

često kritizirana kao proturječna i neprecizna, što otvara mogućnost za različite interpretacije. Definicija je proturječna jer iskustvo pokazuje da ne postoji kvantitativni materijalni razvitak koji može teći beskonačno kad se zna da su prirodna bogatstva i životni prostor na Zemlji konačni. Definicija traži zadovoljavanje potreba, i to posebno potreba siromašnih u svijetu, a da ne utvrđuje te potrebe i tko o tome može odlučivati. Istodobno se zahtijeva ograničenje potrošnje dobara i energije, o čemu odlučuje organizirano društvo, država, utjecajem na izbor tehnologije i na socijalnu strukturu, a time to društvo odlučuje i o potrebama budućih generacija.

Pitanje održivog razvitka često se izjednačuje s uravnoteženom upotrebom prirodnih bogatstava, što se može primijeniti samo na obnovljiva prirodna bogatstva. Održivi razvitak može neograničeno trajati samo u svom kvalitativnom smislu; kvantitativno on je ograničen sposobnošću okoliša da stvara obnovljiva prirodna bogatstva, ali i da prihvaća otpad. Gospodarski održiv sustav napreduje tada u znanju, organizaciji, tehničkom umijeću i mudrosti, a da pritom ne troši, ne unosi ili ne raspodjeljuje stvari i energiju preko određene mjere. Zato Međunarodna unija za zaštitu prirode definira održivi razvitak kao onaj koji omogućuje življenje unutar kapaciteta nosivosti globalnog ekosustava. Pod kapacitetom nosivosti razumije se omjer brzine trošenja kritičnih prirodnih bogatstava prema brzini njihova obnavljanja. Ni ta definicija nije bez zamjerke, jer se o kriterijima za određivanje kapaciteta nosivosti još uvijek raspravlja.

Koncepcija strategije kapaciteta okoliša za prihvatanje neke djelatnosti zasniva se na proučavanju i mjerenjima sposobnosti ekosustava da prihvati neku djelatnost koja zauzima prostor i koja troši prirodna bogatstva, da nepovratno prihvati otpad, odnosno neko opasno zagađivalo, ili da isto pretvori u neopasan oblik, a da trajno ne nastane šteta za taj ekosustav. Ta se strategija temelji na dinamičkom pristupu okolišu i njegovoj zaštiti, a zahtijeva široko i temeljito poznavanje i cjeline i svakog bitnog segmenta okoliša koji se zbog ljudskih djelatnosti opterećuje. Pritom mogu nastati i vremenski odloženi učinci, kao npr. već spomenuta tzv. kemijska tempirana bomba. Svi propisi, kriteriji i norme za djelatnost u prostoru te za odbacivanje zagađivala u okolišu podređuju se karakterističnim parametrima okoliša. Određivanje namjene prostora i djelatnosti u njemu, i time kvalitete okoliša, društvena je odluka, dakle i predmet socijalne ekologije. Jednom donesenoj odluci, koja može imati nadnacionalne, pa čak i globalne okvire, podređuju se političke, socijalne i ekonomske odluke. Da to nije iluzija budućnosti, svjedoči odluka iz 1989. o smanjenju proizvodnje i upotrebe klorfluoralkana (freona), u prvom redu u rashladnim uređajima) radi zaštite polarnih stratosferskih ozonskih slojeva, ili neizbježna globalna odluka o prestanku krčenja šuma afričkog i južnoameričkog kontinenta, te ograničavanje količine ugljičnog dioksida koji se spaljivanjem ugljikovodika ili biomase ispušta u atmosferu. U istom je smislu 1993. donesena i Konvencija o sprečavanju promjene klime, kojom se ograničava količina ugljičnog dioksida nastalog spaljivanjem fosilnih goriva (ugljena, nafte, plina) koja se smije ispuštati u atmosferu.

Koncepcija najboljeg praktičnog rješenja za okoliš jest traženje takvog rješenja nekog razvojnog projekta ili rekonstrukcije postojećeg projekta da ono predstavlja najveću dobrobit i najmanju štetu za globalni okoliš kao cjelinu, s obzirom na kratkoročne i dugoročne posljedice. Zahtijevaju se dokazi da je izabrano rješenje najbolje za globalni okoliš kao cjelinu, a ne samo za jedan njegov segment (zrak, vodu ili tlo) niti samo za onaj dio koji potpada pod nacionalnu ili regionalnu jurisdikciju ili je samo dio ekonomskog sustava države ili grupacije država. Na taj se način nastoji postići kontrola zagađivanja koja je najbolja za okoliš kao cjelinu izborom prikladnih razvojnih projekata i promjenom industrijske strukture.

Strategija održivog razvitka treba naznačivati okvire novoga društvenog odnosa prema okolišu, prema prostoru i prirodnim izvorima, s punom sviješću o odgovornosti pred sutrašnjim generacijama. To sutra, u doba treće svjetske industrijske revolucije, nije lako predvidjeti pa je stoga oprezno iskorištavanje prirodnih bogatstava, zraka, voda i mora, šuma i plodnog tla, sirovina i energije imperativ egzistencije. Taj imperativ glasi: iskorištavati u prvom redu ono što se može obnavljati i ponovno stvarati;

razumno štedjeti one izvore sirovina i prostor kojih iskorištavanje nepovratno mijenja naš okoliš; proizvoditi takve proizvode i iz takvih sirovina da se mogu razgraditi u neškodljive proizvode ili preradbom ponovno vratiti u proizvodnju.

LIT.: The World Commission on Environment and Development (Gro Harlem Brundtland, Chairperson), Our Common Future. Oxford University Press, Oxford, 1987. – D. D. Chiras, Environmental Science: Action for a Sustainable Future. Benjamin/Cummings Publ. Co., Redwood City 1991. – P. C. Stern, O. R. Young, D. Druckman (Editors), Global Environmental Change: Understanding the Human Dimension. National Research Council/National Academy Press, Washington D. C. 1992. – M. Beazley, Caring for the Earth: A Strategy for Survival. Reed Consumer Books Ltd., London 1993. – T. Jackson (Editor), Clean Production Strategies: Developing Preventive Environmental Management in the Industrial Economy. Stockholm Environment Institute, Lewis Publishers, Boca Raton 1993.

V. Pravdić

ZAVARIVANJE I SRODNI POSTUPCI, spajanje materijala nerastavljivim spojem ili razdvajanje materijala bez mehaničkih reznih alata, najčešće pomoću topline, u što se ubraja zavarivanje, lemljenje, naštrcavanje i toplinsko rezanje.

Zavarivanje je spajanje materijala pri kojem se dijelovi koje treba spojiti zavarivanjem (*zavarivani dijelovi*) na spojnom mjestu obično zagriju do omekšalog, plastičnog stanja ili se rastale, a spajaju se staljivanjem, uz dodavanje ili bez dodavanja materijala. Često se uz zagrijavanje primjenjuje i povećani tlak, dok je zavarivanje bez djelovanja topline rijetko. *Zavareni spoj* sastoji se od *zavara* (dio materijala koji je prilikom zavarivanja bio rastaljen) i susjedne zone u kojoj zbog povišene temperature nastaju strukturne promjene. Zavarivanje je posebno važno u građnji čeličnih konstrukcija (u brodogradnji, mostogradnji, teškoj strojogradnji), ali se zavaruju i skoro svi ostali metali, te staklo i dio polimernih materijala (plastomeri).

Lemljenje je spajanje dijelova, najčešće metalnih, pomoću rastaljenoga dodatnog materijala (*lema*) koji služi kao metalno veživo. Pritom talište lema treba biti barem 50 °C niže od tališta materijala koji se spaja.

Naštrcavanje je nanošenje rastaljenoga materijala na neku površinu pri čemu se upotrebljava ista radna oprema i isti izvor energije kao i pri zavarivanju.

Toplinsko rezanje je razdvajanje materijala pomoću topline, bez mehaničkih reznih alata. To je zavarivanju srodan postupak jer, iako po svrsi upravo suprotan, zahtijeva jednake ili slične izvore energije i radnu opremu.

Zavarivanju i lemljenju srodno je i *lijepljenje*, jer je to također spajanje materijala nerastavljivim spojem. Ono se, međutim, po vrsti veživa, radnim uvjetima i opremi bitno razlikuje, a opisano je u članku *Ljepila*, TE 7, str. 581.

Usporedno s kovanjem i lijevanjem metala razvijalo se i zavarivanje i lemljenje. U Kini su pronađena željezna kola iz doba prije Krista kojima su sastavni dijelovi spajani ljevačkim zavarivanjem, odnosno zalijevanjem željeznom talinom, koja je nakon skrućivanja stvorila nerastavljiv spoj. Jedan je od najstarijih načina zavarivanja i kovačko zavarivanje, pri čemu se dva komada kovine, ugrijana u kovačkoj vatri, spajaju udarcima čekića. U egiptskim je kraljevskim grobovima nađen nakit kojemu su dijelovi spajani lemljenjem, a u Pompejima željezni cjevovod spojen nekom vrstom kovačkog zavarivanja.

Zavarivanje i srodni postupci doživjeli su nagli razvoj tek u posljednjih stotina godina kada se kao izvor topline počeo primjenjivati električni luk. N. de Benardos i S. Olszewski su 1885. patentirali zavarivanje ugljenom elektrodom, a N. G. Slavjanov je 1888. patentirao elektrotopno zavarivanje obloženim elektrodom. Bio je to golem napredak, jer se električni luk nije više primjenjivao samo kao izvor topline već je elektroda ujedno služila kao dodatni materijal.

Istodobno s elektrolučnim zavarivanjem razvijalo se i elektrootporno zavarivanje. Amerikanac E. Thompson prijavio je niz patenata s tog područja između 1885. i 1900. godine. Oko 1900. razvijeno je u Njemačkoj i Francuskoj plinsko zavarivanje. Nijemac Goldschmidt uveo je 1903. aluminotermijsko zavarivanje.

Prvi potpuno zavaren trgovački brod sagrađen je 1930. u Charlestonu, SAD. Između 1930. i 1953. godine razvijeni su postupci zavarivanja pod praškom, u zaštitnoj atmosferi netaljivom i taljivom elektrodom i zavarivanje plazmom. Ostali brojni postupci uvedeni su poslije, pedesetih i šezdesetih godina, a glavni je poticaj došao od industrije uključene u svemirska istraživanja.

Prvi je zavareni most u ovom dijelu Europe bio zagrebački Savski most, duljine 234 m i širine 9 m, koji je sagrađen 1938. godine (sl. 1). Pri gradnji mosta zavarivački nadzor obavljao je ing. D. Kunstel, osnivač Visoke tehničke škole u Zagrebu i osnivač (1958) prve Katedre za zavarivanje u Hrvatskoj i u srednjoj i jugoistočnoj Europi.



Sl. 1. Savski most u Zagrebu (1938), potpuno izgrađen zavarivanjem

Prednosti su zavarivanja mogućnost izradbe lakših konstrukcija od lijevanih i zakovanih (v. *Metalne konstrukcije*, TE 8, str. 391), te uštede koje se mogu postići smanjenjem mase materijala ili utroška goriva. Novi izvori energije, npr. elektronski snop i laser, ubrzali su razvoj novih postupaka zavarivanja i omogućili zavarivanje dotad nezavarljivih materijala (tabl. 1).

a istodobno su sposobni preuzeti i sve posljedice što ih uzrokuje pojava zavarenih spojeva u metalnoj konstrukciji. Na zavarljivost materijala utječe njegov kemijski sastav, odnosno udio legiranih elemenata i nečistoća, izmjere dijelova koji se zavaruju, vrsta dodatnog materijala te priprema za zavarivanje. Ovisnost zavarljivosti o tim čimbenicima nije izravna i ne može se jednoznačno definirati i brojačno izraziti.

Pri većini postupaka zavarivanja materijal se lokalno zagrijava sve do tališta. Takvo zagrijavanje može uzrokovati strukturne promjene zbog difuzije atoma jednog elementa u rešetku drugog elementa i štetne kemijske reakcije.

Na ostvarivanje i svojstva zavarenog spoja utječu brzina zavarivanja, količina i gibanje taline, stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala, plinovi koji pri višim temperaturama ulaze u rastaljeni materijal te neravnomjerna raspodjela temperature, s mjestimično visokim temperaturama i velikim temperaturnim gradijentima. Rastaljeni dodatni materijal i nastala talina kemijski reagiraju s lokalnom atmosferom i rastaljenom troskom. Općenito sve reakcije taline s kisikom, vodikom i dušikom negativno utječu na mehanička svojstva zavarenog spoja, bilo da mu smanjuju čvrstoću, žilavost i sposobnost plastične deformacije, bilo da mu povećavaju poroznost, sklonost pukotinama, starenju i krhkom lomu.

Homogenost se zavarenog spoja može narušiti zbog pojave mikropukotina i makropukotina, te zbog naljepljivanja uključaka (štetnih primjesa, spojeva koji su nastali zbog namjerno ili nenamjerno dodanih elemenata). Najveće su pogreške pukotine koje se prema temperaturi nastanka i karakteristikama mogu podijeliti na vruće, hladne, pukotine zbog žarenja i lamelne pukotine. Širenje pukotina u materijalu male plastične deformacije ili bez plastične deformacije naziva se krhki lom. Često lom nastaje pri malim opterećenjima, manjim od granice tečenja, zbog pre-

Tablica 1
USPOREDBA ZAVARIVAČKIH I SRODNIH POSTUPAKA

Odlika postupka ili spoja*	Elektrolučno zavarivanje	Zavarivanje elektronskim snopom ili laserom	Elektrootporno preklapno zavarivanje	Elektrootporno sučeljno zavarivanje i zavarivanje trenjem	Zavarivanje polimernih materijala	Tvrdo lemljenje
Mogućnost opterećenja	5	5	4	5	5	4
Statička nosivost	5	5	4	5	4	4
Dinamička nosivost	4	4	3	4	3	3
Otpornost na povišenu temperaturu	5	5	5	5	4	3
Otpornost na koroziju	4	4	3	5	5	3
Točnost oblika	2	4	3	3	3	4
Brtvljenje	5	5	1...5	5	5	4
Prigušivanje vibracija	4	4	2...3	4	5	4
Trošak spajanja	4	2	4	4	4	4
Trošak materijala	3	5	5	4	4	2...4
Trošak naknadne obradbe	3	5	4	3	4	4

*ocjenjivanje: od vrlo povoljnog (ocjena 5) do sasvim nepovoljnog (ocjena 1)

U posljednjih su desetak godina znatno razvijeni uređaji, oprema i dodatni materijali za zavarivanje, što je omogućilo veću mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju zavarivanja. Masa izvora struje za zavarivanje posljednjih se godina smanjila i do deset puta. Masa klasičnih izvora struje bila je 200...300 kg, dok je masa današnjih izvora jednake nominalne struje zavarivanja manja od 50 kg. Pojavili su se i izvori za zavarivanje impulsnom strujom. Zavarivanje su unaprijedili i uređaji na kojima se umjesto četiri ili pet nezavisnih parametara namješta samo jedan parametar, npr. struja, a svi se ostali parametri dovode na optimalnu vrijednost. Automatizaciju zavarivanja omogućio je razvoj senzora za automatsko vođenje glave za zavarivanje. Novi su dodatni materijali prilagođeni automatizaciji i robotizaciji, a najveći je napredak postignut na području proizvodnje elektroda za zavarivanje u zaštitnoj plinskoj atmosferi.

Prema definiciji Međunarodne organizacije za normizaciju, metal je za određenu namjenu zavarljiv nekim postupkom zavarivanja ako se može postići homogenost spoja, pri čemu spojevi svojim mehaničkim svojstvima odgovaraju lokalnim zahtjevima,

laska materijala iz plastičnoga u krhko stanje. Krhki je lom svojstven nelegiranim i niskolegiranim čelicima, koji imaju prostorno centriranu kubičnu rešetku.

Ispitivanje zavarljivosti materijala provodi se posredno, ispitivanjem sklonosti povećanju tvrdoće, starenju, krhkom lomu, lamelnom trganju, nastajanju hladnih i vrućih pukotina te pukotina u materijalima velike čvrstoće.

Zbog lokalnog zagrijavanja i hlađenja pri zavarivanju u materijalu nastaju naprezanja koja ostaju i nakon završetka obradbe. Osobito su velika naprezanja pri zavarivanju taljenjem, kada dostižu granicu tečenja materijala. Ta se naprezanja bez prisutnosti vanjske sile nazivaju napetosti. Napetosti zbog zavarivanja mogu se smanjiti odžarivanjem, vibriranjem, valjanjem, iskivanjem i eksplozijom.

Deformacije zavarenih spojeva i konstrukcija promjene su oblika i izmjera zbog naprezanja pri zavarivanju. One mogu biti vrlo velike pa su često potrebne posebne naprave za njihovo sprečavanje. O kontroli i ispitivanju zavarenih spojeva v. *Defektoskopija*, TE 3, str. 183.

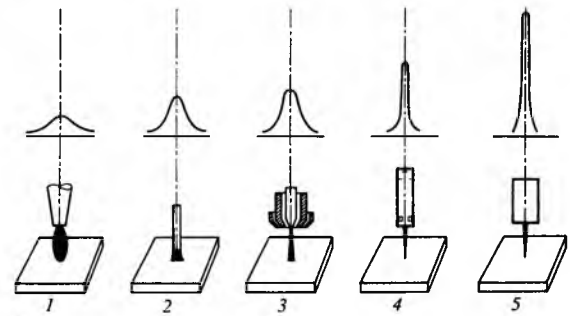
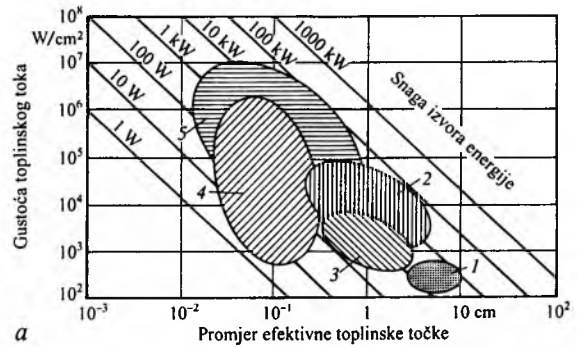
Toplinska se obradba zavarenih spojeva primjenjuje radi smanjenja pogrešaka i napetosti u zavaru. Predgrijavanjem na 100...600 °C sprečava se nastanak hladnih pukotina, a dogrijavanjem nakon zavarivanja omogućuje se izlazak vodika iz zavarenog spoja. Odžarivanjem na temperaturi 550...800 °C smanjuju se zaostala naprezanja. Normalizacija se provodi nakon zavarivačkih postupaka koji uzrokuju gruboznatu strukturu u zavaru (najčešće zavarivanja pod praškom ili pod troskom), a temperatura normalizacije ovisi o vrsti materijala. Ostale se vrste toplinske obradbe provode prema vrsti materijala radi homogenizacije, tj. izjednačenja svojstava zavarenog spoja sa svojstvima osnovnog materijala.

Prilikom zavarivanja i srodnih postupaka potrebne su zaštitne mjere kako bi se spriječio električni udar, opasnost od ultraljubičastog i infracrvenog zračenja električnog luka, onečišćavanje zraka dimom i plinovima, požar, eksplozija, nedostatak kisika i sl. Zaštitne su mjere nošenje zaštitne odjeće (maska sa zaštitnim staklom, kožne rukavice, pregače i odijela, posebne cipele, odjeća i rukavice za toplinsku izolaciju), primjena malih napona pri zavarivanju u zatvorenim metalnim prostorima, upotreba respiratora (filtara) i rad uz lokalnu ili potpunu ventilaciju.

ZAVARIVANJE

Zavarivački se postupci dijele prema izvoru ili načinu prijenosa energije koja se pretvara u toplinu potrebnu za ostvarenje spoja (plinski plamen, električni luk, plazma, laser, elektronski snop, ultrazvuk), a izvori se razlikuju prema snazi, količini topline koja se unosi u osnovni materijal, najvećoj radnoj temperaturi i gustoći toplinskog toka (sl. 2).

Danas je poznato više od pedeset različitih postupaka zavarivanja. Ipak, najveći se dio proizvodnje zavarivanjem, više od 90% ukupne mase prerađenog materijala, obavlja primjenom samo nekoliko postupaka. To je u prvom redu elektrolučno zavarivanje (ručno zavarivanje obloženom elektrodom, zavarivanje taljivom elektrodom ili netaljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi i zavarivanje pod praškom) te elektrotoporno zavarivanje.



Sl. 2. Gustoća toplinskog toka, promjer efektivne toplinske točke i snaga (a) te koncentracija topline na površini (b) s obzirom na različite izvore energije za zavarivanje. 1 plinski plamen, 2 električni luk, 3 plazma, 4 laser, 5 elektronski snop

Često se primjenjuje i plinsko zavarivanje, dok se ostali postupci primjenjuju za dijelove i konstrukcije složena oblika ili vrlo malih i velikih izmjera te za spojeve koji se ne mogu zavariti uobičajenim postupcima. U tablici 2 navedena je prikladnost različitih zavarivačkih postupaka za zavarivanje pojedinih metala.

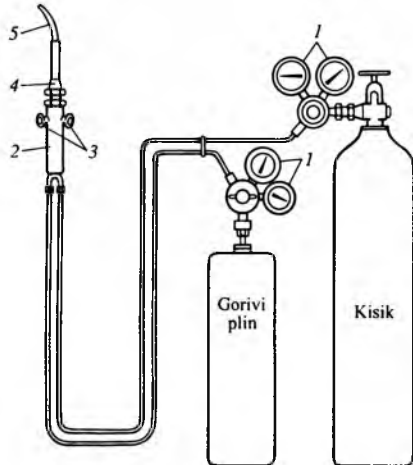
Tablica 2
PRIKLADNOST POSTUPAKA ZA ZAVARIVANJE I LEMLJENJE POJEDINIH METALA I SLITINA*

Metal ili slitina	Plinsko zavarivanje	Elektrolučno zavarivanje					Zavarivanje plazmom	Zavarivanje pod troskom	Tvrdo lemljenje
		ručno, obloženom elektrodom	pod praškom	taljivom elektrodom u zaštitnom plinu	taljivom elektrodom punjenom praškom	netaljivom elektrodom u zaštitnom plinu			
Aluminij	C	C	C	A	0	A	A	C	B
Tehnički bakar	A	B	0	A	0	A	B	0	A
Bakrene slitine:									
mjed	A	C	0	C	0	B	C	0	A
bronca	B	A	0	A	0	A	A	0	A
bakar-nikal	A	B	0	A	0	A	A	0	A
Željezo:									
lijevano, kovkasti i nodularni lijev	A	A	C	B	B	B	B	C	A
Olovo	A	0	0	0	0	B	B	0	0
Magnezij	0	0	0	A	0	A	B	0	0
Tehnički nikal	B	A	C	A	0	A	A	0	A
Niklene slitine:									
inkonel	C	A	0	A	0	A	A	0	A
nikal-srebro	B	0	0	C	0	C	C	0	A
monel	A	A	C	A	0	A	A	0	A
Plemeniti metali	B	0	0	0	0	A	A	0	A
Čelik:									
niskouglični	A	A	A	A	A	A	A	A	A
niskolegirani	A	A	A	A	A	A	A	A	A
visokouglični i srednjouglični	A	A	B	A	A	A	A	B	A
legirani	B	A	B	A	A	A	A	B	A
nchrđajući	C	A	A	A	B	A	A	B	A
alatni	B	A	0	C	0	A	A	0	A
Titan	0	0	0	A	0	A	A	0	0
Volfram	0	0	0	0	0	B	A	0	0
Cink	C	0	0	0	0	C	C	0	0

*A preporučljivo, Iako; B prihvatljivo, ali ne najbolje; C moguće, ali ograničeno i teško; 0 ne preporuča se ili nije moguće

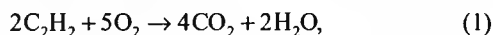
Plinsko zavarivanje metala

Pri plinskom se zavarivanju (poznatom i kao *autogeno zavarivanje*) toplina za taljenje dobiva izgaranjem plina. Spojna se mjesta zagrijavaju plinskim plamenom praktički do tališta, a spajanje se obično postiže pomoću rastaljenoga dodatnog materijala. Kao gorivi plin najčešće se primjenjuje acetylen, ali to mogu biti propan, butan ili njihova smjesa, vodik i prirodni (zemni) plin. Gorivi plin i kisik miješaju se u miješalici plamenika, a smjesa izgara na izlazu iz sapnice (sl. 3).

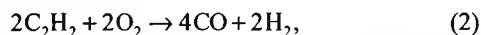


Sl. 3. Plinsko zavarivanje. 1 regulatori tlaka, 2 rukohvat, 3 regulatori protoka, 4 komora za miješanje, 5 sapnica

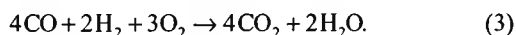
U acetilenskom se plamenu razlikuju pojedine zone u kojima se zbivaju različite kemijske reakcije. Ukupna je kemijska reakcija za potpuno izgaranje acetilena



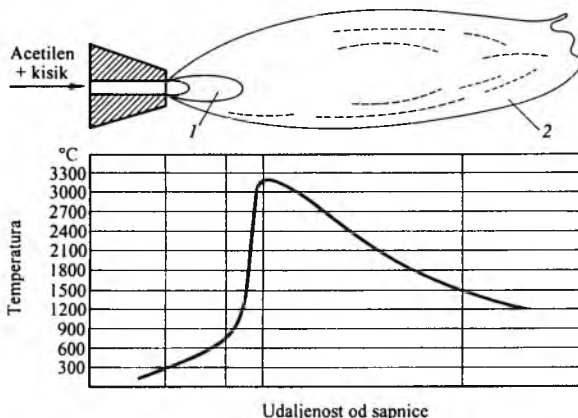
ali se ona zbiva u dva koraka. Prvi je korak nepotpuno izgaranje acetilena u ugljični monoksid:



u kojem se troši kisik iz smjese s acetylenom, dakle stlačeni kisik iz boce. Područje te reakcije prepoznaje se unutar plamena po malom, svjetlijem žišku uz sapnicu (sl. 4). Drugi je korak reakcije izgaranje ugljičnog monoksida u ugljični dioksid:



U toj reakciji sudjeluje kisik iz zraka koji okružuje plamen, a područje je reakcije vanjska, plavo obojena ovojnica plamena. Najveća je temperatura plamena ispred vrha unutrašnjeg žiška i to je tzv. optimalno mjesto plamena. Pri zavarivanju se plamenik drži tako da se optimalno mjesto nađe točno na površini zavarivanog dijela.



Sl. 4. Struktura acetilenskog plamena i temperatura u njegovoj osi. 1 žižak, 2 ovojnica

Mijenjanjem udjela acetilena i kisika u plinskoj smjesi pomoću ventilâ na plameniku može se postići različita atmosfera i temperatura plamena (povećavanjem udjela kisika temperatura raste). *Neutralnim plamenom* naziva se onaj u kojem izgara plinska smjesa jednakih obujamnih udjela (približno 1 : 1), dakle bez viška acetilena ili kisika. Neutralni je plamen najprikladniji za zavarivanje čelika, posebno nehrđajućeg.

Ako plamen sadrži višak kisika (*oksidacijski plamen*), rastaljeni se metal može pjeniti i iskriti, uz nastanak krhkih oksida koji mogu stvoriti površinski sloj troske ili se zadržati u unutrašnjosti zavarenog metala. Zbog toga se takvim plamenom ne smije zavarivati čelik, ali se može primijeniti za mjed. Ako, međutim, plamen sadrži višak acetilena (*redukcijski plamen*), ugljik će ući u rastaljeni metal. Jedan će dio ugljika izgorjeti, što će uzrokovati poroznost u ohlađenom metalu, a drugi dio može stvoriti karbide i tako pospješiti koroziju. Takav je plamen niže temperature, pa je prikladan za zavarivanje olova i za lemljenje.

Elektrolučno zavarivanje metala

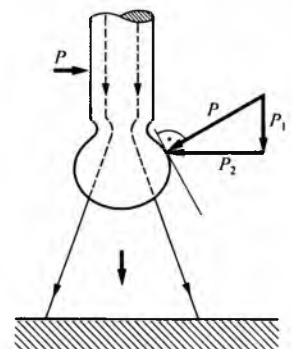
Pri elektrolučnom se zavarivanju za taljenje metala primjenjuje toplina električnog luka koji se uspostavlja između zavarivanog dijela i elektrode (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 193). Zavareni spoj nastaje taljenjem osnovnog metala, najčešće s dodatnim materijalom, uglavnom slična kemijskog sastava. Elektrode mogu biti ili taljive, pa ujedno služe i kao dodatni materijal, ili netaljive.

Izvori struje za zavarivanje. Za održavanje električnog luka obično je potrebna razmjerno jaka struja (nekoliko desetaka do nekoliko stotina ampera) niskog napona (nekoliko desetaka volti). Električni se luk može održavati bilo istosmjernom bilo izmjeničnom strujom, pa kao izvori istosmjerne struje služe generatori istosmjerne struje i ispravljači, a kao izvori izmjenične struje transformatori i pretvarači frekvencije.

Za uspostavljanje i održavanje električnog luka važan je i napon praznog hoda izvora (napon uspostavljanja električnog luka). Što je taj napon viši, lakše se uspostavlja i održava električni luk, ali je radi sigurnosti zavarivača ograničen na 70 ··· 110 V.

Prijenos metala pri elektrolučnom zavarivanju. Tri su osnovna načina prijenosa dodatnog metala od elektrode do zavarivanog dijela: slobodnim letom kapljica, premošćivanjem i pod zaštitom troske. Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom metalnom elektrodom rastaljeni se metal s elektrode prenosi najčešće u obliku kapljica kratkim ili štrcajućim lukom. Kratkim se lukom metal prenosi uz male struje zavarivanja i niske napone električnog luka. Takav je način zavarivanja, zbog male količine rastaljenog metala, prikladan za zavarivanje tankih limova, zavarivanje korijenskog sloja i zavarivanje u prisilnim položajima. Prijenos metala štrcajućim lukom ostvaruje se uz jake struje zavarivanja i visoke napone električnog luka. Zbog velikog prodiranja i velikog unosa topline taj je postupak pogodan za zavarivanje debelih limova, ali samo u položenom položaju. Na prijenos metala najviše utječe elektromagnetna sila, ali i gravitacijska sila, površinska napetost, strujanje plazme, eksplozijske sile i sile zbog djelovanja plinova. Oko vodiča kojim teče struja nastaje koncentrično magnetno polje. Elektromagnetna sila P djeluje radijalno prema sredini vodiča i okomito na strujni tok (v. *Elektrotehnika*, TE 5, str. 130). Međutim, na rastaljenom vrhu elektrode linije se strujnog toka izobličuju. Elektromagnetna je sila na svakom mjestu i dalje okomita na strujni tok, ali ne nužno i na os vodiča. Ona se može rastaviti na dvije komponente (sl. 5): na silu P_2 , okomitu na os

Sl. 5. Oblikovanje i otkidanje kapljice s vrha elektrode zbog djelovanja elektromagnetne sile



vodiča, koja uzrokuje lokalno sužavanje rastaljenog vrha elektrode i oblikovanje kapljice (tzv. magnetno štipanje), te na silu P_1 , koja djeluje u smjeru osi. Rastezanjem kapljice strujni se tok širi, sila P_1 počinje djelovati samo prema zavarivanom dijelu, pa otkida kapljice i upućuje ih u tom smjeru.

Regulacija duljine električnog luka. Da bi se ostvarila jednolična kvaliteta zavara (jednolične izmjere, oblik i mehanička svojstva), količina unesene topline po jedinici duljine zavara mora biti podjednaka. Stoga električni luk mora biti stalne duljine, a njegovo gibanje jednolično. Pri ručnom zavarivanju zavarivač promatra električni luk i nastoji njegovu duljinu održati stalnom, a ujedno pomiče elektrodu u smjeru zavarivanja. U poluautomatskim i automatskim postupcima jednolična se duljina luka održava automatskom regulacijom, dok se izvor topline pomiče ručno ili automatski.

Tehnološke značajke elektrodučnog zavarivanja. Djelotvornost, ekonomičnost i ostale karakteristike elektrodučnog zavarivanja potrebne za proračun vremena zavarivanja, cijene i količine utrošenog materijala mogu se prikazati pomoću različitih koeficijenata.

Koeficijent taljenja određen je masom istaljene elektrode u određenom vremenu pri određenoj jakosti struje:

$$K_t = \frac{G_t}{It}, \quad (4)$$

gdje je G_t masa istaljene elektrode, I jakost struje, t trajanje taljenja.

Koeficijent gubitka elektrodnog materijala zbog rasprskavanja, isparivanja i oksidacije izračunava se pomoću izraza

$$K_g = \frac{G_t - G_n}{G_t} 100\%, \quad (5)$$

gdje je G_n masa nataljenog elektrodnog materijala koji je prenesen na zavar.

Koeficijent iskorištenja elektrodnog metala određen je izrazom

$$K_i = \frac{G_e}{G_t} 100\%, \quad (6)$$

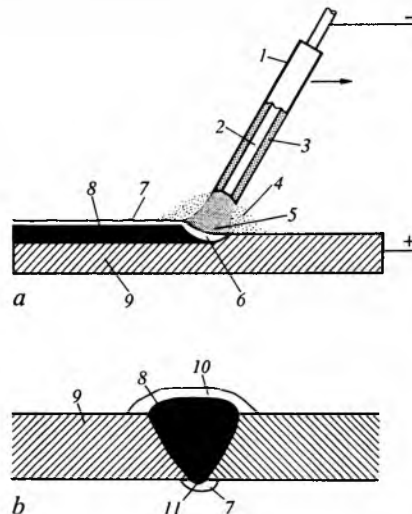
gdje je G_e masa elektrode jezgre. Koeficijent iskorištenja ovisi o količini željeznog praha u elektrodoj oblozi, tipu obloge i bazičnosti troske, a može biti $80 \dots 220\%$.

Ručno zavarivanje obloženom elektrodom. Za ručno elektrodučno zavarivanje najčešće se upotrebljavaju obložene elektrode. One se sastoje od metalne jezgre u obliku žice ili šipke na koju se prešanjem ili uranjanjem nanosi nemetalna obloga. Vrsta i kvaliteta jezgre ovise o namjeni elektrode, pa je npr. za zavarivanje nelegiranih i visokolegiranih čelika jezgra približno istog sastava kao i materijal koji se zavaruje. Obloga se pri zavarivanju pretvara u trosku koja prekriva lice i korijen zavara (sl. 6). Rjeđe se upotrebljavaju cjevaste elektrode s nemetalnom jezgrom ili posebne elektrode za navarivanje (nanošenje na osnovni materijal) slojeva otpornih na trošenje. Obloga ima električnu, fizikalnu i metaluršku funkciju.

Električna je funkcija obloge da uspostavi i stabilizira električni luk. U tu se svrhu u oblogu elektrode dodaju spojevi natrija i kalija, koji pri taljenju stvaraju plinove velike ionizacijske sposobnosti i na taj način poboljšavaju vodljivost između elektrode i zavarivanog dijela.

Fizikalna je funkcija obloge da omogući i olakša zavarivanje u prisilnom položaju te zaštititi kapljice i talinu. Obloga otpušta plinove koji štite talinu i kapljice u električnom luku od atmosferskih plinova. Za stvaranje zaštitnih plinova uglavnom se upotrebljavaju organske tvari i karbonati. Sastavom obloge regulira se viskoznost i napetost površine troske na temperaturama zavarivanja. Viskoznost troske raste s povećanjem bazičnosti obloge, a opada s povećanjem kiselosti. O napetosti površine rastaljene troske ovisi oblik svakog pojedinog sloja zavara. Na mjestu zavara troska pliva na rastaljenom metalu, štiti ga i osigurava njegovo polaganu hlađenje. Za stvaranje troske upotrebljavaju se rude i minerali kao hematit, rutil, kremen i sl.

Metalurška se funkcija obloge sastoji od legiranja, otplinjivanja i rafinacije. Legiranjem se nadoknađuju legirani elementi koji izgaraju tijekom zavarivanja. Osim toga, iz obloge se u talinu mogu dodavati legirani elementi koji poboljšavaju svojstva zavarjenog spoja. Postoje elektrodne obloge s velikim udjelom željeznog praha, koji prelazi u zavar i povećava produktivnost zavarivanja.

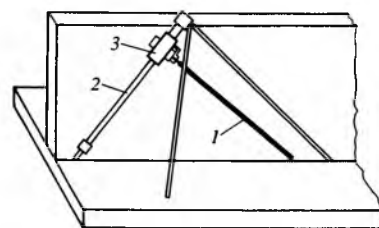


Sl. 6. Ručno zavarivanje obloženom elektrodom (a) i presjek zavara (b). 1 obložena elektroda, 2 jezgra, 3 obloga, 4 zaštitni plin, 5 luk, 6 talina, 7 sloj troske, 8 zavar, 9 zavarivani dio, 10 lice zavara, 11 korijen zavara

Otplinjivanjem se iz taline zavara uklanjaju kisik i vodik. Dezoksidansi u oblozi kao što su titan, aluminij, silicij, mangan i dr. tijekom zavarivanja vežu kisik, a nastali oksidi prelaze u trosku. Slično se iz taline zavara uklanja vodik pomoću kalcij-fluorida, koji se nalazi u oblogama bazičnih elektroda.

Rafinacija je uklanjanje sumpora i fosfora iz taline zavara. U tu se svrhu u oblogu dodaju oksidi kalcija i mangana, koji vežu sumpor i fosfor i prelaze u trosku.

Gravitacijsko zavarivanje. Za gravitacijsko se zavarivanje upotrebljavaju obložene elektrode promjera $5 \dots 8$ mm i duljine $700 \dots 900$ mm. Elektroda je jednim krajem preko obloge oslonjena na dio koji se zavaruje, dok je drugi kraj stegnut kliještima koja klize i spuštaju se po okviru gravitatora (sl. 7). Kada se elektroda potpuno rastali, automatski se prekida električni luk. Zavarivač treba samo uložiti novu elektrodu i uspostaviti električni luk.



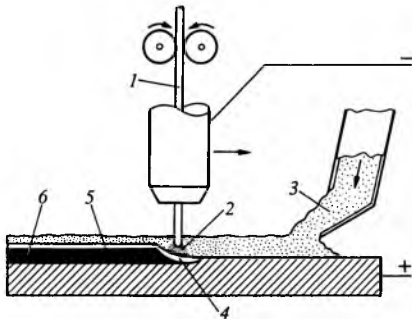
Sl. 7. Gravitacijsko zavarivanje. 1 elektroda, 2 okvir gravitatora, 3 kliješta

Kontaktno zavarivanje. Za kontaktno se zavarivanje upotrebljavaju slične elektrode kao i za gravitacijsko, ali s oblogama prilagođenim mnogo manjem nagibu elektrode. Uređaj se sastoji od magnetnih držača i polužnog opružnog mehanizma s kliještima, koji održava potreban nagib elektrode. Kada se elektroda rastali, zavarivač umeće novu elektrodu, premješta uređaj na novi položaj i ponovno uspostavlja električni luk.

Zavarivanje pod bakrenom letvom primjenjuje se za preklopne, sučeljne i kutne spojeve duljine do 2 m. Elektrode se polažu uzduž spoja i pokrivaju bakrenom letvom s utorom za elektrodu. Jedan se kraj elektrode spaja s izvorom struje, dok se između drugog kraja i zavarivanog dijela uspostavlja električni luk pokriven troskom.

Zavarivanje pod praškom. Elektrode za zavarivanje pod praškom taljive su i bez obloge, najčešće u obliku žice promjera $2 \dots 6$ mm, dok se za navarivanje upotrebljavaju trakaste ili

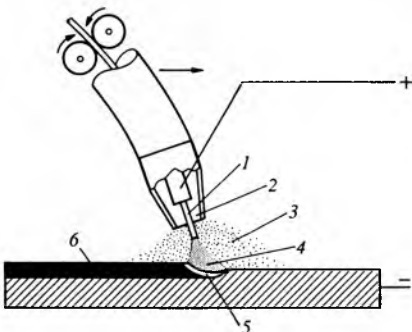
vrpčaste elektrode. Tijekom zavarivanja stalno se dovodi prašak iz lijevka iznad spojnog mjesta (sl. 8). Električni se luk pritom ne vidi jer je prekriven slojem praška i troske koja nastaje taljenjem dijela praška. Prašak štiti rastaljeni metal od djelovanja okolne atmosfere, sprečava naglo hlađenje zavora, oblikuje zavar i utječe na njegov kemijski sastav. Po kemijskom sastavu prašci su vrlo slični oblogama obloženih elektroda i imaju jednake funkcije.



Sl. 8. Zavarivanje pod praškom. 1 elektroda, 2 luk, 3 prašak, 4 talina, 5 troska, 6 zavar

Zavarivanje u zaštitnoj plinskoj atmosferi. Elektrolučno se zavarivanje može provoditi i u zaštitnoj plinskoj atmosferi, a zaštitni plin može biti inertan ili aktivan. Glavni su postupci zavarivanja u zaštitnoj atmosferi zavarivanje taljivom elektrodom i zavarivanje netaljivom volframnom elektrodom.

Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi poznato je pod nazivom MIG (prema engl. Metal Inert Gas) ili MAG (Metal Active Gas). Električni se luk uspostavlja između zavarivanog dijela i taljive kontinuirane elektrode u obliku žice, obično spojene s pozitivnim polom istosmjernog izvora struje (sl. 9). Elektroda je ujedno i dodatni materijal. Zavaruje se u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova (argona ili helija) ili aktivnih plinova (ugljičnog dioksida ili smjese ugljičnog dioksida i drugih plinova). Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja ručno) ili automatski (potpuno mehanizirano). Poseban je način zavarivanja u vertikalnom položaju između dviju bakrenih letava (tzv. *elektroplinsko zavarivanje*).

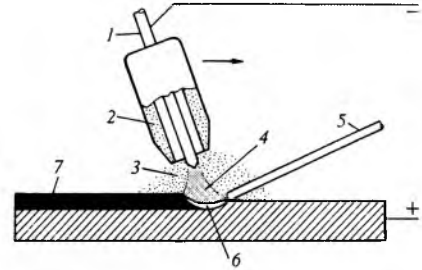


Sl. 9. Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. 1 elektroda, 2 dovod plina, 3 zaštitna atmosfera, 4 luk, 5 talina, 6 zavar

Kao taljive elektrode najčešće se upotrebljavaju pune žice promjera $0,6 \dots 2,4$ mm. Žice od čelika pobakrene su ili poniklene radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Osim punih žica upotrebljavaju se žice punjene praškom za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi i žice koje same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem praška.

Zavarivanje netaljivom volframnom elektrodom u inertoj atmosferi poznato je pod nazivom TIG (prema engl. Tungsten Inert Gas). Osnovni metal, a po potrebi i dodatni, tale se toplinom električnog luka koji se uspostavlja između elektrode i zavarivanog dijela. Elektroda se ne tali, već služi samo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektrode se danas uglavnom izrađuju od volframa legiranog s $1 \dots 2\%$ torijeva oksida, cirkonijeva oksida i sl., a rijetko od čistog volframa. Mjesto zavarivanja (rastaljeni osnovni metal, dodatni materijal, zagrijani vrh elektrode) inertnim se plinovima, najčešće argonom ili helijem, štiti od štet-

nog djelovanja okolne atmosfere (sl. 10). Osim toga, zaštitni se plin lako ionizira, što olakšava održavanje električnog luka.



Sl. 10. Zavarivanje volframnom elektrodom u inertoj atmosferi. 1 elektroda, 2 dovod plina, 3 zaštitna atmosfera, 4 luk, 5 dodatni materijal, 6 talina, 7 zavar

Uspostavljanje električnog luka kratkim spojem izbjegava se zbog oštećivanja vrha elektrode i smanjenja stabilnosti luka, te uključivanja volframa u osnovni materijal s nepovoljnim posljedicama po mehanička svojstva spoja. Električni se luk uspostavlja posebnim visokonaponskim visokofrekventnim generatorima. U novije se doba primjenjuju i uređaji koji mogu davati strujne impulse prema potrebi. Struja zavarivanja u rasponu je između najveće vrijednosti, kad se tali osnovni materijal, i najmanje vrijednosti, kada se samo održava stabilan električni luk. Takav je način rada prikladan za zavarivanje slabo zavarljivih materijala, zavarivanje u prisilnim položajima te zavarivanje tankih limova jer se pogodnim trajanjem i amplitudom impulsa može postići da se materijal tali uz nastanak samo male količine taline koja se neće cijediti.

Zavarivanje volframnom elektrodom u atmosferi atomiziranog vodika. Električni se luk ostvaruje između dviju volframnih elektroda. Kao zaštitni plin služi vodik, koji se u električnom luku raspada na atome. Međutim, na rubu električnog luka (na rubu zavora) vodikovi se atomi ponovno spajaju u molekule, čime se oslobađa određena količina topline. Tako vodik ima trojaku zadaću: on služi kao zaštitni plin, dodatni izvor topline i kao sredstvo za hlađenje elektrode. Ipak, zbog opasnosti pri rukovanju vodikom taj se postupak rijetko primjenjuje.

Zavarivanje ugljenom elektrodom. Električni se luk ostvaruje između dviju ugljenih elektroda ili između ugljene elektrode i zavarivanog dijela, a služi samo kao izvor topline za taljenje metala. Kako se mjesta zavarivanja ne zaštićuju, moguća je oksidacija taline, pa se postupak rijetko primjenjuje za zavarivanje, ali češće za žlijebljenje materijala.

Elektrotoporno zavarivanje metala

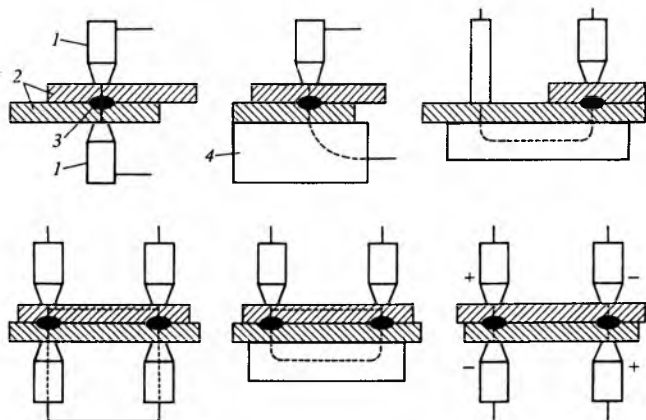
Pri elektrotopornom zavarivanju metal se zagrijava i tali toplinom koja nastaje zbog velikog električnog otpora na dodirnim mjestima dvaju predmeta uključenih u strujni krug (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 183). Za oblikovanje spoja potrebna je uz toplinsku i mehaničku energija.

Dodirni otpor ovisi o jakosti struje, prijanjanju, stanju površine, vrsti spoja i vrsti dodatnog materijala. Otpori osnovnog materijala mogu se zanemariti. Osim dodirnog otpora između zavarivanih dijelova nastaje i dodirni otpor između elektrode i zavarivanog dijela. Toplina koja nastaje na tom mjestu predstavlja gubitak i odvodi se rashladnom vodom koja struji kroz elektrodu.

Za elektrotoporno zavarivanje potrebna je struja jakosti $100 \dots 300\,000$ A. Zbog razmjerno malena električnog otpora metala zavaruje se strujom niskog napona ($0,5 \dots 25$ V). Trajanje je prolaska struje vrlo kratko i iznosi od $0,05$ do nekoliko desetaka sekundi, već prema vrsti postupka i materijalu. Za zavarivanje se uglavnom upotrebljava izmjenična struja. Prema obliku ostvarenog spoja zavarivanje može biti točkasto, bradavičasto, šavno, iskrenjem, tlačno, visokofrekventno i dr.

Točkasto zavarivanje primjenjuje se najviše za zavarivanje tanjih dijelova, obično limova, koji se pritisnu elektrodama od bakrene slitine kroz koje protječe struja. Na dodirnim se mjestima zavarivanih dijelova između elektroda razvija toplina zbog dodirnog otpora, a dodirne se površine spajaju djelovanjem tlačne sile. Zavar je lećasta oblika. Prema broju točaka koje se istodobno

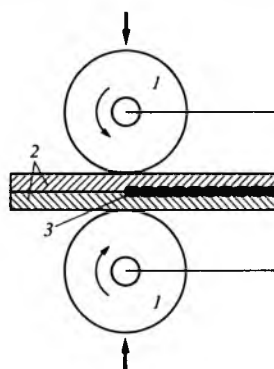
zavaruju razlikuje se jedotočkasto i višetčkasto zavarivanje (sl. 11). Najproširenije je jedotočkasto dvostrano zavarivanje s elektrodama na obje strane spoja, ali se primjenjuje i jednostrano zavarivanje. Točkasto je zavarivanje vrlo prikladno za robotizaciju, pa su prvi industrijski roboti služili upravo za točkasto zavarivanje u automobilskoj industriji.



Sl. 11. Različite vrste točkastog zavarivanja. 1 elektrode, 2 zavarivani dijelovi, 3 zavar, 4 bakreni podložak

Bradavičasto zavarivanje. Tlačna se sila i toplina pri bradavičastom zavarivanju lokalizira na izbočinama (bradavicama) koje se mjestimice naprave na jednome od zavarivanih dijelova. Istodobno se zavaruju na više mjesta. Zbog velikog otpora na dodirnim će se mjestima razviti toplina dovoljna da se metal rastali. Izbočine će nestati, a oblikovat će se spojevi slični onima kod točkastog zavarivanja. Prednost je bradavičastog zavarivanja prema točkastom u tome što se elektrode manje troše.

Šavno zavarivanje osniva se na istom principu kao i točkasto, samo što se zavarena mjesta nalaze neposredno jedno za drugim (sl. 12). To se postiže okretanjem elektroda u obliku diskova i čestim uzastopnim propuštanjem struje. Taj se postupak primjenjuje kada se zahtijeva nepropustan spoj. Zavarivanje sučeljnih spojeva uz primjenu dodatnog materijala u obliku trake ili žice posebna je vrsta šavnog zavarivanja.

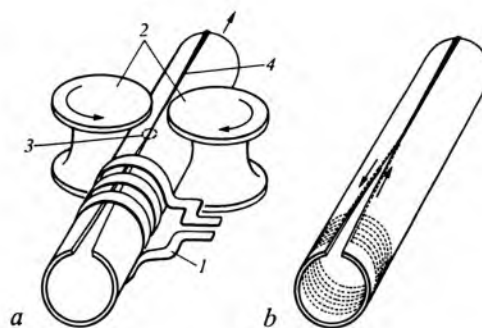


Sl. 12. Šavno zavarivanje. 1 elektrode, 2 zavarivani dijelovi, 3 zavar

Zavarivanje iskrenjem temelji se na zagrijavanju metala prilikom kratkog spoja. Zavarivani se dijelovi stegnu elektrodama u obliku čeljusti, a zatim se primicanjem i odmicanjem nekoliko puta dovode u dodir pa se zbog kratkog spoja i iskrenja njihovi sučeljni krajevi predgrijavaju. Nakon toga se primiču jedan prema drugom uz veliku struju zavarivanja, pa na izbočenim mjestima nastaje snažno zagrijavanje, eksplozivno taljenje (iskrenje) i isparivanje metala, a spoj se ostvaruje pomoću tlačne sile.

Tlačno elektrootporno zavarivanje temelji se na elektrootpornom zagrijavanju metala do plastičnog stanja i spajanju velikom tlačnom silom. Zavarivani se dijelovi, stegnuti u čeljusne elektrode, dovode u dodir po čitavu presjeku, uz istodobno propuštanjem struje kroz elektrode. Zavareni su spojevi slične kvalitete kao i spojevi zavareni iskrenjem, ali su potrebne puno jače struje.

Visokofrekventno zavarivanje, u koje se ubraja i induksijsko zavarivanje, također je elektrootporno zavarivanje primjenom vi-



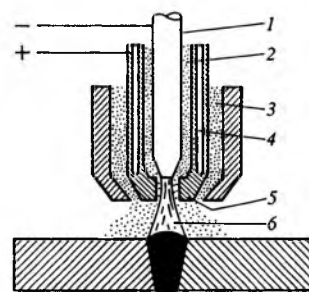
Sl. 13. Visokofrekventno šavno zavarivanje cijevi (a) i strujni tok (b). 1 induksijska zavojnica, 2 tlačni valjci, 3 mjesto zavarivanja, 4 zavar

sokofrekventne struje za zagrijavanje metala i koncentriranje topline na željeno mjesto. Visokofrekventna struja dovodi se na zavarivani dio, podalje od mjesta zavara, preko kliznih elektroda ili induksijske zavojnice. Zbog visoke frekvencije ($10 \cdots 500$ kHz) struja teče samo rubovima materijala do dubine od nekoliko desetina milimetara, i samo se u tom području materijal grije. Na mjestu zavarivanja materijal se ugrije do plastičnog stanja i spaja pomoću tlačnih valjaka. Visokofrekventno je zavarivanje osobito pogodno za zavarivanje cijevi (sl. 13), profila i ostalih proizvoda izrađenih od čelične trake. Postupak je potpuno automatiziran, a brzine su zavarivanja vrlo velike, do 150 m/min za tankostijene cijevi.

Ostali postupci zavarivanja metala

Zavarivanje plazmom. Za zavarivačke potrebe plazma se dobiva tlačenjem plina kroz električni luk, a zatim se plazmeni plin vraća u stabilno stanje predajući zavarivanom dijelu toplinsku energiju preuzetu iz električnog luka (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 195).

Za zavarivanje plazmom upotrebljava se netaljiva volframna elektroda, a električni se luk može uspostaviti između elektrode i zavarivanog dijela (prijelazni luk) ili između elektrode i sapnice (neprijelazni luk). Prvi je način sličan običnom zavarivanju netaljivom elektrodom, ali je njegova odlika što je luk mnogo uži, bolji je prijenos topline, veće je prodiranje i veća brzina zavarivanja. Drugim načinom rada, pri kojem se luk uspostavlja između elektrode i sapnice (sl. 14), toplina se na zavarivani dio prenosi samo plazmom, a velika mu je prednost što zavarivani dio nije uključen u strujni krug i ne mora biti električni vodič. Kao plazmeni plin upotrebljava se argon u količini od $0,5 \cdots 2,5$ L/min, a za zaštitu plazmenog mlaza i mjesta zavarivanja od okolne atmosfere najčešće služe inertni plinovi argon, helij ili njihova smjesa.

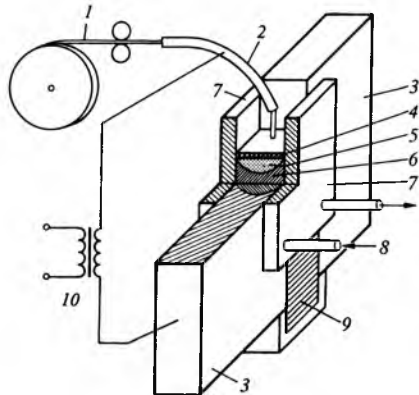


Sl. 14. Zavarivanje plazmom uz neprijelazan električni luk. 1 volframna elektroda, 2 plazmeni plin, 3 zaštitni plin, 4 kanal za hlađenje elektrode, 5 sapnica, 6 plazma

Zavarivanje plazmom primjenjuje se za spajanje vrlo tankih limova te višeslojnih i kutnih spojeva. Osim toga, primjenjuje se i za zavarivanje *protaljivanjem* kada plazmeni snop protaljuje čitav osnovni materijal praveći u njemu otvor, a zavareni spoj nastaje tako što rastaljeni materijal zbog površinske napetosti zatvara taj otvor. Protaljivanjem se obično spajaju limovi debljine $1,5 \cdots 12$ mm, a može se raditi ručno ili mehanizirano, u svim položajima.

Zavarivanje pod troskom temelji se na taljenju osnovnog i dodatnog materijala toplinom koja nastaje zbog električnog otpora pri prolasku struje kroz rastaljenu trosku. Temperatura je rastaljene troske ~ 2500 °C. Dodatni je materijal najčešće kon-

tinuirana žica koja se mehanizirano dodaje u talinu. Zavareni se spoj oblikuje od rastaljenih rubova osnovnog materijala i elektrode žice. Rastaljeni metal zbog veće gustoće tone pod rastaljenom trosku gdje se hladi. Za oblikovanje zavara i sprečavanje istjecanja rastaljene troske i metalne taline služe klizači hlađeni vodom (sl. 15). Zavarivanje napreduje pomicanjem glave za zavarivanje odozdo prema gore.

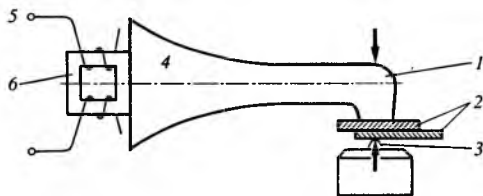


Sl. 15. Zavarivanje pod troskom. 1 elektroda, 2 vodilica, 3 zavarivani dijelovi, 4 rastaljena troska, 5 rastaljeni metal, 6 zavar, 7 bakreni klizači, 8 rashladna voda, 9 zavareni spoj, 10 transformator

Zavarivanje pod troskom primjenjuje se za zavarivanje limova debljih od 10 mm. Osim osnovnoga, primjenjuje se više drugih postupaka, a najčešće onaj s taljivim vodilicama za elektrodu. Tada se uzduž cijelog spoja postavljaju bakrene papuče, pa nije potreban mehanizam za njihovo pokretanje, nego samo uređaj za dodavanje elektrode žice. Vodilica se tali, ulazi u sastav spoja i nadoknađuje gubitak troske.

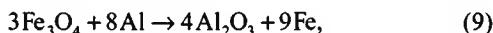
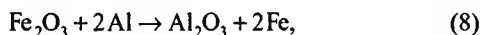
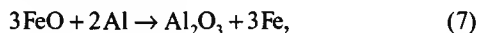
Zavarivanje magnetno upravljanim lukom. Zavarivani se dijelovi (sučeljene cijevi i slični predmeti s izbočenim dijelovima) stežu i centriraju u steznoj napravi, a zatim se povezivanjem s izvorom struje i dodirrom uspostavlja električni luk. Pomoću magnetnog polja luk se prisili na rotacijsko gibanje po rubovima sučeljenih površina, pa se one zagrijavaju i tale. Konačno se dijelovi pritisnu jedan uz drugi i zavare.

Ultrazvučno zavarivanje. Za ostvarivanje spoja primjenjuje se energija ultrazvuka (v. *Ultrazvuk*). Zavarivani se dijelovi postavljaju između tzv. *sonotrode*, koja vibrira ultrazvučnom frekvencijom, i nepomičnog nakovnja (sl. 16). Sonotroda razmjerno malenom silom tlači zavarivane dijelove. Ultrazvučne su vibracije paralelne s dodirnom plohom sonotrode i s nje se prenose na gornji zavarivani dio. Zbog njegova relativnog gibanja s obzirom na donji dio dodirne se plohe trenjem zagrijavaju, a istodobno se s njih, zbog smičnog naprezanja, otkidaju vrhovi neravnina (oksidi i druge nečistoće). Pri dovoljno velikom tlaku i amplitudi vibracija materijal se na dodirnim ploham tali, pa se zbog djelovanja međuatomnih sila oblikuje zavareni spoj.

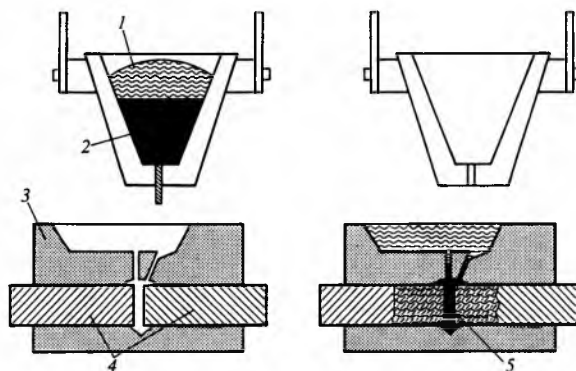


Sl. 16. Ultrazvučno točkasto zavarivanje. 1 sonotroda, 2 zavarivani dijelovi, 3 nakovanj, 4 prijenosnik vibracija, 5 visokofrekventna struja, 6 vibrator

Aluminotermijsko zavarivanje je spajanje metala pomoću pregrijane taline (~2500 °C) koja nastaje egzotermnom reakcijom željeznog oksida i aluminija. Smjese sitnih čestica aluminija i oksida (*termit*) mogu se dodati i legirni elementi. Aluminij oduzima kisik željeznom oksidu, pri čemu nastaje željezo koje služi kao dodatni materijal:



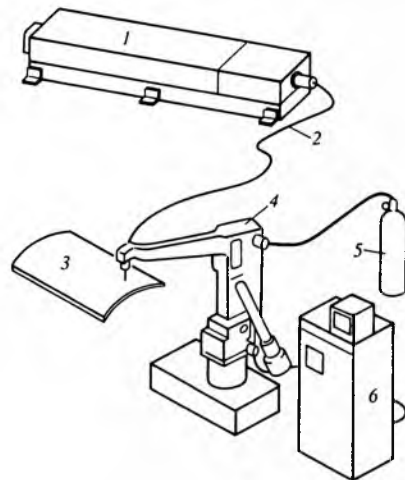
a razvija se i toplina od 783 kJ/mol u prvoj, 758 kJ/mol u drugoj, a 3012 kJ/mol u trećoj reakciji. Za reakciju je potrebno 20...30 sekundi, već prema količini materijala. Pregrijana talina nalazi se u loncu iznad spoja (sl. 17) i ispušta se u kalup načinjen oko dijelova koje treba spojiti. Ti se dijelovi prije zavarivanja predgriju do crvenog žara. Budući da je temperatura taline gotovo dva puta veća od tališta zavarivanog metala, tale se i njegovi rubovi, a spoj se oblikuje hlađenjem.



Sl. 17. Aluminotermijsko zavarivanje. 1 troska, 2 pregrijana talina, 3 kalup, 4 zavarivani dijelovi, 5 zavareni spoj

Zavarivanje elektronskim snopom je spajanje metala pomoću topline proizvedene pretvorbom kinetičke energije ubrzanih elektrona prilikom udara o metal koji se zavaruje (v. *Elektrotermija*, TE 5, str. 196). Katkad se upotrebljava dodatni materijal, ali talina za oblikovanje spoja pretežno nastaje taljenjem osnovnog metala. Zavaruje se u vakuumu, a izvor elektrona je užarena volframna nit. Elektroni se od volframne katode do anode ubrzavaju jakim električnim poljem zbog velike razlike potencijala između elektroda (nekoliko desetaka do više stotina kilovolti). Toplina koja se razvija na površini metala razmjerna je broju elektrona koji udare o površinu u određenom vremenu i njihovoj kinetičkoj energiji. Da bi se povećala koncentracija topline, elektronski se snop fokusira elektromagnetnim lećama i magnetnim poljem.

Lasersko zavarivanje je spajanje metala pomoću topline koja nastaje djelovanjem snopa laserskog zračenja na zavarivani dio. Od mnogih tipova lasera (v. *Laser*, TE 7, str. 486) nekoliko ih je pogodno za obradbu materijala, najčešće za zavarivanje i rezanje. Laserom se mogu zavariti dijelovi debljine od nekoliko mikrometara pa sve do 40 mm, i to s dodatnim materijalom ili bez njega. Najviše se upotrebljavaju plinski laser s ugljičnim dioksidom i čvrsti laser (Nd-YAG), kojima je gustoća energije za zavarivanje $10^5 \dots 10^6 \text{ W/cm}^2$, a za rezanje $10^6 \dots 10^8 \text{ W/cm}^2$, što je pri fokusiranju dovoljno, ako je potrebno, i za isparivanje materijala (temperatura od nekoliko tisuća kelvina). Za zavarivanje i rezanje upotrebljavaju se laseri snage od nekoliko stotina vata do desetak kilovata.



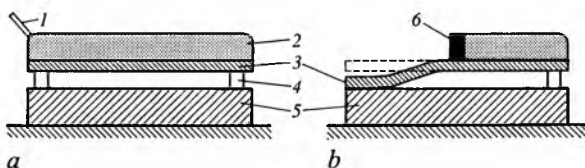
Sl. 18. Fleksibilni laserski sustav za obradbu materijala. 1 laserski uređaj, 2 optičko vlakno, 3 zavarivani dio, 4 robot, 5 pomoćni plin, 6 upravljački uređaj

Laserom se mogu zavarivati i rezati sve vrste čelika, neželjni metali i njihove slitine, te nemetali, posebno polimerni materijali. Čvrsti laseri Nd-YAG prikladniji su jer se laserska zraka može voditi savitljivim optičkim vlaknima i priključiti na robot (sl. 18).

Zbog velikog temperaturnog gradijenta između rastaljenog metala i metala uz talinu, zagrijavanje i hlađenje metala mnogo je brže nego pri elektrodočnim postupcima. To je povoljno zbog uske zone utjecaja topline, ali može uzrokovati zakaljivanje i pojavu pukotina.

Među postupke zavarivanja elektromagnetnim zračenjem ubrajaju se i *refleksijsko zavarivanje* te *zavarivanje infracrvenim zračenjem*. Zbog male energije oba su postupka ograničena na specijalni rad s tankim materijalom i prikladniji su za lemljenje.

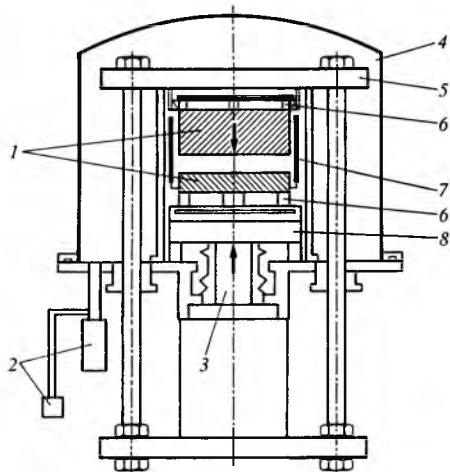
Zavarivanje eksplozijom tlačno je zavarivanje metala u hladnom stanju. Visoki se tlak između dijelova koje treba zavariti ostvaruje detonacijskim izgaranjem eksploziva. Izgaranje se širi velikom brzinom i potiskuje gornji dio, obično namješten pod kutom od $1 \cdots 15^\circ$, prema donjem, nepomičnom dijelu (sl. 19). Zbog djelovanja okomitih i tangencijalnih sila istiskuje se površinski sloj oksida na dodirnim ploham, koji bi onemogućio zavarivanje. Zavarivanje eksplozijom najčešće se primjenjuje za platanje, ali i za zavarivanje čelika, aluminijskog, bakra, nikla, titana, volframa, molibdena i njihovih slitina, i to u prvom redu onda kada se spajanje ne može ostvariti drugim zavarivačkim postupcima ili bi to bilo preskupo.



Sl. 19. Zavarivanje eksplozijom. *a* stanje prije eksplozije, *b* napredovanje detonacijskog područja; 1 detonator, 2 eksploziv, 3 metal koji se navaruje, 4 umetak za početni položaj, 5 osnovni metal, 6 detonacijsko područje

Kao izvor energije služe različiti deflagrantni (izgarajući) ili detonantni uobičajeni eksplozivi koji se upotrebljavaju u privredne ili vojne svrhe (v. *Eksplozivi*, TE 3, str. 528). Njihove količine ovise o vrsti materijala, obliku spoja i izmjerama izratka. Postupak se može primijeniti za zavarivanje vrlo malih dijelova, ali i za dijelove kojima masa iznosi i do 25 t. Zbog eksplozije postupak nije prikladan za primjenu u radioničkim halama, pa se provodi daleko od naselja, najčešće na vojnim poligonima.

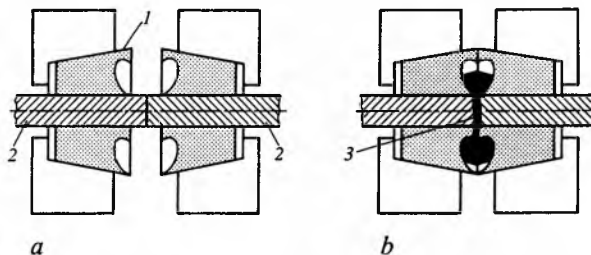
Difuzijsko zavarivanje. Spajanje zavarivanih dijelova nastaje kad se u vakuumskoj komori razmak dodirnih ploha tlačnjem smanji na veličinu kristalne rešetke metala (sl. 20). Radna je temperatura tek nešto viša od temperature rekristalizacije pa zavarivanje nastaje bez taljenja metala i nema promjene fizikalnih i kemijskih svojstava metala koji se zavaruju.



Sl. 20. Difuzijsko zavarivanje. 1 zavarivani dijelovi, 2 vakuumska crpka, 3 tlačni cilindar, 4 vakuumska komora, 5 gornja tlačna ploča, 6 izolacija, 7 indukcijska zavojnica za zagrijavanje, 8 donja tlačna ploča

Hladno zavarivanje temelji se na adheziji i djelomičnoj difuziji metala koji su bez zagrijavanja podvrgnuti velikoj tlačnoj

sili pa na spojnom mjestu nastaje plastična deformacija (sl. 21). Za taj postupak spajanja prikladni su metali s izraženom mogućnošću plastične deformacije na sobnoj temperaturi, kao što su aluminij, bakar, nikal, titan, nehrđajući čelik i dr. Hladnim se zavarivanjem mogu spajati i raznorodni metali.

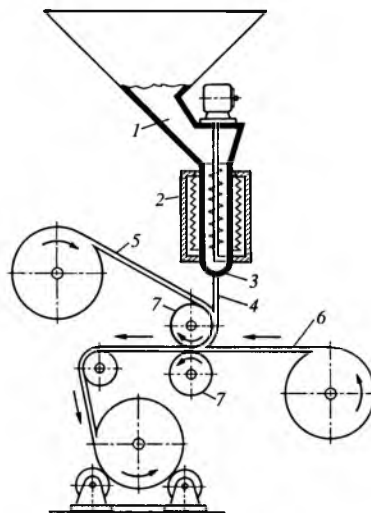


Sl. 21. Hladno zavarivanje. *a* početni položaj, *b* krajnji položaj; 1 stezaljka, 2 zavarivani dijelovi, 3 zavareni spoj

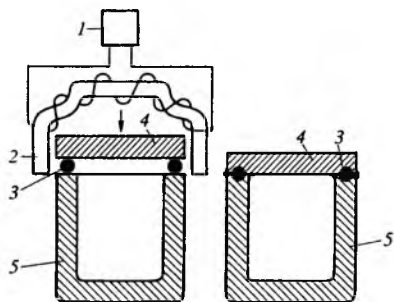
Zavarivanje trenjem temelji se na zagrijavanju metala toplinom koja nastaje zbog trenja na dodirnim ploham pri njihovom relativnom gibanju. Zavarivani dio, učvršćen u nosač koji se okreće, tlači se na drugi, mirujući dio. Kada se zbog trenja oba dijela zagriju do plastičnog stanja, rotirajući se dio zaustavlja kočnicom, a zatim se povećanom aksijalnom silom ostvaruje zavareni spoj.

Zavarivanje polimernih materijala

Od polimernih se materijala mogu uspješno zavarivati samo plastomeri, koji se, poput metala, prilikom zagrijavanja omekšavaju i tale, a pri hlađenju se skrućuju, što se može po volji ponavljati (v. *Polimerni materijali*, TE 10, str. 583). Zavarivanje se ostvaruje međusobnim pritiskom zavarivanih dijelova kojima su dodirna mjesta zagrijavanjem omekšana do plastičnog stanja. Za razliku od metala, polimerni materijali ne provode električnu struju. Međutim, njihova su tališta mnogo niža, pa su za zagrijavanje dovoljne mnogo niže temperature. To su razlozi zbog kojih se postupci za njihovo zavarivanje ponešto razlikuju od onih za metale. Većina se tih postupaka temelji na jednostavnom zagrijavanju spojnih mjesta vrućim plinom, vrućom žicom ili nekim većim grijaćim elementom, plamenom (zavarivanje pretaljanjem) ili infracrvenim zračenjem. Katkad je za zagrijavanje dovoljno i trenje među zavarivanim dijelovima (zavarivanje trenjem), a zavarivati se može i polaganjem sloja rastaljenog polimernog materijala između zavarivanih dijelova (ekstruzijsko zavarivanje, sl. 22). Zavarivanje se može ostvariti i pritiskom ravnih ili valjkastih grijača zagrijanih visokofrekventnom strujom. Primjenjuje se, kao i za metale, i ultrazvučno zavarivanje, a



Sl. 22. Ekstruzijsko zavarivanje polimernih materijala. 1 dodatni polimerni materijal, 2 zagrijani ekstruder, 3 sapnica, 4 ekstrudat, 5 i 6 zavarivani dijelovi, 7 tlačni valjci



Sl. 23. Indukcijsko zavarivanje polimernih materijala. 1 visokofrekventni generator, 2 induktor, 3 feromagnetična žica, 4 i 5 zavarivani dijelovi

zanimljivo je i indukcijsko zavarivanje pomoću umetnute feromagnetične žice, koja nakon spajanja ostaje u materijalu (sl. 23).

LEMLJENJE

Lemljenje je spajanje dijelova, najčešće metalnih, pomoću rastaljenoga dodatnog materijala koji se naziva *lem* i kojemu je talište barem 50°C niže od tališta lemljenog materijala. U posebnim se slučajevima lemljenjem može spajati i keramika.

Lemni se spoj ostvaruje kvašenjem površine lemljenog metala rastaljenim lemom, difuzijom lema u površinske slojeve spajanih dijelova te kristalizacijom lema i mehaničkim sidrenjem. Da bi rastaljeni lem kvasio čvrsti lemljeni metal, potrebna je toplina za taljenje lema, a kvašenje je to bolje što je temperatura viša. Drugi je uvjet kvašenja da površinske veze metala budu slobodne, tj. da na površini ne bude oksida, prevlaka, nečistoća i sl. Zbog toga se spojne površine čiste mehanički i kemijski prije lemljenja te kemijski za vrijeme lemljenja pomoću talila, koje otapa površinske nečistoće lemljenog metala i omogućuje dobro kvašenje i rasprostiranje lema po njegovoj površini. Ako se lemi na zraku, talilo reducira oksidni sloj i štiti površinu od dalje oksidacije. Kapilarno djelovanje lema ovisi o čistoći površine i širini razmaka među lemljenim dijelovima.

Za meko se lemljenje kao talila upotrebljavaju anorganski i organski halogenidi (npr. cinkov klorid), a za lemljenje aluminijske posebno su prikladna talila amino-spojevi s dodatkom fluorida i klorida. Kao talila za tvrdo lemljenje uglavnom se upotrebljavaju različiti fluoridi, kloridi i spojevi bora, a za aluminij litijev klorid i litijev fluorid.

Česta je podjela lemljenja prema radnoj temperaturi na *meko lemljenje* i *tvrdo lemljenje*. Za meko se lemljenje upotrebljavaju lemovi s talištem nižim od 450°C, a za tvrdo lemljenje lemovi s višim talištem (tabl. 3). Bitna razlika nije u mehanizmu nastajanja spoja, nego u mehaničkim svojstvima spoja, jer se tvrdim lemljenjem postiže veća čvrstoća i tvrdoća. Različiti postupci lemljenja mogu služiti i za meko i za tvrdo lemljenje. U tablici 2 navedena je prikladnost tvrdog lemljenja za spajanje pojedinih metala i slitina.

Kapilarno lemljenje (lemljenje u rasporu) jest spajanje pri kojem je razmak među površinama koje se spajaju jednoličan i manji od 0,5 mm. Osim kapilarnog lemljenja postoji i *lemljenje u žlijebu* (zavarivačko lemljenje) koje zahtijeva pripremu dijelova za lemljenje sličnu pripremi za zavarivanje.

Više je razloga naglom razvoju lemljenja posljednjih desetljeća: lemljenje se može vrlo lako mehanizirati i automatizirati, te je stoga pogodno za serijsku i masovnu proizvodnju, ne tali se lemljeni metal pa nema većih strukturnih promjena, vrlo se lako spajaju raznorodni metali, postupak je brz, deformacije zalemljenog dijela su malene i nije potrebna naknadna mehanička obradba lemnog spoja. Osim metala danas se lemljenjem uspješno spaja i keramika.

Lemljenje ručnim lemilom primjenjuje se samo za meko lemljenje. Lem se tali u dodiru s vrućim lemnim šiljkom, koji se može zagrijavati električnom strujom ili plinskim plamenom. Lemovi su najčešće u obliku šipke, često s talilom u posebnim kanalima. Lemljenje lemilom primjenjuje se za lemljenje pojedinačnih spojeva u elektrotehnici i limarskim radionicama.

Plinsko lemljenje temelji se na zagrijavanju i taljenju lema plamenom gorivih plinova. Ako se kao gorivi plin upotrijebi acetylen, oprema za lemljenje slična je onoj za plinsko zavarivanje. Osim acetilena, kao gorivi plinovi primjenjuju se propan, butan, prirodni plin i sl. Plinsko se lemljenje može automatizirati tako da se između dijelova koji se spajaju unaprijed stavi talilo i lem, a zatim se tako pripremljeni sklop vodi pomoću pokretne trake pored plamenika koji ga zagrijavaju do temperature lemljenja. Zbog kapilarnog tlaka lem ispunjava raspor između dijelova koji se spajaju. Taj se postupak primjenjuje i za istodobno lemljenje više spojeva.

Lemljenje u peći sa zaštitnom atmosferom. Pri lemljenju u peći osigurava se ravnomjerno zagrijavanje metala, što omo-

Tablica 3
VRSTE I KEMIJSKI SASTAV LEMOVA*

Meki lemovi				Tvrdi lemovi				
početak taljenja <183°C	početak taljenja 183°C	početak taljenja >183°C	za aluminij (250...385°C)	za opću upotrebu (610...1100°C)	visokotemperaturni (930...1200°C)	za lemljenje u vakuumu (600...1770°C)	za posebnu namjenu (>650°C)	za aluminij (560...580°C)
Sn-Pb-Cd	Sn-Pb	Sn-Ag	Sn-Zn-Cd	Cu	Ni-Cr-Si-Fe	Ag-Cu-Sn	Ag-Cu-Cd-Zn	Al-Si
Sn-In	Sn-Pb-Sb	Sn-Sb	Sn-Zn	Cu-Sn	Ni-Cr-Si	Ag-Cu-In	Ag-Cu	Al-Si-Cu
In	Sn-Pb-Cu	Cd-Zn	Zn-Cd	Cu-Zn	Ni-Cr-Si-B-Fe	Ag-In	Ag-Cu-Mn-Ni-Zn	Al-Si-Sn
Bi-Sn-Cd	Sn-Pb-Ag	Pb-Ag	Cd-Zn	Cu-Ni-Zn	Ni-Cr-Si-B	Au-In	Ag-Cu-Sn	
Bi-Pb-Sn		Zn-Sn	Pb-Sn-Zn	Cu-P	Mn-Ni-Co	Ag-Cu	Ag-Cu-Zn-Sn	
Sn-In-Cd		Cd-Zn-Ag	Zn-Al	Ag-Cu-P	Mn-Ni	Ag-Cu-Pd	Ag-Zn-Cd	
Bi-In-Pb-Sn		Zn	Zn	Ag-Cu-Zn	Mn-Ni-Cr	Au-Ag-Pd	Ag-Cu-Cd-Zn-Ni	
Bi-Pb-In-Sn-Cd			Sn-Cd-Zn-Al	Ag-Cd-Cu-Zn	Ag-Mn	Au-Cu	Cu-Ni-Mn	
			Sn-Pb-Zn		Ag-Cu	Au-Ni	Cu-Ni-Si	
					Pd-Ag-Cu	Ag-Pd-Cu	Cu-Mn-Co-Ni	
					Pd-Ni	Ag	Cu-Mn	
					Pd-Ag-Mn	Pd-Au	Cu-Mn-Co	
						Cu-Au	Cu-Sn-Ag	
						Ag-Pd	Pd-Ni-Cr	
						Au	Cu-Ti-Be	
						Cu	Ti-Zn-Be	
						Pd-Cu-Ag	Ni-Au-Mo	
						Pd-Ni	Ni-Cr-Si	
						Au-Pd	Ni-Mo	
						Au-Pt-Pd	Cr-V	
						Pd		
						Pt-Pd-Au		
						Pt		

*redosljed komponenata pojedinog lema: od komponenata s najvećim udjelom prema onima sa sve manjim udjelom u lemu

gućuje lemljenje bez deformacija i lemljenje složenih predmeta s mnogo spojeva. Zaštitnu atmosferu u peći čine inertni ili aktivni plinovi, a upotrebljavaju se i vakuumske peći. Za masovnu se proizvodnju primjenjuju peći kroz koje predmeti s već umetnutim lemom prolaze na pokretnoj traci.

Indukcijsko lemljenje. Pri indukcijskom se lemljenju dijelovi s umetnutim lemom stavljaju u visokofrekventno magnetno polje koje stvara zavojnica prilagođena obliku dijelova i hlađena vodom. Spojno se mjesto i lem tada zagrijevaju zbog pojave elektromagnetne indukcije i inducirano napona uzrokovana vrtložnim strujama. Sami dijelovi nisu elementi strujnog kruga.

Elektrotoporno lemljenje. Za razliku od indukcijskog lemljenja, dijelovi za lemljenje i lem pri elektrotopornom su lemljenju dijelovi strujnog kruga. Elektrode su bakrene ili grafitne, a izvori energije isti kao za elektrotoporno zavarivanje. Najčešće se primjenjuje izmjenična struja velike jakosti i niskog napona. Elektrotoporno je lemljenje prikladno kada se lem može unaprijed postaviti na spojno mjesto, a primjenjuje se uglavnom za proizvodnju u malim serijama. Talilo se rijetko upotrebljava zbog njegova izolacijskog djelovanja.

Lemljenje uranjanjem uglavnom se primjenjuje za meko lemljenje u serijskoj i masovnoj proizvodnji kada se istodobno spaja više komada male mase (manje od 1kg). Najčešće se primjenjuje u elektrotehnici (dijelovi hladnjaka, kolektori elektromotora) i elektronici (tiskani krugovi). Tvrdi lemljenje uranjanjem rijetko se primjenjuje, i to samo za manje dijelove (dijelovi instalacija, cijevni priključci), zbog teškoća u održavanju ujednačenoga kemijskog sastava taline.

Za lemljenje uranjanjem potreban je visok stupanj mehanizacije transporta lemljenih dijelova. Dijelovi koje treba lemiti, nepomično postavljeni jedni uz druge u sklopove na potrebnoj udaljenosti i definiranom međusobnom položaju, uranjaju se u kupelj s rastaljenim lemom. Lem tada ulazi u slobodne prostore između dijelova, a zadržava se na tim mjestima i nakon vađenja sklopova iz kupelji i hlađenja. Posebna je vrsta lemljenje pri kojem se dijelovi s unaprijed umetnutim lemom uranjaju u rastaljenju solnu kupelj koja služi kao talilo i izvor topline.

Lemljenje elektromagnetnim zračenjem temelji se na zagrijavanju spojnog mjesta fokusiranjem infracrvenog zračenja. Zbog razmjerno male toplinske energije prikladno je za lemljenje vrlo malih dijelova u serijskoj proizvodnji. Najčešće se primjenjuje za spajanje žica te žica i limova u elektronici, elektrotehnici i preciznoj mehanici te za lemljenje materijala osjetljivih na jače zagrijavanje.

Egzotermno lemljenje temelji se na zagrijavanju toplinom dobivenom egzotermnom kemijskom reakcijom. Za lemljenje nisu potrebni posebni uređaji i aparati, već samo smjesa prikladnih reaktanata, npr. smjesa magnezijeva praha i manganova dioksida. Njome se obloži spojno mjesto s umetnutim lemom, a potom se inicira kemijska reakcija posebnim upaljačem, šibicom, električnim putem ili neposredno plinskim plamenikom. Egzotermno se lemljenje primjenjuje za pojedinačnu proizvodnju, za manje dijelove s teško pristupačnim lemnim mjestima.

Elektrolučno lemljenje. Za zagrijavanje lemnog mjesta služi električni luk koji se uspostavlja između dviju pobakrenih grafitnih elektroda. Tehnika je rada ista kao i pri plinskom ručnom lemljenju.

Ostali postupci. Poznato je i *ultrazvučno lemljenje*, uz upotrebu posebnog izvora topline ili bez nje, zatim *lemljenje trenjem* s lemom umetnutim u utore na spojnim mjestima, *vakuumsko lemljenje* s lemom od čistih metala (bakar, srebro), koje je posebno prikladno za spajanje metala s keramikom i dr.

NAŠTRCAVANJE

Naštrcavanjem (metalizacijom ili nabrizgavanjem) naziva se nanošenje rastaljenoga materijala na neku površinu štrcanjem. Taj materijal može biti metal, tvrdi metal, keramika, plastika ili neki oksid. Spoj naštrcanog sloja i površine ostvaruje se mehaničkim sidrenjem, adhezijskim vezama te katkad difuzijom i mjestimičnim zavarivanjem.

Naštrcavanje se primjenjuje za postizanje posebnih svojstava površine (antikorozivnost, vatrootpornost, otpornost prema trošenju, klizna svojstva, električna vodljivost, izolacijska svoj-

stva, izgled površine) te za obnavljanje istrošenih dijelova, osobito osovina, ležajnih površina i sl.

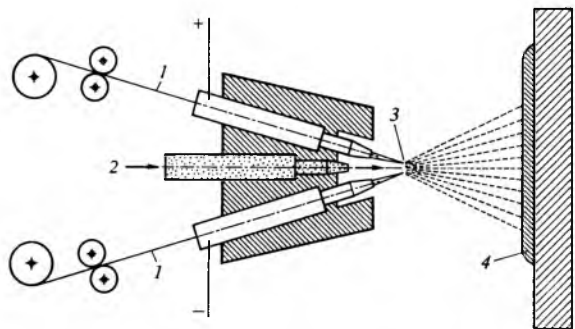
Prema izvoru energije razlikuju se plinsko naštrcavanje, elektrotoporno naštrcavanje, naštrcavanje plazmom i dr. (tabl. 4).

Tablica 4
VRSTE NAŠTRCAVANJA

Postupak	Materijal za naštrcavanje	Oblik materijala za naštrcavanje
Plinsko naštrcavanje stlačenim zrakom	plastika, cink, aluminij	prašak, pasta, suspenzija
Plinsko naštrcavanje kisikom	nikal, krom, bor, silicij, keramika	prašak
Plinsko naštrcavanje kisikom i stlačenim zrakom	metali, keramika	žica, prašak
Elektrolučno naštrcavanje	metali	žica
Naštrcavanje plazmom	metali, tvrdi metali, keramika	žica, prašak
Indukcijsko naštrcavanje stlačenim zrakom	metali	žica
Elektrotoporno naštrcavanje stlačenim zrakom	metali	talina
Naštrcavanje eksplozijom	tvrdi metali, keramika	prašak, granule
Naštrcavanje kondenzatorskim izbijanjem	metali	tanka žica

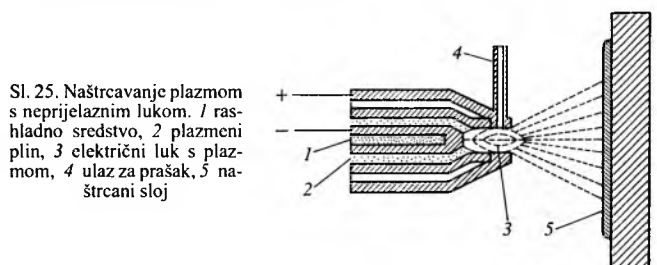
Plinsko naštrcavanje. Materijal za naštrcavanje, najčešće u obliku žice ili praška, ulazi u sapnicu plamenika i tali se u plinskom plamenu. Iznimno se tali i površina na koju se štrca. Kapljice se materijala usitnjuju obično stlačenim zrakom i usmjeruju prema površini. Površina na koju se naštrcava mora biti čista i hrapava, bez oštih kutova i rubova. Neki od načina pripreme površina jesu pjeskanje, narezivanje navoja ili polukružnih utora, uvaljavanje navoja i pjeskanje te elektrotoporno nanošenje predloja.

Elektrolučno naštrcavanje. Između dviju taljivih elektroda od materijala za naštrcavanje uspostavlja se električni luk (sl. 24). Struja stlačenog zraka usitnjuje rastaljeni materijal i usmjerava čestice prema površini.



Sl. 24. Elektrotoporno naštrcavanje. 1 taljive elektrode, 2 stlačeni zrak, 3 električni luk, 4 naštrcani sloj

Naštrcavanje plazmom. Plazma dobivena neprijelaznim lukom može, osim za zavarivanje, služiti i za naštrcavanje materijala. Temperatura u plazmi mnogo je veća nego u plinskom plamenu ili električnom luku, što omogućuje i nanošenje slojeva teško taljivih materijala. Obično se praškasti materijal za naštrcavanje uvodi u sapnicu pištolja u struji zaštitnog plina (sl. 25).



Sl. 25. Naštrcavanje plazmom s neprijelaznim lukom. 1 rashladno sredstvo, 2 plazmeni plin, 3 električni luk s plazmom, 4 ulaz za prašak, 5 naštrcani sloj

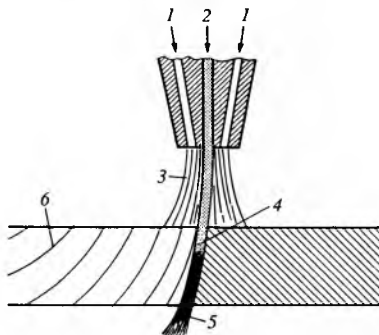
Visokotemperaturna plazma trenutno tali materijal i baca ga prema površini. S obzirom na visoke radne temperature i zaštitnu atmosferu inertnih plinova, mehanička i metalurška svojstva naštrcanog sloja bolja su nego pri plinskom ili elektrolučnom naštrcavanju.

Katkad se primjenjuje i naštrcavanje s prijelaznim plazmenim lukom, što je kombinacija naštrcavanja i navarivanja. Električni se luk održava između volframne elektrode i površine na koju se naštrcava. Materijal za naštrcavanje se tali i ulazi na površini u talinu nastalu zagrijavanjem električnim lukom.

TOPLINSKO REZANJE

Toplinsko rezanje je odvajanje materijala pomoću toplinske energije, bez mehaničkih reznih alata. Materijal pritom lokalno izgara (plinsko rezanje, elektrolučno rezanje) ili se tali i isparuje (elektrolučno rezanje, rezanje plazmom, elektronskim ili laserskim snopom).

Plinsko rezanje (rezanje kisikom, autogeno rezanje) postiže se izgaranjem u struji čistog kisika na temperaturi nižoj od tališta. Metal se prvo na mjestu reza predgrijava plinskim plamenom do plamišta (temperature zapaljenja), a potom se dovodi kisik u kojem metal izgara. Troska, tj. oksidi metala nastali izgaranjem, ispuhaju se strujom kisika (sl. 26). Metal se do plamišta zagrijava najčešće acetilenom, iako se mogu upotrijebiti i drugi gorivi plinovi (propan, butan). Kvaliteta je reza ista kao i nakon grube obradbe odvajanjem čestica. Postupak se može mehanizirati vođenjem plamenika po liniji rezanja pomoću fotočelija koje očitavaju nacrt, magnetnim kopiranjem šablone od feromagnetnog materijala ili računalom.



Sl. 26. Plinsko rezanje. 1 smjesa acetilena i kisika, 2 mlaz kisika za rezanje, 3 plamen za predgrijavanje, 4 područje izgaranja, 5 troska, 6 brazde na reznjoj površini

Plinsko se rezanje može primijeniti za metale kojima je talište u čistom kisiku više od plamišta, te od tališta njihovih oksida, a kojima je toplina nastala izgaranjem zajedno s toplinom predgrijavanja dovoljna za održavanje na temperaturi jednakoj plamištu. Ono je stoga prikladno za nelegirane, niskouglične i niskolegirane čelike, a uspješno se rezu limovi deblji od 3 mm. Pri rezanju tanjih limova tale se rubovi zbog slabijeg odvođenja topline pa se moraju upotrijebiti posebne sapsnice.

Rezanje električnim lukom. Metal se tali pomoću električnog luka koji se uspostavlja ili između šuplje čelične elektrode i rezanog dijela, pa metal izgara u struji kisika koji se dovodi kroz središnji kanal elektrode, ili između ugljene elektrode i rezanog dijela, pa se metal tali i izgara u struji stlačenog zraka. Sile koje djeluju u električnom luku i struja kisika, odnosno stlačenog zraka, pri jednoličnom pomicanju elektrode u smjeru rezanja izbacuju nastale proizvode izgaranja i oblikuju rez. Rezanje s ugljenom elektrodom najčešće se primjenjuje za žlijebljenje, tj. za izradbu poluokruglih žljebova, ili za uklanjanje pogrešaka u zavarenim spojevima.

Rezanje plazmom vrlo je slično zavarivanju plazmom. Plazmeni se mlaz dobiva tlačanjem plina kroz električni luk koji se uspostavlja između volframne elektrode i rezanog dijela ili hladene bakrene sapsnice pištolja samog uređaja. Pritom se razlikuju uređaji s prijelaznim i neprijelaznim lukom, a nastalu talinu izbacuje mlaz plazmenih plinova.

Za stvaranje plazme upotrebljavaju se najčešće vodik i dušik te njihove smjese s argonom. U novije se doba sve više primjenjuju uređaji koji kao plazmeni plin upotrebljavaju zrak i imaju

posebne elektrode. Plazmom se može rezati i pod vodom, a tada nema deformacije rezanog dijela ni onečišćenja okoliša.

LIT.: M. Beckert, A. Neumann, Grundlagen der Schweisstechnik-Löten. VEB Verlag Technik, Berlin 1973. – The Procedure Handbook of Arc Welding. The Lincoln Electric Company, Cleveland 1973. – M. Beckert, A. Neumann, Grundlagen der Schweisstechnik-Verfahren. VEB Verlag Technik, Berlin 1974. – H. Munske, Handbuch des Schutzgasschweißens, Teil II: Elektrotechnische Grundlagen-Schweissanlagen und Einstellpraxis. DVS-Verl., Düsseldorf 1975. – P. Müller, L. Wolff, Handbuch des Unterpulverschweißens. DVS-Verl., Düsseldorf 1976-1979. – Š. Andrić, Lj. Beara, M. Gracin, K. Grubić, S. Kralj, M. Živčić, Elektrolučno zavarivanje. HDTZ, Zagreb 1977. – A. Neumann, R. Richter, Tabellenbuch Schweiss- und Löttechnik. VEB Verlag Technik, Berlin 1979. – J. Ruge, Handbuch des Schweisstechnik. Springer-Verlag, Berlin 1985. – H. B. Carry, Modern Welding Technology. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1989. – S. Kralj, Š. Andrić, Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka. Sveučilište u Zagrebu 1992.

S. Kralj

ZBIRNI KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI (integrirani komunikacijski sustavi), skup elektrokommunikacijskih sustava u kojima se u istoj mreži obavlja nekoliko vrsta komunikacija. Veza se između pojedinih krajnjih točaka komunikacijske mreže uspostavlja komutacijom (promjenom) pojedinih spojeva u mreži. Komunikacijske su mreže prvotno bile izgrađene od žičnih veza (v. *Električni krugovi*, TE 4, str. 50; v. *Električni vodovi*, TE 4, str. 226), a u novije su vrijeme pojedini dijelovi mreže povezani radiokommunikacijskim vezama (v. *Telekomunikacije, radiokommunikacije*, TE 12, str. 576) ili optičkim vezama (v. *Optičke komunikacije*, TE 9, str. 631), što je unaprijedilo tehnički i uporabna svojstva mreže, ali je bit primjene mreže i komutiranja u mreži ostala nepromijenjena. Elementi su prijenosa kodirani znakovi, slovno-brojevi podaci, zvuk ili slika, i to u analognom ili u digitalnom obliku. Informacije se mogu prenositi u realnom vremenu u neprekidnom ili isprekidanom nizu, ili u skraćenom vremenu, sažeto (komprimirano) u tzv. informacijskim paketima. Komunikacijske mreže mogu biti zatvorene ili otvorene, namjenske ili javne, često povezane s drugim mrežama. U cijelom se komunikacijskom sustavu obavljaju dvije skupine postupaka: upravljanje komunikacijama i prijenos korisne informacije. U javnim se sustavima za pružanje telekomunikacijskih usluga još obavlja važan postupak tarifiranja komunikacijske usluge. Suvremene su mjesne i državne mreže većinom povezane u jedinstvenu svjetsku komunikacijsku mrežu. Tehnička su rješenja poznatija pod nazivima telegraf, teleprinter, telefaks, telefon i dr., te u novije vrijeme i komunikacije pomoću računala (v. *Telekomunikacije*, TE 12, str. 572).

Elektrokommunikacije su započele izumom električnog telegrafa (S. F. B. Morse) i postavljanjem prve telegrafske linije između Washingtona i Baltimora 1843. godine. Telegrafske su linije uskoro počele povezivati gradove po cijelom svijetu. Izumom telefona (A. G. Bell) i postavljanjem prve linije između Bostona i Somervillea 1877. elektrokommunikacije su postale izravno dostupne običnim korisnicima, osobito izgradnjom javnih telefonskih mreža, koje su se ubrzo počele povezivati na državnoj, kontinentalnoj i svjetskoj razini (sl. 1). Prva je telefonska mreža puštena u rad već 1878. godine. Komutacija se u telefonskim centralama obavljala prvo ručno, a od 1892. primjenjuju se tehnička rješenja za automatsko komutiranje po nalogu korisnika.

U Hrvatskoj je prva telegrafska linija postavljena iz smjera Beča do Zagreba 1850. prva telefonska linija u Zagrebu 1881. a prva javna telefonska mreža s ručnom centralom također u Zagrebu 1887. godine, dakle sve samo nekoliko godina nakon pojave i primjene tih tehničkih izuma u svijetu. Prva je automatska telefonska centrala u Hrvatskoj puštena u promet u Zagrebu 1928. godine.

Pojavom teleprinter a i teleksa uspostavljaju se u svijetu od 1928. javne i pretplatničke teleprinterke mreže, a prva je takva mreža u Hrvatskoj postavljena u Zagrebu 1945. godine. Masovnom primjenom telefaksa 1980-ih godina teleprinter naglo nestaje iz primjene. Telefonska mreža i njezini komutacijski sustavi postaju 1990-ih godina prijenosnici ne samo telefonskih informacija nego i telefaksa i računalnih informacija, i to na svjetskoj razini.

Tehnička rješenja od 1980-ih godina omogućila su da se ista komutacijska mreža upotrebljava za održavanje telefonskih veza i prijenos telefaksa, a uz upotrebu relativno jednostavnih prilagodnih uređaja (tzv. modema) i za spajanje računala ili posebnih računalnih mreža. U takvoj se mreži korisnicima mogu pružati i mnoge druge usluge, kao što je elektronička pošta, raspoređivanje poziva, zadržavanje poziva i poruka i dr. Stoga danas pojmovi telefon, zadržavanje priključak, telefonska mreža, telefonska cen-