plutonijuma sa srebrom).

Plutonijum je radioaktivan element s jakom emisijom alfa-čestica. Energija izbačene alfa-čestice jest 5,15 MeV, njen srednji domet u vazduhu jest 3,7 cm, dok je u organizmu ljudi i životinja domet oko 40 μm. U organizmu se zadržava u prvom redu u koštanoj moždini, gde količine oko 1 μg mogu da prouzrokuju leukemiju. Kako mu je i vreme izlučivanja iz organizma vrlo veliko, to je plutonijum, kao i ostali transuranski elementi, jak radiološki otrov i jedna od najotrovnijih supstancija. U hemijskom je smislu plutonijum otrovan po prilici kao živa. Srednja dopuštena aktivnost izotopa ^{239}Pu u vazduhu, kojoj čovek može godišnje biti izložen, iznosi u radnoj sredini $7,4 \cdot 10^{-2}$ Bq/m³, a u životnoj sredini $7,4 \cdot 10^{-5}$ Bq/m³. U vodi za piće ta aktivnost iznosi $3,7 \cdot 10^3$ Bq/m³. Maksimalna dopuštena aktivnost izotopa ^{239}Pu unesenog godišnje u organizam inhalacijom u radnoj sredini iznosi $1,6 \cdot 10^2$ Bq, inhalacijom u životnoj sredini $5,4 \cdot 10^{-1}$ Bq, a ingestijom vode za piće $3,0 \cdot 10^3$ Bq. Zbog toga se s plutonijumom mora da rukuje do krajnosti pažljivo i u zatvorenim sistemima. Za rad u laboratoriji obično za tu svrhu služe kutije od nerđajućeg čelika ili plastike opremljene sigurnosnim staklom za posmatranje, rukavicama od neoprenske gume neprobojne za alfa-čestice i posebnim sistemom za ventilaciju.

Plutonijum se najčešće čuva u rastvoru azotne kiseline ili kao plutonijum(IV)-oksid, PuO_2 , što zavisi od dalje upotrebe. Pri tom se moraju obezbediti uslovi da se odvodi stvorena toplota (plutonijum je zbog jake alfa-emisije stalno topao) i da pri slučajnom prevrtanju ili lomu spremnika plutonijum ne može da izađe u okolinu. Posebno se mora paziti da se pri radu, transportu i čuvanju ne nađe na istom mestu, sudu ili spremniku masa plutonijuma veća od kritične, tj. od mase dovoljne da razvije nuklearnu lančanu reakciju fisije. U tom je pogledu plutonijum u rastvoru opasniji od čvrstog, a za kritičnost neke mase plutonijuma važan je i njen oblik (tabl. 3).

Tablica 3
KRITIČNE VREDNOSTI ZA PLUTONIJUM¹
(IZOTOP ^{239}Pu)

Čisti metal	Masa	5,6 kg
	Prečnik kugle	8,2 cm
	Prečnik valjka	4,25 cm
Vodeni rastvor ²	Debljina ploče	0,6 cm
	Masa	0,51 kg
	Volumen	4,5 L
	Masena koncentracija	7,8 g/L

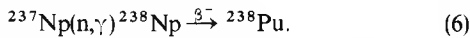
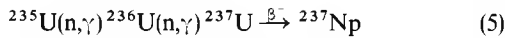
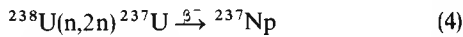
¹ Odnosi se na alfa-modifikaciju (do temperature 122 °C).

² Moraju se ispuniti sva 3 uslova.

Tako pri magacioniranju ili transportu maksimalno dozvoljena količina izotopa ^{239}Pu u jednom sudu iznosi 4,5 kg u čvrstom obliku (metal, jedinjenje ili legura), odnosno 4,0 L u obliku rastvora ili smeše. Pri tom se misli na sudove koji reflektiraju neutrone. Ako je na nekom prostoru smešteno više sudova, rastojanje među njima mora da bude 35...80 cm, što zavisi o njihovom razmeštaju.

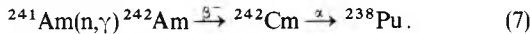
Dobijanje plutonijuma. Plutonijuma, osim u neznatnim količinama, nema u prirodi, već on nastaje u veštačkim nuklearnim reakcijama, koje se u većem obimu mogu provoditi samo u nuklearnom reaktoru. Pri tom je komercijalno važna proizvodnja izotopa ^{238}Pu i ^{239}Pu .

Izotop ^{238}Pu može da se dobije na više načina (tabl. 1), no najčešće kao polazna sirovina služi uranijum. Njegov prirodni izotop ^{238}U može da se izlaže dejstvu deuterona u ciklotronu. U mnogo većim količinama dobija se ^{238}Pu od uranijuma pri radu reaktora, gde kao sirovina mogu da posluže prirodni izotopi uranijuma, ^{238}U i ^{235}U . Oni prvo daju izotop neptunijuma ^{237}Np , koji zatim posredstvom ^{238}Np prelazi u ^{238}Pu



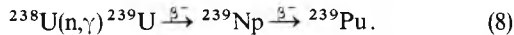
Gornje su reakcije pisane u obliku uobičajenom za prikazivanje nuklearnih reakcija, prema kojem prva oznaka u zagradi označuje bombardirajuću česticu (npr. oznaka n za neutron), a druga označuje rezultirajuću česticu ili zračenje. Dobijeni produkt nije izotopno čist jer sadrži svega 80% ^{238}Pu , a ostatak čine ^{239}Pu (16%), ^{240}Pu (3%) i ^{241}Pu (1%) uz neznatni udeo ^{236}Pu .

Mnogo čišći produkt dobije se ozračivanjem izotopa ^{241}Am i posredstvom kirijuma



Prednost je tog načina proizvodnje što u nastalom produktu nema izotopa ^{236}Pu koji bi emitovao nepoželjno γ -zračenje.

Izotop ^{239}Pu , najvažniji izotop plutonijuma, proizvodi se u nuklearnom reaktoru u kojemu se kao gorivo upotrebljava prirodni ili obogaćeni uranijum. Kao posledica bombardovanja uranijumova izotopa ^{238}U neutronima nastaje prvo izotop ^{239}U . Taj je izotop radioaktivan i emitovanjem elektrona prelazi u izotop neptunijuma ^{239}Np , a taj jednakom reakcijom konačno u ^{239}Pu



Sposobnost izotopa ^{239}Pu da apsorbira neutrone je velika, pa se (n,γ) reakcijom iz ^{239}Pu obrazuju i teži izotopi plutonijuma. Tako nastaje izotopska smeša, koja osim izotopa ^{239}Pu sadrži i izotope ^{240}Pu , ^{241}Pu i ^{242}Pu , a njihov međusobni odnos ovisi o uslovima rada i ozračivanja (v. *Nuklearni reaktori*, TE 9, str. 464).

Prirodni uranijum sadrži 99,28% izotopa ^{238}U , ali i obogaćeni uranijum (obogaćeni svojim fisibilnim izotopom ^{235}U) još uvek sadrži znatnu količinu izotopa ^{238}U . Prema tome, gornji se proces (8) pod dejstvom neutrona u reaktoru s uranijumskim gorivom stalno odvija. Taj se proces naziva nuklearnom konverzijom, jer se od izotopa ^{238}U , koji je fisibilan samo u reakciji s brzim neutronima, dobiva fisibilni materijal (^{239}Pu i ^{241}Pu), tj. takav koji podleže procesu fisije i sa sasvim sporim neutronima (v. *Fisija atomske jezgre*, TE 5, str. 445). Uz pogodne uslove proizvedena količina novog fisibilnog izotopa može da bude i veća od utrošene količine početnog fisibilnog izotopa, npr. od ^{235}U , koji je prirodni izotop uranijuma i koga u njemu ima svega 0,714%. Iako plutonijum nastaje u svakom nuklearnom reaktoru u kojemu kao nuklearno gorivo služi uranijum, grade se i specijalni reaktori namenjeni samo proizvodnji plutonijuma.

Proizvodni postupci. Danas se izotop plutonijuma ^{239}Pu industrijski dobija preradom isluženog goriva nuklearnih energetskih reaktora. Manipulisanje isluženim gorivom, njegov transport, skladištenje, obrada i postupanje s radioaktivnim otpadom opisano je u posebnom članku (v. *Nuklearno gorivo*, TE 9, str. 513). Ovaj je prikaz zbog toga sažetiji i ograničen je uglavnom na opis metoda i postupaka specifično vezanih uz proizvodnju plutonijuma.

Pri radu reaktora procesom fisije nastaju fisioni proizvodi. To su mnogi hemijski elementi, od cinka do gadolinijuma. Većina fisionih proizvoda ima velike poprečne preseke za apsorpciju neutrona, tako da postepeno zaustavljaju nuklearnu fisiju. Zbog nakupljanja fisionih proizvoda u nuklearnom gorivu može da nastane i mehaničko oštećenje gorivog elementa (konstruktivnog dela, koji sadrži nuklearno gorivo u zaštitnoj oblozi). Zbog toga se gorivo mora nakon nekog vremena vaditi iz reaktora i zameniti novim, iako je samo deo fisibilnog materijala potrošen. Tako se, npr., u nekom reaktoru hlađenom običnom (lakom) vodom pod pritiskom, koji je započeo rad s obogaćenim uranijumom (3,2% ^{235}U), može u isluženom gorivu još naći 0,9% ^{235}U , a nastat će 0,56% ^{239}Pu . Zbog malog stepena iskorišćenja fisibilnog materijala, a i zbog novostvorenog fisibilnog materijala (plutonijuma) isluženo se gorivo može po-

novno upotrebiti za rad nuklearnog reaktora ako se pročisti i oslobodi onih fisionih proizvoda koji zaustavljaju fisiju. Međutim, u industrijskoj proizvodnji plutonijuma isluženo se nuklearno gorivo preraduje tako da se plutonijum potpuno odvoji od ostalih fisionih proizvoda i od uranijuma. Proizvodnja plutonijuma preradom isluženog nuklearnog goriva obuhvaća odležavanje goriva, skidanje zaštitne obloge s gorivog elementa, rastvaranje goriva, odvajanje pojedinih komponenata te izolaciju i prečišćavanje plutonijuma.

Gorivi elementi s isluženim gorivom nuklearnih reaktora prebacuju se prvo u bazene za odležavanje. Ti su bazeni ispunjeni vodom i u njima gorivo, pre nego što se pošalje na dalju preradu, ostaje najmanje 6 meseci, ali se može čuvati neprerađeno i do 30 godina. Svrha je odležavanja da se raspadnu kratkoživući radioaktivni izotopi i da tako opadne aktivnost preostalog goriva, što ublažuje zahteve za odvođenje toplote, smanjuje štetno radiolitičko dejstvo itd.

Nakon odležavanja u bazenima gorivi se elementi transportuju u specijalizovana industrijska postrojenja za preradu isluženoga nuklearnog goriva. Kontejneri za transport nuklearnog goriva građeni su tako da omogućuju bezbedan transport železnicom, brodom ili kamionom. To su čelični sudovi teški i do 100 tona, obično cilindričnog oblika (oko 2 m u prečniku i 6-10 m dugački), snabdeveni posebnom opremom za odvođenje toplote, za refleksiju neutrona i sl.

Prije dalje obrade gorivi se elementi moraju osloboditi zaštitne obloge. Ona može da se, već prema vrsti obloge, skine mehanički pomoću uređaja konstruisanih za tu namenu ili rastvaranjem pogodnim reagensom, npr. natrijum-hidroksidom, sumpornom kiselinom i drugima. Posle hemijskog tretiranja rastvor se odbacuje i gorivo se ispira vodom. Ako se radi o oksidnom gorivu obloga je obično od nerđajućeg čelika ili neke cirkonijumske legure. S takvih se gorivih elemenata obloga ne skida, već se oni pre dalje prerade mehanički režu na komadiće dužine oko 5 cm.

Na nuklearno gorivo oslobođeno obloge ili izrezano na komadiće zajedno s oblogom dejstvuje se reagensima za rastvaranje goriva. Izbor reagensa i trajanje rastvaranja zavisi od vrste i oblika goriva. Iako se u fazi laboratorijskih ispitivanja nalaze i drugi postupci, danas se za rastvaranje goriva i njegovu dalju obradu primenjuju postupci u vodenom mediju, prema kojima se gorivo rastvara u koncentrovanu azotnu kiselinu. U toku rastvaranja oslobađaju se gasovi kao što su azotni oksidi, ali i gasoviti fisioni proizvodi. Pre nego što se ispuste u atmosferu, ti se gasovi propuštaju kroz kolone s alkalnim i kiselim rastvorima. I pored toga u atmosferu izlaze radioaktivni izotopi kriptona, joda i vodonika (^{85}Kr , ^{131}I , ^3H), od kojih, s obzirom na radioaktivno zagađenje, najveći problem predstavlja izotop kriptona ^{85}Kr . Njegova se koncentracija razblažuje protokom vazduha kroz dimnjak i gasovi se odvođuju u visinu.

Vodeni rastvor dobijen nakon rastvaranja goriva u azotnoj kiselini sadrži uglavnom sve sastojke isluženog goriva, tj. sav uranijum, plutonijum i ostale fisione proizvode. Ti se sastojci mogu međusobno odvojiti na više načina, npr. taloženjem, jonском izmenom ili ekstrakcijom.

Taloženje je bila prva metoda kojom je iz isluženog goriva nuklearnih reaktora dobijen plutonijum. Bio je to tzv. bizmut-fosfatni proces, u kojemu se plutonijum precipitirao bizmut-fosfatom i uklanjao iz rastvora. Danas se taj proces primenjuje samo retko za uklanjanje jednog dela fisionih proizvoda veoma ozračenih goriva.

I jonskom izmenom moguće je preraditi isluženo nuklearno gorivo i razdvojiti njegove komponente. Međutim, velik je nedostatak tog postupka što su jonoizmenjivački materijali na bazi sintetskih organskih polimera vrlo osetljivi na zračenje, pa se zbog radijacijskog oštećenja ne upotrebljavaju u industrijskom merilu.

Danas se za razdvajanje, prečišćavanje i izolaciju komponenata isluženoga nuklearnog goriva primenjuje ekstrakcija iz tečne faze, tzv. ekstrakcija tečnost-tečnost (v. *Ekstrakcija*, TE 3, str. 537). Primena te metode u proizvodnji plutonijuma zasniva se na sposobnosti plutonijuma da u rastvoru može postojati u više oksidacijskih stanja koja se međusobno hemijski razli-

kuju, pa se zbog toga i različito raspodeljuju između organske i vodene faze za vreme ekstrakcije. Prerada isluženog nuklearnog goriva ekstrakcijom vrlo je efikasna i danas je tako usavršena da se tokom rada gubi manje od 2% uranijuma i manje od 1% plutonijuma.

Razvijeno je više industrijskih postupaka za ekstrakciju nuklearnog goriva, koji se međusobno razlikuju prema upotrebljenom organskom rastvaraču. Tako se u postupku nazvanom Redox kao organski rastvarač primenjivao metilizobutilton (poznat i pod imenom hekson). Postupak je razvijen 1951. godine i dao je u razdvajanju uranijuma i plutonijuma vrlo dobre rezultate. Međutim, nedostatak je tog postupka što se troše velike količine anorganskih soli za tzv. zasoljavanje vodene faze i prevođenje tih metala iz vodene u organsku fazu.

Godine 1954. razrađen je u SAD postupak ekstrakcije koji se danas u svetu najviše primenjuje. Postupak je poznat pod imenom Purex, a kao organski rastvarač služi 30%-tni rastvor tributilfosfata u kerozinu. Taj je rastvarač, za razliku od heksona u postupku Redox, hemijski stabilniji i jeftiniji, daje bolje separacione faktore između organske i vodene faze, a nije potrebno dodavati velike količine soli da bi se pospešila separacija. Pre početka ekstrakcije rastvor komponenata nuklearnog goriva u azotnoj kiselini treba podesiti na potrebnu koncentraciju, ukloniti mulj i male količine nerastvornih nečistoća i prevesti uranijum i plutonijum u potrebno početno oksidacijsko stanje.

U procesu Purex (sl. 1) uranijum se na početku ekstrakcije mora nalaziti u oksidacijskom stanju U(VI), a plutonijum u Pu(IV). U tim su oksidacijskim stanjima oba metala rastvorljiva u organskom rastvaraču (tributilfosfatu), pa prilikom ekstrakcije prelaze u organsku fazu. Ostali su fisioni proizvodi u tom organskom rastvaraču praktički nerastvorljivi i zaostaju u vodenoj fazi. Iako je razdvajanje vrlo dobro, male količine fisionih proizvoda prelaze s uranijumom i plutonijumom u organsku fazu, pa se ekstrakcija mora ponoviti. To je, zapravo, reekstrakcija, jer ti metali promenom svog oksidacijskog stanja postanu nerastvorljivi u organskom rastvaraču i prevode se ponovno u vodenu fazu. Plutonijum se tako iz stanja Pu(IV) reducira u Pu(III), u kojemu je rastvorljiv u vodi. Da bi se dobili čisti metali, ekstrakcija i reekstrakcija ponavljaju se nekoliko puta, a promena oksidacijskog stanja (oksidacija, odnosno redukcija) postiže se dodavanjem prikladnih hemijskih reagenasa ili elektrohemijskim metodama.

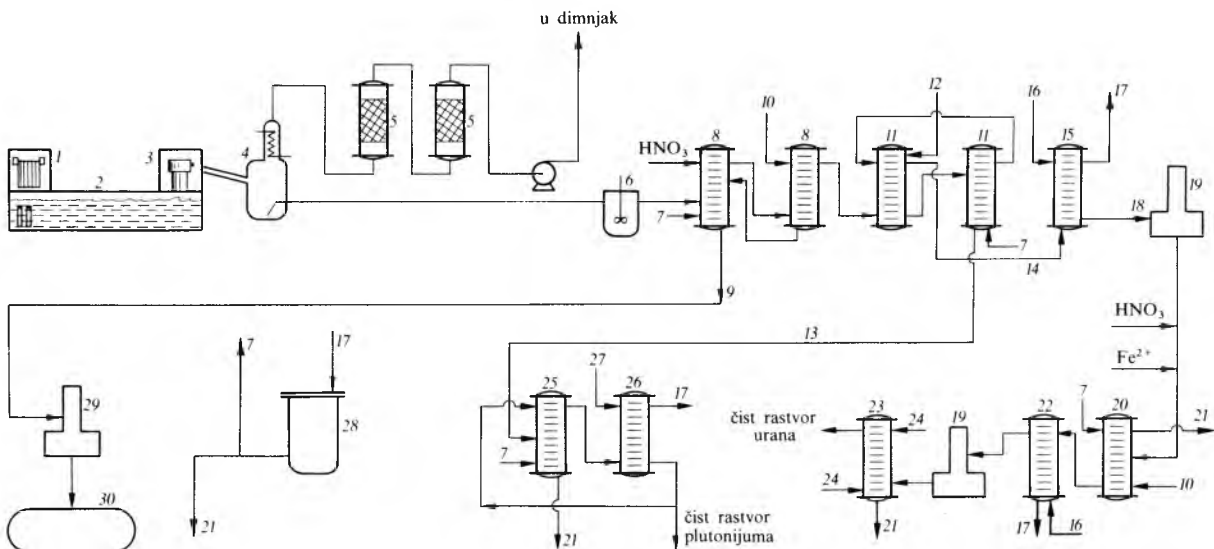
Nakon odvajanja uranijuma i plutonijuma od ostalih fisionih proizvoda ta se dva metala i međusobno razdvajaju ekstrakci-

jom. Pri tom se upotrebljava isti organski rastvarač, ali se menja oksidacijsko stanje samo jednog od njih. Tako se uranijum zadrži u stanju U(VI) rastvorljivom u tributilfosfatu, a plutonijum se prevede (npr. redukcijom sa Fe^{2+} jonima) u stanje Pu(III) i koncentrira u vodenom sloju. Odvojeni sloj s plutonijumom prečišćuje se, kao i ranije, opetovanom ekstrakcijom i reekstrakcijom, a jednako se postupa i s organskim slojem, iz kojeg se zatim izoluje prečišćeni uranijum.

Dobijeni čisti rastvor plutonijuma male je koncentracije. Stoga se rastvor koncentrira uparavanjem ili jonskom izmenom do koncentracije plutonijuma 10...100 g/L, a zatim se plutonijum taloži kao oksalat, peroksid ili fluorid. Iz prvih dveju soli kalcinacijom se dobija plutonijum(IV)-oksid, PuO_2 , koji može da služi za proizvodnju novoga nuklearnog goriva. Metalni plutonijum može da se dobije redukcijom plutonijum-fluorida.

Opisani postupci izolacije plutonijuma i uranijuma prikladni su za rad u šaržama s manjim količinama isluženog goriva, u prvom redu za laboratorijski rad. Međutim, prerada velikih količina isluženog goriva u industrijskom merilu provodi se kontinuirano u velikim ekstrakcijskim postrojenjima. U njima su pojedine faze prečišćavanja, odvajanja fisionih proizvoda i razdvajanja plutonijuma od uranijuma podeljene na ekstrakcijske cikle, a ekstrakcija je protivstrujna, što je mnogo uspešnije i ekonomičnije, a proizvodi su jednoličnijeg kvaliteta.

Zbog rada s radioaktivnim tvarima industrijska postrojenja za preradu isluženoga nuklearnog goriva mnogo se razlikuju od uobičajenih hemijskih industrijskih postrojenja, iako se primenjuju poznate hemijsko-tehnološke operacije i standardna oprema. Rad s radioaktivnim tvarima zahteva strogu zaštitu radnika i okoline te rigoroznu kontrolu radne i okolne sredine. Postrojenje je obično planirano tako da je put kojim radioaktivni materijal prolazi tokom prerade odvojen od radnog prostora za osoblje posebnim debelim zidovima od gustog betona. Radni procesi i operacije daljinski se upravljaju, a često se i popravke ili modifikacija opreme provode daljinskim upravljanjem. Ako to nije moguće, rad se zaustavlja, deo postrojenja u kvaru se dekontaminira, a nakon što radioaktivnost dovoljno opadne, u postrojenje ulazi u specijalnim odelima i opremi ekipa za uklanjanje kvarova. Osim kontrole i zaštite od radioaktivnog zračenja, posebno se mora paziti da se u bilo kojem delu postrojenja ne akumulira fisioni materijal i ne stvori kritična masa koja bi mogla uzrokovati lančanu reakciju i nuklearnu eksploziju. Čitavo postrojenje mora biti tako građeno



Sl. 1. Shema procesa Purex za preradu isluženoga nuklearnog goriva. 1 dopremljeni gorivi elementi, 2 bazen za odležavanje, 3 skidanje zaštitne obloge, 4 rastvaranje goriva u kiselini, 5 prečišćavanje gasova, 6 podešavanje sastava rastvora, 7 sveži organski ekstrahent (tributilfosfat), 8 ekstraktori za odvajanje U i Pu od ostalih fisionih proizvoda, 9 izlaz vodenog rastvora s fisionim proizvodima, 10 vodeni rastvor za ispiranje organskog ekstrahenta, 11 ekstraktori za odvajanje U od Pu, 12 rastvor za redukciju Pu, 13 vodeni rastvor sa Pu, 14 organski rastvor sa U, 15 reekstrakcija U, 16 vodeni rastvor za reekstrakciju U, 17 upotrebljeni organski ekstrahent, 18 vodeni rastvor sa U, 19 uparivač rastvora sa U, 20 ekstrakcija U, 21 otpad, 22 reekstrakcija U, 23 kolona za prečišćavanje rastvora sa U, 24 rastvor za regeneraciju, 25 ekstrakcija Pu, 26 reekstrakcija Pu, 27 rastvor za reekstrakciju Pu, 28 prečišćavanje i regeneracija upotrebljenog organskog ekstrahenta, 29 koncentrisanje radioaktivnih otpadaka, 30 skladištenje otpadaka

da može odoleti jakom razornom potresu, poplavi, tornadu i drugim nepredvidivim prirodnim katastrofama koje bi mogle uzrokovati nekontrolisano isticanje radioaktivnih tvari i zagađenje okoline.

U sklopu postrojenja za preradu isluženoga nuklearnog goriva nalaze se i uređaji za prečišćavanje organskih reagenasa te za koncentrisanje, obradu i trajno skladištenje radioaktivnih otpadaka, što je vrlo ozbiljan problem. Radioaktivni otpaci dobivaju se u obliku vodenog rastvora, pa se prvo koncentrišu tako da se dobije 0,5-0,7 m³ rastvora po toni prerađenoga nuklearnog goriva. Obično se takvi rastvori čuvaju u podzemnim rezervoarima 10-20 godina s namerom da se kasnije prevedu u čvrsti oblik i trajno čuvaju.

Industrijsko postrojenje za preradu isluženoga nuklearnog goriva obično je veliko i vrlo skupo. Njegov godišnji kapacitet prerade iznosi nekoliko stotina do nekoliko hiljada tona isluženoga nuklearnog goriva. Pri preradi 1500 tona isluženog goriva termičkog reaktora hlađenog običnom vodom pod pritiskom dobija se oko 14 tona plutonijuma.

Osim opisanog postupka za rastvaranje isluženoga nuklearnog goriva u azotnoj kiselini i za njegovu dalju obradu u vodenom mediju, u fazi laboratorijskih ispitivanja nalaze se i drugi (tzv. nevodeni, suhi) postupci za preradu goriva i izolaciju uranijuma i plutonijuma. Ti se postupci uglavnom temelje na reakcijama u taljevinama metala ili soli, npr. ekstrakcija plutonijuma nakon tretiranja rastopa goriva s istopljenim srebrom, magnezijumom ili istopljenim alkalijским fluoridima, ekstrakcija fisionih proizvoda iz rastopa uranijum-bizmuta pomoću rastopa soli MgCl₂, NaCl i KCl, zatim odvajanje fisionih proizvoda u obliku šljake iz istopljenog goriva, elektroliza iz rastopa UCl₄ i CaCl₂, u kojemu isluženo gorivo služi kao anoda, a prečišćeni se uranijum deponuje na katodi. Osim toga, fisioni se proizvodi nastoje odvojiti i na temelju razlika u hlapljivosti njihovih halogenida (destilacija uranijum(VI)-fluorida, UF₆, iz isluženog goriva).

Upotreba plutonijuma. U poslednjih tridesetak godina plutonijum je postao izvanredno važan element. To je pored uranijuma glavni izvor nuklearne energije. Očekuje se da će u skoroj budućnosti njegova uloga u mirnodopskoj i vojnoj primeni nuklearne energije biti još veća.

Zbog fisibilnosti svog izotopa ²³⁹Pu termičkim neutronima plutonijum služi u smeši s uranijumom kao gorivo energetskih nuklearnih reaktora. Mnogo se veće koristi očekuju od upotrebe plutonijuma u brzim oplodnim reaktorima, u kojima se osim oslobođene energije stvaraju i veće količine novog fisibilnog materijala.

Plutonijum služi kao fisibilni materijal i u proizvodnji nuklearnog eksploziva. Takav se eksploziv u manjem obimu može upotrebljavati i u mirnodopskim aktivnostima. Međutim, nuklearni plutonijumski eksploziv u prvom se redu primenjuje u vojne svrhe i osnovni je materijal za proizvodnju nuklearnog oružja (v. *Oružje*).

Plutonijum, koji se sastoji uglavnom od izotopa ²³⁸Pu, važan je zbog relativno velike toplote koju oslobađa tokom svog radioaktivnog raspada. Takav je materijal stalan izvor toplote i može služiti kao izvor električne struje malih nuklearnih baterija. Takve su se baterije upotrebile kao izvor energije za pogon seizmičkih i drugih mernih instrumenata postavljenih na Mesečevoj površini prilikom nedavnih putovanja svemirskih brodova u američkom istraživačkom programu Apollo. Izotop ²³⁸Pu prikladan je i kao izvor energije u generatorima ugrađenim u ljudsko telo za pogon srčanih stimulatora (v. *Medicinski elektronički uređaji*, TE 7, str. 706).

JEDINJENJA PLUTONIJUMA

Plutonijum može u svojim jedinjenjima postojati u oksidacijskim stanjima (III), (IV), (V) i (VI). Osim mnogih jonskih vrsta i složenog hemijskog ponašanja u vodenim rastvorima, poznato je mnoštvo čvrstih jedinjenja plutonijuma. Ta su jedinjenja po mnogim svojim osobinama slična jedinjenjima uranijuma i neptunijuma i mnoga su od njih tehnički važna. Među najvažnija jedinjenja plutonijuma ubrajaju se oksidi i halogenidi.

Izgaranjem plutonijuma i skoro svakog od njegovih jedinjenja na vazduhu na temperaturi oko 1000 °C nastaje *plutonijum(IV)-oksid*, PuO₂. Međutim, čisto, kristalno jedinjenje dobije se tim putem od oksalata ili peroksida. Plutonijum(IV)-oksid najvažnije je plutonijumsko jedinjenje. Njegovo visoko talište (~2400 °C pod pritiskom kiseonika), hemijska stabilnost i sposobnost da sa srodnim jedinjenjem uranijum(IV)-oksidom, UO₂, gradi kontinuiranu seriju čvrstih rastvora, čini ga izvanredno prikladnim oblikom goriva za nuklearne reaktore. U te se svrhe pripremaju mešoviti kristali UO₂-PuO₂ različita sastava (v. *Nuklearno gorivo*, TE 9, str. 513).

Poznati su i drugi oksidi plutonijuma. *Plutonijum(II)-oksid*, PuO, stvara se na površini metala izloženog atmosferskoj oksidaciji, a interesantan je oksid promjenjiva sastava, PuO_{1,5-1,75}, tipičan za mnoge metale. Njegov sastav kontinuirano se menja promenom temperature i pritiska kiseonika iznad njegove površine.

Važni su i *plutonijumski halogenidi*, od kojih se većina može pripremiti hidrohologenacijom plutonijum(IV)-oksida. Samo u oksidacijskom stanju (III) tvori plutonijum sva četiri halogenida u čvrstom stanju. Čvrsti su još i PuF₄ i PuF₆, dok PuCl₄ i PuBr₄ postoje samo u gasnoj fazi. Plutonijum(VI)-fluorid, PuF₆, jako je fluorirajuće sredstvo, koje, npr., lako prevodi UF₄ u UF₆, što je važno za obogaćivanje uranijuma gasnom difuzijom.

Plutonijum tvori i druga binarna jedinjenja tehnički važna zbog svoje stabilnosti, vatrostalnih i drugih osobina. Među njima su karbidi, nitridi, silicidi i sulfidi. Od četiri poznata plutonijumska karbida samo je *plutonijum-monokarbid*, PuC, tehnički važan. Pripraviti se može reakcijom plutonijum(IV)-oksida s ugljenikom na temperaturi oko 1600 °C. Po svojoj toplotnoj vodljivosti i drugim važnim osobinama u prednosti je pred plutonijum(IV)-oksidom i predviđa se da bi to, u smeši sa uranijum-karbidom, moglo biti nuklearno gorivo budućnosti za brze oplodne reaktore. U tom bi smislu isto tako važan mogao biti i *plutonijum-nitrid*, PuN. Kao moguće gorivo nuklearnih reaktora čak je pred karbidom u prednosti jer ne pougljeničuje materijal gorivih elemenata reaktora. Međutim, loša je strana njegove upotrebe što se tokom izgaranja u reaktoru razvija azot i što nastaje radioaktivni izotop ugljenika ¹⁴C.

PROIZVODNJA I POTROŠNJA PLUTONIJUMA U SVETU

Podaci o ukupno proizvedenim količinama plutonijuma u svetu nisu uvek u celosti dostupni, posebno ako se radi o njegovoj upotrebi u vojne svrhe. Raspoložive količine plutonijuma namenjene mirnodopskoj, civilnoj upotrebi nalaze se danas raspoređene delom u jezgrama energetskih i oplodnih nuklearnih reaktora, delom se nalaze u isluženom gorivu koje čeka na preradu, a deo je izdvojen iz isluženog goriva, očišćen i spreman za ponovnu upotrebu (tabl. 4). Osim toga, relativno velike količine čistog plutonijuma upotrebljavaju se u različite istraživačke svrhe. Interesantno je da skoro sve zemlje koje raspo-

Tablica 4
PROCENJENE KOLIČINE PLUTONIJUMA
U SVETU
(u tonama)

Mesto primene ili čuvanja plutonijuma	Godina ¹	
	1977.	2000.
Plutonijum u energetskim reaktorima u pogonu	1	163
Plutonijum u oplodnim reaktorima u pogonu	4	345
Plutonijum u isluženom nuklearnom gorivu	67	1539
Izdvojeni i očišćeni plutonijum	37	459
Plutonijum u magacinima	21	71
Plutonijum u istraživačkom radu	10	10

¹ Podaci za 2000. godinu procenjeni su na osnovu plana gradnje nuklearnih elektrana i programa razvoja nuklearne energetike.

lažu nuklearnom tehnologijom i proizvode plutonijum pohranjuju veće količine čistog plutonijuma s namerom da ga upotrebe kasnije, kad se brzi oplodni reaktori još više usavrše i kad se plutonijum u njima bude mogao bolje iskoristiti.

LIT.: J. M. Cleveland, The Chemistry of Plutonium. Gordon and Breach, New York 1969. — K. W. Bagnall, The Actinide Elements. Elsevier Publishing Co., Amsterdam 1972. — C. Keller, The Chemistry of the Transuranium Elements. Verlag Chemie, Weinheim 1972. — Plutonium Recycling in Thermal Power Reactors. IAEA, Vienna 1972. — M. Taube, Plutonium. Verlag Chemie, Weinheim 1974. — D. Popović, Nuklearna energika. Naučna knjiga, Beograd 1978. — International Nuclear Fuel Cycle Evaluation. Vol. 4. Reprocessing, Plutonium Handling, Recycle. IAEA, Vienna 1980.

A. Ruwarac

PODMAZIVANJE I MAZIVA, postupci i sredstva za smanjivanje trenja među površinama koje se dodiruju i u međusobnom su relativnom gibanju. Osim sredstava za podmazivanje mazivima se naziva i niz srodnih proizvoda. Tako su npr. mazivima srodna sredstva za prijenos topline i snage, izolacijska i dielektrična ulja, procesna ulja za dobivanje gumenih proizvoda, tiskarskih boja, kozmetičkih i farmaceutskih proizvoda, te pomoćnih sredstava za tekstilnu industriju.

Tragovi su maziva na osnovi životinjske masti i vapnenca nađeni na ležajima kotača vozila iz ←XIV st. Tako su npr. Egipćani (oko ←1400. god.) za podmazivanje osovina kola upotrebljavali kao mazivo smjesu maslinova ulja i vapna. Masti i masna ulja (v. *Masti i ulja*, TE 7, str. 665), najviše maslinovo, repičino i kitovo ulje te loj i svinjska mast, upotrebljavali su se za podmazivanje sve do druge polovice prošlog stoljeća, kad su se pojavile prve masti za podmazivanje dobivene od mineralnih ulja zgušnjavanjem kalcijem, kalijem i natrijem sapunima.

S razvojem preradbe nafte (v. *Nafta*, TE 9, str. 218) razvijala se proizvodnja i primjena mineralnih ulja za podmazivanje. Prednosti su tih ulja u prvom redu njihova manja sklonost kvarenju i pouzdanija proizvodnja u usporedbi s trigliceridnim mastima i uljima. Zbog toga se od pojave maziva proizvedenih od mineralnih ulja upotreba trigliceridnih masti i ulja za podmazivanje stalno smanjivala. Danas se upotrebljavaju samo kao dodaci mineralnim uljima u proizvodnji maziva za obradbu metala i maziva koja dolaze u dodir s vodom (npr. maziva za parne stape strojeve).

Razvoju mineralnih maziva pridonio je i razvoj tzv. aditiva. To su dodaci mineralnim uljima koji poboljšavaju njihova maziva svojstva ili se njihovim dodavanjem dobivaju nova svojstva koja su potrebna za podmazivanje. Razvoj maziva u tom smjeru počeo je dvadesetih godina našeg stoljeća. Osim toga, već se skoro pedeset godina razvijaju sintetska maziva, kojima se postižu neki učinci koji se ne mogu postići mineralnim mazivima.

Razvoj je maziva važan gospodarski činilac. Tako maziva prilagođena radu strojeva i vozila omogućuju ne samo uštede smanjenjem trošenja pokretnih dijelova, zbog manjeg trenja među njima, nego i smanjenje utroška energije, te sniženje troškova održavanja. Procjenjuje se da se u razvijenim zemljama smanjuje potrošnja energije prikladnim podmazivanjem za ~4%. To je uvjetovalo razvoj tribologije i tribotehnike, koje se bave problemima podmazivanja.

VRSTE PODMAZIVANJA

Tribologija je znanstvena disciplina koja proučava trenje, podmazivanje, konstrukcije i konstrukcijske materijale tarnih površina. Tribotehnika je primijenjena tribologija.

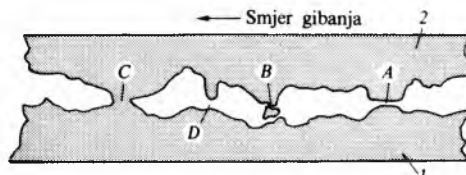
U tim se disciplinama proučavaju mehanizmi trenja i podmazivanja, problemi trošenja dijelova strojeva i vozila, gubitak snage zbog trenja i smanjivanje trenja podmazivanjem. Osobito je važno, s obzirom na maziva, rastumačiti viskoznost kao najvažnije svojstvo sredstava za podmazivanje i proučavanje učinka tih sredstava.

Trenje (v. *Elementi strojeva*, TE 5, str. 245) jest sila što se opire gibanju opterećenih površina koje su u međusobnom kontaktu (otpor trenja).

Pri suhom trenju glavni je uzročnik trenja među tim površinama njihova hrapavost, koja uvijek postoji i koja ovisi o njihovoj obradbi. S dovoljnim povećanjem vidi se da su površine hrapave (sl. 1) i da nisu sasvim čiste, već su manje ili više obložene slojevima vode, oksida, sredstava za obradbu i zaštitu od korozije, a kad su podmazane, obložene su filmom maziva.

Na tim se površinama razlikuje nekoliko područja. Jedna su od njih *područja otiranja*, tj. područja s višim grebenima s kojih

se slojevi obloge otiru i na kojima se pojavljuju elastične i plastične deformacije. Budući da su dodime površine tih vrhova vrlo malene, naprezanja su na tim mjestima vrlo velika. *Područja brazdanja* su područja gdje grebeni od tvrdog materijala (npr. osovine) brazdaju površinu od mekšeg materijala (npr. blazinice kliznog ležaja). U *područjima zavarivanja* uspostavljaju se tami kontakti, pa se oni najprije međusobno zavaruju, a zatim se zbog daljeg gibanja otkidaju zavarane čestice. Osim toga, postoje područja u kojima tarme površine nisu u kontaktu. Dakako, otkidanjem čestica i njihovim djelovanjem hrapavost se stalno obnavlja, pa se materijal tarnih površina troši.



Sl. 1. Primjer hrapavosti kliznih površina. 1 mirna, 2 pokretna površina; A područje otiranja, B područje brazdanja, C područje zavarivanja, D beskontaktno područje

U uvjetima mješovitog i graničnog trenja u beskontaktnim se zonama nalazi sloj maziva. Zbog toga se smanjuje trenje i trošenje materijala, ali njegova viskoznost ipak zahtijeva svladavanje smicanja u mazivom filmu, za što je potrebna energija koja odgovara otporu tekućinskog trenja.

I tada se na vrhovima grebena razvija toplina uz povišenje temperature. Kad su brzine gibanja i opterećenja manja, kontakti tih grebena nisu tako česti, pa trenje među njima nije tako veliko da se razvijena toplina ne bi mogla odvesti bez većeg povišenja temperature dijelova stroja. Međutim, s povećanjem brzine i opterećenja broj se tih kontakata i trenje mogu toliko povećati da se sva razvijena toplina ne može odvesti, pa se dijelovi strojeva pregrijevaju, što ih može termički oštetiti. S tim je povezan i nekorisni potrošak energije. Štetni učinak toga nekorisnog potroška može biti i preopterećenje pogonskih strojeva uz pojavu kvarova. Uz to loše podmazani strojevi rade nemirno i bučno.

Najdjelotvornije se trenje i njegove štetne posljedice ograničuju kontinuiranim filmom maziva među tarnim površinama, tj. uspostavljanjem tekućeg (kapljevito, mokro) trenja među njima. Budući da tada ne postoji izravni kontakt među kliznim površinama, trenje je ograničeno na unutrašnje trenje u mazivu (v. *Elementi strojeva, Sustavi podmazivanja kliznih ležaja*, TE 5, str. 247).

Razlike su koeficijenta trenja za različite vrste trenja na tarnim površinama od konvencionalnih konstrukcijskih materijala vrlo velike (tabl. 1). Međutim, u posljednje se vrijeme upotrebljavaju novi konstrukcijski materijali, npr. politetrafluoretilen (PTFE, teflon), poliamidi, polietilen. Njihove tarme površine ne treba podmazivati jer koeficijenti suhog trenja među njima imaju vrlo male vrijednosti. Osim toga, moguće je u konstrukcijski materijal ugraditi čestice grafita ili molibden-disulfida pa se tada govori o podmazivanju čvrstim mazivima. Takvi se materijali upotrebljavaju za izradbu specijalnih strojnih elemenata, osobito nekih ležaja i zupčanika.

Tablica 1
TRENJE I TROŠENJE U ELEMENTIMA STROJEVA

Vrste trenja	Koeficijent trenja	Trošenje
Suho trenje klizanja	0,3	veliko
Suho trenje valjanja	0,005	vrlo malo
Mješovito trenje klizanja	0,005	osjetno
Teukućinsko trenje	0,005...0,1	praktički nikakvo

Učinci podmazivanja. Osim ograničavanja trenja i njegovih štetnih posljedica (razvijanje topline, trošenje tarnih površina i gubitak energije), primjenom podmazivanja filmovima od uljnih i masnih maziva odvodi se razvijena toplina i čestice nastale trošenjem materijala tarnog sustava i sprečava se dovođenje