LAPPEENRANNAN TEKNILINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

PAKSUN KUUMAN TERÄKSEN POLTTOLEIKKAUS

Mika Karttunen
2.8.2009

1 JOHDANTO ... 1
2 POLTTOLEIKKAUS ... 1
2.1 Polttoleikkaustapahtuma ... 1
2.2 Polttoleikkauslaitteisto ... 4
2.2.1 Polttimet ... 4
2.2.2 Suuttimet ... 5
2.2.2.1 Suuttimien jaottelu kuumennuskaasuseoksen virtauskanavien mukaan ... 6
2.2.2.2 Suuttimien jaottelu leikkaushappikanavan muodon mukaan ... 7
2.2.2.3 Suuttimien jaottelu sekoitusperiaatteen mukaan ... 8
2.2.2.4 Erikoissuuttimet ... 10
2.2.3 Polttoleikkauskoneet ... 11
2.2.4 Polttoleikkauskoneiden ohjausjärjestelmät ... 12
2.3 Kaasut ... 13
2.3.1 Happi ... 13
2.3.2 Polttokaasut ... 14
2.3.2.1 Asetyleeni ... 17
2.3.2.2 Maakaasu ... 19
2.3.2.3 Propaani ... 19
2.3.2.4 Propyleeni ... 19
2.3.2.5 Vety ... 20
2.3.2.5 Polttokaasujen vertailua ... 20
2.4 Leikattavat materiaalit ... 21
2.5 Polttoleikkauksen vaikutus leikattavaan materiaaliin ... 23
2.6 Leikatun pinnan laatu ... 24
2.7 Polttoleikkauksen suoritus ... 25
2.7.1 Ohuet materiaalit ... 25
2.7.2 Keskipaksut materiaalit ... 26
2.7.3 Paksut materiaalit ... 26
2.8 Polttoleikkauksen edut ja haitat ... 27
3 KUUMAN TERÄKSEN POLTTOLEIKKAUS ... 28
3.1 Lämpötilan vaikutus polttoleikkaukseen ... 29
3.2 Käytettävät kaasut ... 31
3.3 Laitteisto ... 31
3.3.1 Suuttimet ja polttimet ... 31
3.3.2 Polttoleikkauskoneet ... 32
3.3.3 Leikkaustapahtuma ... 34
3.3.4 Laitteistovalmistajat ... 35
3.4 Leikatun pinnan laadun erityispiirteet ... 35
3.5 Tämänhetkiset parhaat menetelmät kuuman teräksen polttoleikkaukselle ... 36
3.5.1 HOBS ... 36
3.5.2 LOXJET ... 37
4 CASE OVAKO TAALINTEHDAS ... 39
5 CASE OVAKO IMATRA ... 40
6 YHTEENVETO ... 41
LÄHTEET ... 43

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää paras ratkaisu paksun kuuman teräksen polttoleikkaukseen ja perehtyä prosessin erityispiirteisiin. Kuuma rajattiin tarkoittamaan yli 800 °C ja paksu yli 100 mm.

Yleensä polttoleikkaus yhdistetään levyjen leikkaukseen normaaleissa lämpötiloissa. Kuuman teräksen polttoleikkausta käsitelläänkin suhteellisen vähän kirjallisuudessa. Siihen liittyvä kirjallisuus käsittelee aihetta sen pääasiallisten sovelluskohteiden, eli terästen jatkuvavalun ja kuumavalssauksen, kannalta.

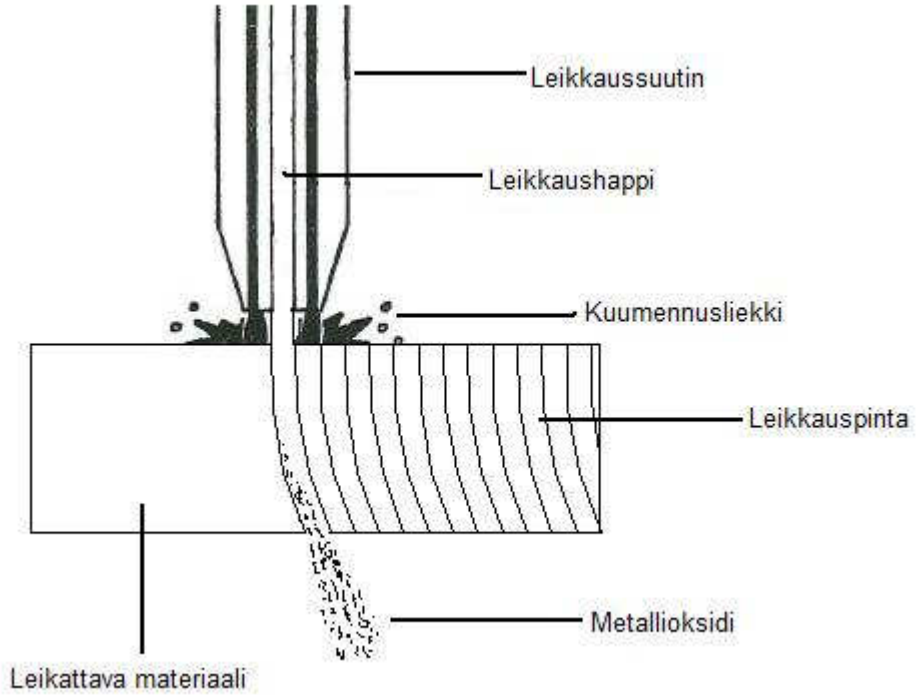
2 POLTTOLEIKKAUS

Polttoleikkaus on terminen leikkausmenetelmä, jossa leikattava metalli kuumennetaan paikallisesti syttymislämpötilaansa ja poltetaan suuntaamalla siihen puhtaan hapen muodostama kaasusuihku. Sulassa tilassa oleva metallioksidi poistuu leikkausrailosta hapen liike-energian avulla. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 3.)

Polttoleikkaus on yleisesti käytetty ja tärkeä prosessi teräsrakenteiden valmistuksessa, laivanrakennuksessa, raskaiden koneiden rakennuksessa sekä paineastioiden ja säiliöiden valmistuksessa, korjauksessa ja kunnossapidossa. Sitä käytetään määrämittaisten ja –muotoisten osien irrottamiseen putkista, tangoista, palkeista ja levyistä. Tärkeä sovellus on myös hitsausrailojen valmistus. (Welding handbook 2004, s. 598.)

2.1 Polttoleikkaustapahtuma

Polttoleikkaus aloitetaan lämmittämällä pieni alue leikattavaa materiaalia syttymislämpötilaansa polttokaasun ja kuumennushapen muodostamalla liekillä, joka palaa suuttimen päässä (kuva 1). Seuraavaksi kuumennettuun kohtaan kohdistetaan puhtaan hapen muodostama kaasusuihku suuttimen keskellä olevasta kanavasta. Puhdas happi hapettaa nopeasti kuuman metallin ja happisuihkun liike-energia kuljettaa pois syntyneen metallioksidin. Kun suutinta liikutetaan eteenpäin, niin leikattavaan materiaaliin syntyy leikkausrailo. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 3.)



Kuva 1. Polttoleikkauksen periaate.

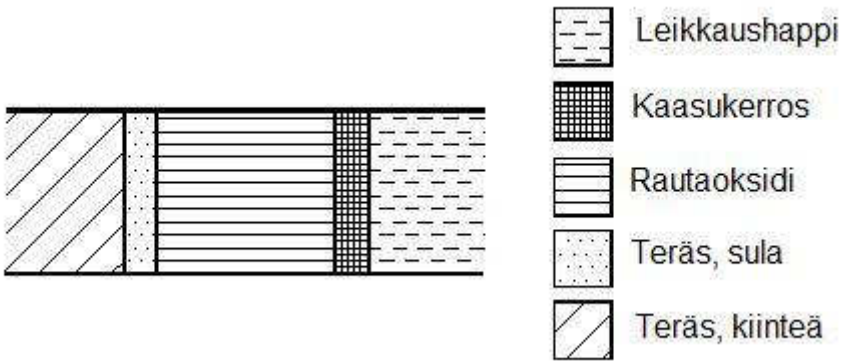
Polttoleikkauksen perustana on siis metallin hapettuminen ja sulan metallioksidin poistaminen leikkausrailosta. Metallin hapettuessa syntyy lämpöä, joka kuumentaa leikkauskohdan ympäristön ja pitää muodostuvan metallioksidin sulana. Lämpö sulattaa myös osan leikattavasta materiaalista. Jotta leikkaus voisi jatkua, niin syntyvän lämmön on oltava riittävä korvaamaan lämpöhäviöt, joita syntyy säteilystä, johtumisesta, konvektiosta ja sulan metallioksidin poistumisesta. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 3.)

Puhtaan raudan syttymislämpötila on noin 870 °C ja sen hapettuminen tapahtuu kolmen reaktion kautta:

1) $Fe + O \rightarrow FeO + 267\ kJ$
2) $3Fe + 2O_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 1120\ kJ$
3) $2Fe + 1.5O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 825\ kJ$

Toisen reaktion vapauttama suuri lämpömäärä on hallitseva useimmissa sovelluksissa. Kolmas reaktio tapahtuu yleensä ainoastaan leikattaessa paksua, yli 300–500 millimetristä terästä. (Welding handbook 2004, s. 598.)

Teräksen polttoleikkauksessa leikkauspinnalle syntyvät materiaalikerrokset ovat esitetty kuvassa 2. Sisin kerros on leikkaushappi, jonka jälkeen tulee kaasukerros, rautaoksidi, sula teräs ja kiinteä teräs. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 4.).



Kuva 2. Teräksen polttoleikkauksessa leikkauspinnalle syntyvät materiaalikerrokset.

Leikkausnopeus on suoraan riippuvainen nopeudesta, jolla happiatomit diffuntoituvat kaasukerroksen ja metallioksidin läpi kosketuksiin metallin kanssa. Kyseisten kerrosten paksuuden kasvaminen pienentää diffuusionopeutta. Kaasumainen kerros on seurausta pääasiassa oksidikerroksen ja leikkaushappisuihkun välisestä kitkasta. Kaasumaisen kerroksen epäpuhtautta lisäävät myös kuumennusliekin palokaasujen sekoittuminen leikkaushappeen sekä leikkaushapen alkuperäiset epäpuhtaudet, mikä edelleen hidastaa diffuusiota. Kaasu- ja oksidikerroksen paksuus riippuu lähinnä leikkaushappisuihkun nopeudesta. Suurempi virtausnopeus pystyy tehokkaammin poistamaan kaasu- ja oksidikerrosta. Leikkaushappisuihkun edetessä syvemmälle metalliin sen nopeus pienenee, jolloin kaasu- ja oksidikerrokset paksunevat ja samalla happeen sekoittuu enemmän epäpuhtauksia. Seurauksena on pienempi palamisnopeus railon alaosassa, joka aiheuttaa ns. jättämän eli metallin palaminen railon alaosassa on jäljessä yläosaa. Siten leikkausnopeus määräytyy railon alaosan palamisnopeudesta. Siksi leikkausnopeus pienenee materiaalin paksuuden kasvaessa. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 4.)

Jättämä näkyy valmiissa leikkauspinnassa uurteiden kaartumisena. Leikkausuurteiden aiheuttaja on leikkauskohdassa olevan metallioksidin pintajännitys. Leikkauksen edetessä oksidikerros ja sula metalli työntyvät leikkaussuihkun sivuille ja taakse. Sulan kuonan pintajännitys pyrkii vetämään kuonan sylinterimäiseksi, jolloin muodostuu kohouma, ja samalla vetää puoleensa sulaa terästä leikkaushappisuihkun läheisestä sulasta, jolloin siihen

muodostuu ohuempi kohta eli uurre. Kuonan jähmettyessä hieman on leikkaus edennyt riittävästi, jotta leikkauspinnalle on syntynyt riittävästi sulaa uuden kohouman muodostamiseksi. Näin kuonan pinta saa aaltomaisen muodon ja se samalla muovaa sulan metallin samanmuotoiseksi. Aallonpituus ja syvyys riippuvat kuonan viskositeetista ja pintajännityksestä. (Blom 1975, s. 213.)

2.2 Polttoleikkauslaitteisto

Peruslaitteisto manuaaliseen leikkaukseen koostuu happi- ja polttokaasupulloista, paineensäätimistä, kaasuletkuista, leikkauspolttimesta ja suuttimesta. Tarvittavia lisälaitteita ovat esimerkiksi suojalasit, suojavaatteet, liekin sytytin ja välineet suuttimen puhdistukseen. (Metals handbook 1983, s. 906.)

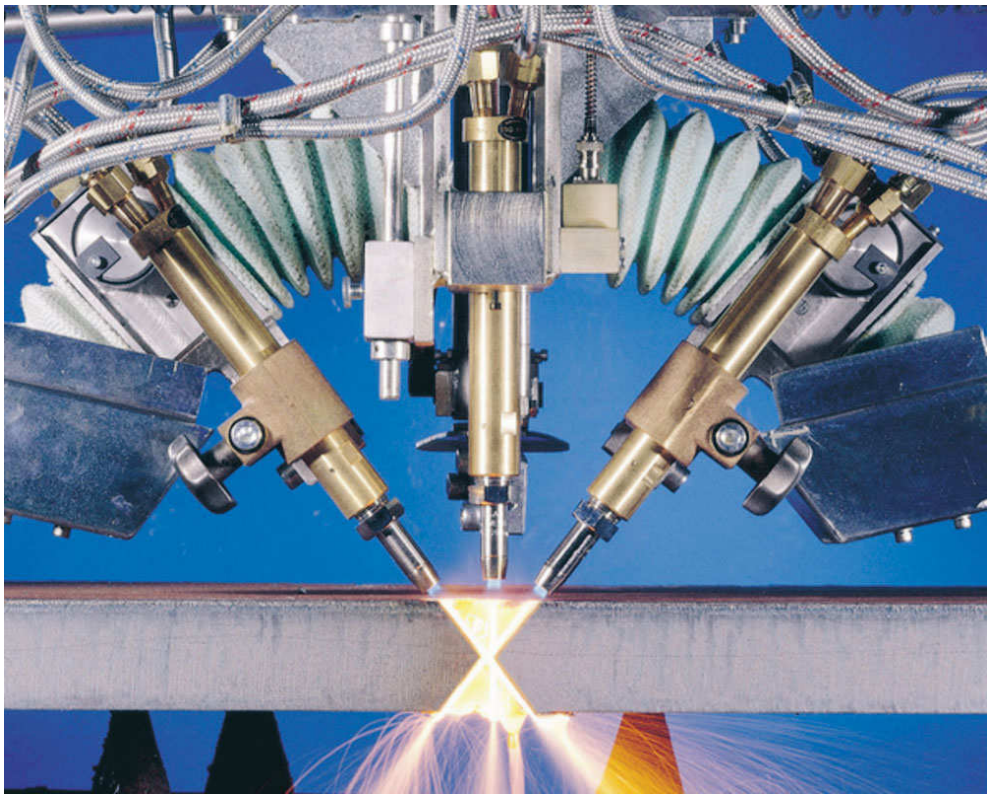
2.2.1 Polttimet

Polttimen tehtävänä on johtaa polttokaasu ja happi halutulla paineella ja virtauksella suuttimeen. Virtausta säädetään polttimessa olevilla säätöventtiileillä. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 5.)

Polttimia on saatavissa erikokoisia ja -tyyppisiä. Polttimen valintaan vaikuttavat pääasiassa leikattavan materiaalin paksuus, käytettävien kaasujen paineet ja leikkausolosuhteet. (Welding handbook 2004, s. 602.)

Polttimet jaetaan eri tyyppeihin kuumennushapen ja polttokaasun sekoitusperiaatteen mukaan, jolloin puhutaan joko injektoripolttimista tai sekoitussuutinpolttimista. Injektoripolttimissa kuumennushappi ja polttokaasu sekoittuvat polttimessa, kun kuumennushappi imee mukaansa tarvittavan määrän polttokaasua. Tämäntyyppisten polttimien etuna on, että suuttimet ovat halvempia, koska niissä tarvitaan vähemmän porauksia. Sekoitussuutinpolttimissa kaasut virtaavat erillisissä kanavissa ja sekoittuvat vasta suuttimessa. Nämä polttimet ovat takatulivarmempia, koska palava kaasuseos syntyy vasta suuttimessa. Sekoitussuutinpolttimia käytetään usein, kun leikkaus aiheuttaa suuren lämpörasituksen. Tällainen tilanne on esimerkiksi kun valmistetaan leikkausrailoa käyttäen kolmipoltinvaunua, jolloin lähekkäiset polttimet kuumenevat voimakkaasti. Kolmipoltinvaunun periaate on esitetty kuvassa 3. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 5.) Takatulella tarkoitetaan tilannetta, jossa kuumennusliekki siirtyy palamaan polttimen sisälle takaiskun jälkeen. Takaisku syntyy, kun riittämättömän kaasunvirtauksen vuoksi

liekki sammuu ja syttyy uudestaan paukahtaen suuttimen aukossa. Takatuli voi johtaa polttimen vaurioitumiseen tai se voi pahimmillaan aiheuttaa letkuräjähdyksen. (Takatulisuoja estää letkuräjähdyksen 2007, s. 3.)



Kuva 3. Kolmipoltinvaunu viistämässä teräslevyä (Esab).

2.2.2 Suuttimet

Suutin on ehdottomasti tärkein osa leikkauslaitteistoa, sillä laitteiston suorituskyky ja leikkauksessa saavutettava laatu ovat pääasiassa riippuvaisia siitä (Greifzu 1990, s. 16; Welding handbook 2004, s. 605). Eri polttokaasut vaativat eri suhteessa happea sekä palavat eri nopeuksilla ja lämpötiloilla. Tästä johtuen kuumennuskaasuseoksen virtauskanavat suunnitellaan tuottamaan vakaa liekki ja riittävän suuri kuumennuskyky aina tietylle kaasulle. (Welding handbook 2004, s. 605.) Yleisimmät suutinmateriaalit ovat messinki ja kupari. Suuttimien jaotteluun eri ryhmiin on useita perusteita: kuumennuskaasuseoksen virtauskanavien muoto, leikkaushappikanavan muoto, kuumennuskaasuseoksen sekoitusperiaate ja on myös monia erikoissuuttimia. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 5.)

2.2.2.1 Suuttimien jaottelu kuumennuskaasuseoksen virtauskanavien mukaan

Kuumennuskaasuseoksen virtauskanavien muodon mukaan puhutaan urasuuttimista, pistoliekkisuuttimista ja rengassuuttimista, joiden periaate on esitetty kuvassa 4 (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 5).

Kuva 4. Urasuutin, pistoliekkisuutin ja rengassuutin kuvattuna suuttimen leikkaavasta päästä.

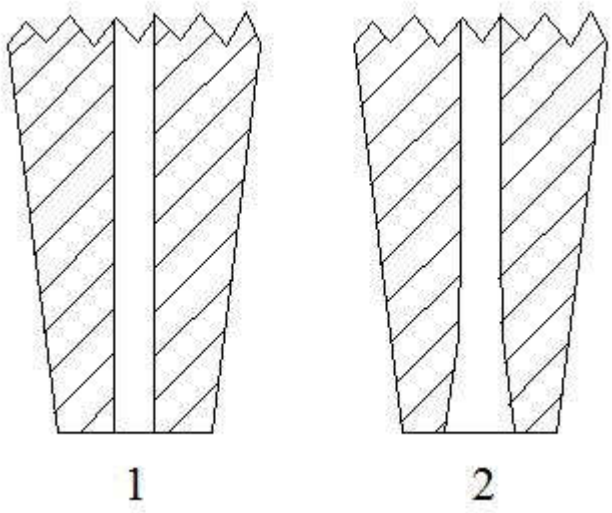
Urasuuttimet ovat kaksiosaisia suuttimia, joissa ulkosuutin toimii suuttimen kuorena, ja sisäsuuttimessa on keskellä leikkaushappikanava ja ulkokehälle on koneistettu urat kuumennuskaasuseokselle. Urasuutin mahdollistaa keskitetyn lämmöntuonnin ja leikkauskohdan tasaisen kuumennuksen, sillä kuumennuskaasuseoksen virtauskanavien lukumäärä on yleensä suuri. Urasuutin on paras suutinrakenne, kun polttokaasuna käytetään propaania. Tällöin sisäsuutin sijoitetaan hieman taaemmaksi kuin ulkosuutin, jolloin saavutetaan vakaampi liekki. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 6.) Urasuutin on nykyään yleisin käytössä oleva suutinrakenne (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 5; Greifzu 1990, s. 17).

Pistoliekkisuuttimet valmistetaan yhtenä kappaleena, joten ne kestävät hyvin mekaanista ja termistä rasitusta. Pistoliekkisuuttimilla kuumennusliekin lämpö ei jakaannu aina yhtä tasaisesti kuin urasuuttimilla, koska kuumennuskaasuseoksen virtauskanavien lukumäärä on yleensä pieni. (Greifzu 1990, s. 17.)

Rengassuuttimia on yksi- ja kaksiosaisia (Lotz et al. 1979, s. 43; Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 5). Rengasmaisella kuumennusliekillä on samanlaiset kuumennusominaisuudet joka suuntaan, ja se estää tehokkaasti ympäröivän ilman, huurujen ja kuonapartikkelien pääsyn leikkaushappeen. Näin leikkaushappi pysyy puhtaana ja saavutetaan hyvä leikkausnopeus. Myös suuttimen pää on hyvin suojassa roiskeilta, joten se tarvitsee vähemmän huoltoa kuin esimerkiksi pistoliekkisuuttimet. (Lotz et al. 1979, s. 43.) Kaksiosaisissa rengassuuttimissa on käytännössä mahdotonta saada keskitettyä sisäsuutin täydellisesti ulkosuuttimeen. Epäkeskisyydestä johtuen kuumennusliekki ja leikkaushappisuihku suuntautuvat vinoon, jolloin leikkausominaisuudet tulevat suunnasta riippuvaisiksi. Samalla herkkyys takaiskuihin kasvaa. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 6; Greifzu 1990, s. 17.)

2.2.2.2 Suuttimien jaottelu leikkaushappikanavan muodon mukaan

Leikkaushappikanava on olennaisin osa leikkaussuutinta. Sen muoto ja mitat vaikuttavat ratkaisevasti leikatun pinnan laatuun, leikkausnopeuteen ja leikkausrailon muotoon. (Greifzu 1990, s. 17.) Leikkausnopeus on riippuvainen kaasu- ja oksidikerrosten paksuudesta, jotka puolestaan ovat riippuvaisia leikkaushappisuihkun virtausnopeudesta. Virtausnopeuden lisääminen suoritetaan nostamalla leikkaushapen painetta. Suurin mahdollinen suuttimella käytettävissä oleva leikkaushapen paine riippuu leikkaushappikanavan muodosta. Muodon mukaan suuttimet jaetaan konventionaalisiin suuttimiin ja pikaleikkaussuuttimiin. Niiden leikkaushappikanavien muoto on esitetty periaatteellisesti kuvassa 5. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 6.)



Kuva 5. Konventionaalinen suutin (1) ja pikaleikkaussuutin (2).

Konventionaalisessa suuttimessa leikkaushappikanava on sylinterinmuotoinen. Tällä rakenteella suurin mahdollinen leikkaushapen paine on 4–5 bar. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 6; Greifzu 1990, s. 18; Welding handbook 2004, s. 604.) Sitä suuremmilla paineilla leikkaushappisuihkuun syntyy pyörteitä ja leikkausnopeutta joudutaan pienentämään. Leikkaushapen virtausnopeus on konventionaalisilla suuttimilla aina äänennopeutta pienempi, jolloin leikkausnopeus jää alhaiseksi. Manuaaliseen leikkaukseen tarkoitetuissa suuttimissa käytetään lähes yksinomaan sylinterinmuotoisia leikkaushappikanavia. (Greifzu 1990, s. 18.) Kun leikkaushappisuihku tulee ulos sylinterimäisestä kanavasta, suihkusta muodostuu kartiomainen. Seurauksena on leveä leikkausrailo ja kuumennusliekin halkaisijan täytyy olla suurempi, jolloin pinta-alayksikölle tuleva lämpömäärä on pienempi. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 6.)

Pikaleikkaussuuttimissa leikkaushappikanava laajenee kartion muotoiseksi, mikä mahdollistaa suurien leikkaushapen paineiden käyttämisen. Hapen virtausnopeus ylittää äänennopeuden ja 8 bar:n paineella voidaan saavuttaa virtausnopeus, joka on kaksi kertaa äänennopeus. Virtausnopeus riippuu leikkaushappikanavan pienimmän poikkikeikkauksen pinta-alasta. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 7.) Markkinoilla olevissa pikaleikkaussuuttimissa käytetään yleensä 8–10 bar:n leikkaushapen paineita (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 6; Greifzu 1990, s. 18), mutta on myös jopa 35 baarin paineella toimivia suuttimia (Lotz, M 1995, s. 52). Pikaleikkaussuuttimilla saavutetaan 20–30 % suurempi leikkausnopeus kuin konventionaalisilla suuttimilla ja myös parempi leikkauspinnan laatu (Greifzu 1990, s. 18; Welding handbook 2004, s. 604). Kartionmuotoisesta leikkaushappikanavasta ulostuleva happisuihku ei leviä vaan pysyy melko pitkälle sylinterimäisenä. Näin saavutetaan kapeampi leikkausrailo ja kuumennusliekin halkaisija saadaan pienemmäksi, mikä lisää leikattavan kappaleen pinta-alayksikölle tulevaa lämpömäärää. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 7.) Vaikka pikaleikkaussuuttimissa käytetäänkin suurempia paineita, se ei johda välttämättä suurempaan leikkaushapen kulutukseen (Greifzu 1990, s. 18).

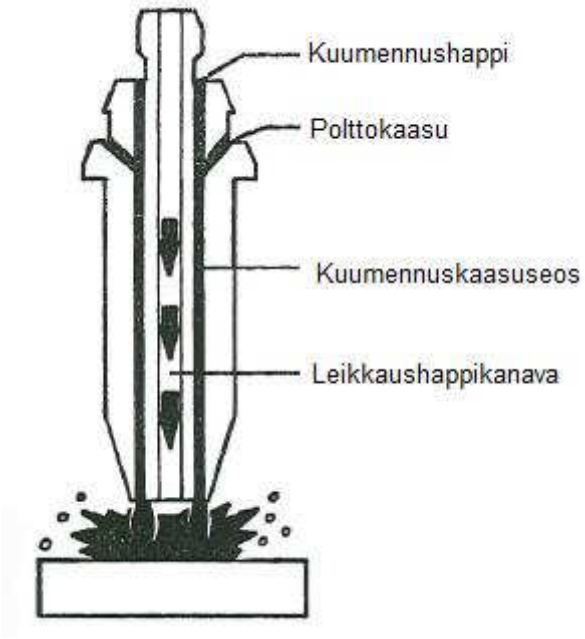
2.2.2.3 Suuttimien jaottelu sekoitusperiaatteen mukaan

Kuten polttimetkin jaettiin kahteen luokkaan kuumennushapen ja polttokaasun sekoitusperiaatteen mukaan, myös suuttimet ovat erilaiset molemmille luokille. Sekoitusperiaate vaikuttaa siihen, miten polttokaasun ja kuumennushapen virtauskanavat kulkevat suuttimessa.

Injektoripolttimille tarkoitetuissa suuttimissa ei ole erillisiä kanavia kuumennushapelle ja polttokaasulle, vaan sekoittuminen tapahtuu jo polttimessa ja suuttimen läpi virtaa ainoastaan kuumennuskaasuseosta omissa kanavissaan. (Welding handbook 2004, s. 602)

Sekoitussuuttimet jaetaan kolmeen eri luokkaan: varsinaisiin sekoitussuuttimiin (gas mixing nozzle), jälkisekoitussuuttimiin (post mixing nozzle) ja suuttimiin, joissa yhdistetään molempien edellä mainittujen luokkien periaatteet (gas/post mixing nozzle). (Framag 2008, s. 94.)

Varsinaisissa sekoitussuuttimissa kuumennushappi ja polttokaasu tulevat suuttimeen omista kanavistaan. Nämä kanavat yhtyvät suuttimen sisällä, jolloin muodostuu haluttu seos, joka sitten purkautuu ulos suuttimesta. Tässä suutintyypissä kanavat on järjestetty siten, että takaiskun sattuessa liekki ei pääse etenemään suuttimesta polttimeen. Kuvassa 6 on esitetty sekoitussuuttimen periaate. (Framag 2008, s. 94.)



Kuva 6. Sekoitussuuttimen periaate (Greifzu 1990, s. 17).

Jälkisekoitussuuttimissa kuumennushappi ja polttokaasu tulevat suuttimeen omista kanavistaan, jotka kulkevat läpi koko suuttimen ilman, että mitään kaasujen sekoittumista tapahtuu itse suuttimen sisällä. Kuumennushappi ja polttokaasu purkautuvat ulos suuttimesta omista kanavistaan, jotka ovat järjestetty kahden samankeskisen ympyrän

kehälle, ja sekoittuvat vasta suuttimen ulkopuolella. Tämä suutintyyppi on täysin suojassa takaiskuilta ja takatulelta riippumatta kaasujen paineesta. (Framag 2008, s. 94.)

Sekoitus- ja jälkisekoitussuuttimen yhdistelmässä on samalla tavoin kaksi samankeskistä riviä kanavia kuin jälkisekoitussuuttimissa. Sisemmistä kanavista virtaa puhdasta polttokaasua ja ulommista virtaa polttokaasun ja kuumennushapen seosta. (Rickfält & Brodén 1995, s. 242.)

2.2.2.4 Erikoissuuttimet

Erikoissuuttimiin voidaan lukea happivaippasuuttimet, kaksisuihkusuuttimet ja muut vastaavat.

Happivaippasuuttimen periaatteena on suojata leikkaushappisuihkua palokaasujen sekoittumiselta leikkaushapen ympärille virtaavan happivaipan avulla, jolloin puhtaamman leikkaushapen kautta saavutetaan 20–40 % suurempi leikkausnopeus verrattuna normaaliin pikaleikkaussuuttimeen. Leikkauspinnan laatu on hyvä johtuen happivaipan aiheuttamasta jälkipalamisesta, joka tasoittaa pintaa. Happivaippasuuttimilla on kuitenkin useita haittoja. Happivaippa lisää hapenkulutusta huomattavasti. Jälkipalaminen leventää leikkausrailoa, jolloin materiaalihukka on suurempi. Metallioksidia syntyy paljon ja se jää usein melko tiukasti kiinni leikattavaan kappaleeseen. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 7.) Leikkaus vaatii, että etäisyys suuttimesta leikattavaan kappaleeseen pysyy tarkasti vaadittuna. Muuten happivaipan vaikutus pienenee ja lähes mitään etua ei saavuteta. (Greifzu 1990, s. 18.)

Kaksisuihkusuuttimessa on kaksi erillistä leikkaushappisuihkua samojen kuumennusliekkien ympäröimänä. Periaatteena on, että käytetään normaalia huomattavasti korkeampaa leikkausnopeutta ja ensimmäinen suihku suorittaa ainoastaan karkean irtileikkauksen. Sen jälkeen taaempana oleva suihku leikkaa kuumentuneen metallin ja tuottaa viimeistellyn pinnan. Haittana on suuri kaasujen kulutus ja leveä leikkausrailo. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 7.)

2.2.3 Polttoleikkauskoneet

Polttoleikkauskoneet jaetaan siirrettäviin ja kiinteisiin. Kiinteät koneet jaetaan portaali-, ristivaunu- ja nivelvarsipolttoleikkauskoneisiin. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 14.)

Siirrettävät koneet on pääasiassa tarkoitettu suoran linjan leikkaukseen. Kuitenkin joillakin pystyy leikkaamaan myös ympyränmuotoista rataa ja muita muotoja. Siirrettävät koneet koostuvat tyypillisesti moottorin liikuttamasta vaunusta, jossa on säädettävä kiinnityslaite polttimelle. Useimmiten vaunu kulkee kiskoilla, joiden tehtävänä on polttimen ohjaus. Leikkausnopeus on säädettävissä laajalla alueella. Leikkaustarkkuus riippuu kiskojen tarkkuudesta ja vaunun pyörien sovituksesta kiskoihin. Siirrettäviä koneita on saatavissa monessa eri kokoluokassa, riippuen suoritettavasta työstä. Pienimmät koneet painavat vain pari kiloa ja pystyvät kantamaan vain pieniä, ohuille materiaaleille tarkoitettuja polttimia. Suuret siirrettävät koneet ovat painavia ja ne pystyvät kuljettamaan yhtä tai useampaa raskaaseen käyttöön tarkoitettua poltinta ja tarvittavaa lisälaitteistoa paksun materiaalin leikkaukseen. (Welding handbook 2004, s. 606)

Nivelvarsikoneet ovat rakenteeltaan yksinkertaisimpia kiinteitä polttoleikkauskoneita. Ne soveltuvat pienten kappaleiden leikkaamiseen ja koneiden tilantarve on vähäinen. Polttimen ohjaukseen käytetään yleensä magneettirullaohjausta. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 15.)

Ristivaunutyyppinen polttoleikkauskone on rakenteeltaan täysin erilainen kuin nivelvarsipolttoleikkauskone. Siinä on kulkukiskoilla liikkuva pitkittäisvaunu, jonka päälle on sijoitettu poikittainen ulokepalkki. Ulokepalkin kulkupinnoille on sijoitettu polttimia kannattavat poltinvaunut. Pitkittäinen liike saadaan aikaan pitkittäisvaunun liikkeellä ja poikittaisliike poltinvaunun liikkeellä ulokepalkilla. Ristivaunutyyppisen koneen periaate antaa mahdollisuuden valmistaa koneita, joilla pystytään leikkaamaan suuria kappaleita. Ohjaus suoritetaan joko numeerisella tai optisella ohjauksella. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 15.)

Portaalityyppiset polttoleikkauskoneet muistuttavat ristivaunutyyppisiä koneita, mutta niissä ulokepalkin toisessakin päässä on palkkia kannattava kulkukisko. Näin kone on rakenteeltaan tukevampi, jolloin leikkaustarkkuus paranee ja voidaan käyttää useampia poltinvaunuja. Ohjaus suoritetaan yleensä numeerisella ohjauksella tai joskus myös optisella ohjauksella. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 15.)

2.2.4 Polttoleikkauskoneiden ohjausjärjestelmät

Nykyään käytetään numeerista ohjausta, optista ohjausta tai magneettirullaohjausta. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 14.)

Numeerisesti ohjatuissa polttoleikkauskoneissa saadaan ohjaukseen tarvittava tieto ohjaimen muistiin, levyasemalle tai järjestelmäohjaimelle tallennetusta ohjelmasta. Leikkausradan lisäksi numeerisella ohjauksella ohjataan monia muita toimintoja kuten leikkausnopeutta, kaasunvirtausta, liekin sytytystä ja railokompensointia. (Welding handbook 2004, s. 608.)

Optisessa ohjauksessa valosähköinen seurantapää seuraa automaattisesti polttoleikkausmallin piirustusviivaa tai silhuetin reunaa ja ohjaa poltinten liikettä mallin mukaisesti. Ohjauksen seuratessa piirustusviivaa puhutaan viivaseurannasta ja seuratessa leikkausviivan tai silhuetin reunaa reunaseurannasta. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 15.) Reunaseurannassa käytetään yleensä valkoista mallia mustalla pohjalla, jolloin seurantapää mittaa näkemänsä mustan ja valkoisen määrää ja pyrkii pitämään ne yhtä suurina. Muutos niiden määrissä synnyttää ohjausimpulssin moottorille, joka kääntää seurantapään takaisin tasapainotilaan. Viivaseurannassa seurantapää mittaa viivan molemmin puolin heijastuvaa valoa. Kun niiden määrät pysyvät yhtä suurina, liike jatkuu suoraviivaisena ja poikkeavuudet kääntävät seurantapäätä. (Metals handbook 1983, s. 907.)

Magneettirullaohjauksessa uritettu magneettinen rulla pyörii vasten teräksistä mallia. Rulla on kiinnitetty pantografiin, jonka mukaan poltin liikkuu. Tämä ohjausmenetelmä on suhteellisen hidas. (Metals handbook 1983, s. 907.)

Numeerista ohjausta voidaan verrata optiseen ohjaukseen seuraavilla tavoilla (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 17):

1) Numeerisesti ohjatun koneen käyttösuhde on huomattavasti suurempi kuin optisesti ohjatun.
2) Numeerisesti ohjatuilla koneilla syntyy yleensä vähemmän romulevyä kuin optisesti ohjatuilla koneilla.
3) Koska kaasunvirtausten kytkennät päälle ja pois tapahtuvat numeerisella ohjauksella automaattisesti, niin kaasujen kuluu hukkaan vähemmän.
4) Numeerisella ohjauksella voidaan saavuttaa parempi mittatarkkuus, koska leikattavan kappaleen muoto on annettu täsmällisesti. Polttoleikkausmallineissa on aina jonkin verran epätarkkuutta.
5) Polttoleikkausmallineiden varastointi on hankalampaa kuin numeeristen leikkausohjelmien.
6) Numeerisesti ohjatut koneet vievät vähemmän lattiatilaan kuin optisesti ohjatut.

2.3 Kaasut

Polttoleikkauksessa käytettäviä kaasuja ovat happi, jota käytetään sekä leikkauksessa, että kuumennuskaasuseoksessa, ja polttokaasut, jotka muodostavat kuumennuskaasuseoksen palavan osan. Yleisimmät Suomessa käytettävät polttokaasut ovat asetyleeni, propaani ja maakaasu (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 10), mutta myös propyleeniä, vetyä ja erilaisia hiilivetyseoksia, kuten MPS, voidaan käyttää (Welding handbook 2004, s. 608).

2.3.1 Happi

Leikkaushappisuihku on keskeisessä tehtävässä polttoleikkauksessa, joten siihen kohdistuu erittäin suuret vaatimukset. (Metals handbook 1983, s. 900.)

Parhaan leikkausnopeuden ja laadun saavuttamiseksi leikkaushapen puhtausasteen tulisi olla vähintään 99,5 %. Pienempi puhtausaste pienentää leikkausnopeutta huomattavasti. Jo yhden prosenttiyksikön puhtausasteen pieneneminen vähentää leikkausnopeutta 15–20 %. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 14; Welding handbook 2004, s. 609.) Samalla leikkaushapen kulutus kasvaa noin 25 %. Sivuvaikutuksena myös leikkauspinnan laatu huononee ja oksidit tarttuvat lujemmin leikatun pinnan alasärmään. Kun puhtausaste laskee alle 95 %:n, leikkaus ei enää tapahdu normaalilla tavalla ja metalli lähinnä sulaa, ja leikkaushappi huuhtoo sulan metallin pois. Tuloksena on erittäin huono laatu, joka ei yleensä ole hyväksyttävissä. (Welding handbook 2004, s. 609.) Alle 90 %:n puhtausasteella leikkaus ei ole enää mahdollista (Metals handbook 1983, s. 898). Leikkausnopeuteen

vaikuttaa epäpuhtauspitoisuuden lisäksi epäpuhtauksien laatu. Leikkausnopeutta pienentää kasvavassa järjestyksessä vety, helium, typpi, argon ja krypton. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 14.) Yli 99,5 %:n puhtausaste ei enää tarjoa merkittävää etua. Leikkausnopeus kasvaa vain noin 2 % kun käytetään happea, jonka puhtausaste on 99,95 %. Lisäksi puhtaamman hapen korkeampi hinta on yleensä merkittävämpi tekijä, kuin saavutettu pieni etu. (Lyttle et al. 1997, s. 38.)

2.3.2 Polttokaasut

Yleisimmät polttokaasut ovat hiilivetyjä ja niiden palaminen tapahtuu kahden reaktion kautta. Tästä johtuen kuumennusliekkiin muodostuu yleensä kaksi osaa, ydinliekki ja sekundääriliekki. Ydinliekissä tapahtuu ensimmäinen reaktio, jossa polttokaasu palaa vedyksi ja hiilidioksidiksi ja sekundääriliekissä toinen reaktio, jossa ensimmäisen reaktion tuotteista muodostuu edelleen hapen kanssa hiilidioksidia ja vettä. Ensimmäiseen reaktion happi tulee pelkästään polttimen kautta kuumennushapesta, mutta toinen reaktio ottaa hapen pääasiassa ympäröivästä ilmasta. Poikkeuksena on vety, joka palaa ainoastaan yhden reaktion kautta. Ydinliekin ja sekundääriliekin lämpöarvojen suhde vaihtelee kaasukohtaisesti. (Metals handbook 1983, s. 900)

Polttoleikkauksessa kuumennusliekillä on seuraavat tehtävät (Welding handbook 2004, s. 609):

1) Lämmittää leikattavan kohdan syttymislämpötilaansa.
2) Ylläpitää leikkaustapahtumaa tuomalla lämpöä leikattavaan kohtaan.
3) Suojaa leikkaushappisuihkua ympäröivältä ilmalta ja pitää sen yhtenäisenä mahdollisimman kauan.
4) Poistaa pinnalta ruosteen, maalin, valssihilseen ja muut epäpuhtaudet, jotka voisivat haitata leikkauksen normaalia etenemistä.

Kuumennusliekin osuus tarvittavasta kokonaislämpöenergiasta riippuu kappaleen paksuudesta. Kun materiaalina on teräs, metallin hapettumisen yhteydessä vapautuvan energian osuus kasvaa kappaleen paksuuden kasvaessa ollen 10 mm:llä noin 65 %, 15 mm:llä noin 75 % ja 30 mm:llä noin 85 %. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 10.)

Kuumennusliekistä leikattavan kappaleen pinta-alayksikölle siirtyvä lämpöenergian määrä riippuu liekin lämpövirrantiheydestä (kJ/m^2/s), joka määritellään liekin lämpöarvon (kJ/m^3) ja palamisnopeuden (m/s) tulona, sekä siitä, kuinka suuri osuus liekin lämpöenergiasta

siirtyy leikattavan kappaleen pinnalle. Liekin lämpövirrantiheys riippuu käytetystä polttokaasusta ja suuttimen rakenteesta. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 10.) Liekin lämpöenergiasta kappaleen pinnalle siirtyvän osuus riippuu liekin ja kappaleen lämpötilaerosta, kappaleen lämmönjohtavuudesta ja koosta (Metals handbook 1983, s. 898).

Lämpövirrantiheys, joka riittää leikkauskohdan nopeaan kuumentamiseen syttymislämpötilaansa, on yleensä riittävä ylläpitämään leikkaustapahtumaa suurillakin leikkausnopeuksilla. Laatu ei kuitenkaan välttämättä ole optimaalinen. Korkealaatuinen leikkaus voidaan suorittaa huomattavasti pienemmällä kuumennusliekin lämpövirrantiheydellä kuin normaalisti vaaditaan nopeaan leikkauksen aloitukseen. Monissa suurissa polttoleikkauskoneissa on mahdollisuus rajoittaa suurempi kuumennusliekki käytettäväksi ainoastaan leikkauksen aloituksessa. Aloituksen jälkeen kuumennusliekki pienennetään riittävälle tasolle, jolloin säästetään polttokaasua ja kuumennushappea, sekä saadaan aikaan parempi pinnanlaatu. (Welding handbook 2004, s. 609.)

Polttokaasu valitaan yleensä kustannusten, suorituskyvyn ja saatavuuden perusteella. Seuraavat tekijät tulisi ottaa huomioon polttokaasun valinnassa (Welding handbook 2004, s. 609–610):

1) Leikkauskohdan kuumennusaika aloitettaessa leikkausta suoraan tai pyöristettyyn särmään ja lävistettäessä reikiä aloituskohdaksi.
2) Vaikutus leikkausnopeuteen leikattaessa suoraa linjaa, muotoleikkauksessa ja hitsausrailon valmistuksessa.
3) Kaasun hinta ja saatavuus pulloissa, säiliöissä ja kaasuverkossa.
4) Polttokaasun polttamiseen vaaditun kuumennushapen määrä.
5) Edellä mainittujen seikkojen yhteisvaikutus tuottavuuteen koskien tiettyä leikkausoperaatiota.
6) Mahdollisuus käyttää polttokaasua tehokkaasti muihinkin käyttötarkoituksiin kuten hitsaukseen, kuumennukseen, juottamiseen ja kaasuhöyläykseen, jos niille on tarvetta.
7) Turvallisuus kaasusäiliöiden kuljetuksessa ja käsittelyssä.

Optimaalisen suorituskyvyn ja turvallisuuden takaamiseksi polttimet ja suuttimet pitäisi aina olla suunniteltu käytettäväksi valitulla polttokaasulla.

Polttokaasujen ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Kaikki ominaisuudet ovat lämpötilassa 15,6 °C ja paineessa 1,013 bar. Taulukon tietojen merkittävyyden arvioimiseksi on hyvä tuntea muutamia sen sisältämiä käsitteitä (Welding handbook 2004, s. 472–473):

1) Liekki on neutraali, kun ensimmäinen ydinliekin muodostava reaktio on tasapainossa eli syntyy pelkästään hiilimonoksidia ja vetyä, eikä siitä jää ylimääräistä happea tai polttokaasua. Tällöin ydinliekki ei ole hapettava tai hiilettävä.
2) Kunkin polttokaasun liekin lämpötila vaihtelee kuumennushapen ja polttokaasun suhteen mukaan, eikä suurinta lämpötilaa saavuteta yleensä neutraalilla liekillä, vaan yleensä hieman hapettavalla.
3) Hapen ja polttokaasun suhde ilmoittaa sen määrän happea suhteessa polttokaasuun, joka tarvitaan polttokaasun täydelliseen palamiseen siten, että toisen reaktion jälkeen lopputuotteina saadaan pelkästään hiilidioksidia ja vettä. Se ei kuvaa polttimen kautta tulevien kaasujen suhdetta, koska osa palamiseen tarvittavasta hapesta saadaan ympäröivästä ilmasta.
4) Liekin palamisnopeus kertoo kuinka nopeasti liekki etenee palamattomassa kaasussa. Se vaihtelee hapen ja polttokaasun suhteen mukaan. Se vaikuttaa liekin kokoon ja lämpötilaan. Palamisnopeus vaikuttaa myös siihen, kuinka nopeasti kaasut voivat virrata suuttimesta ulos, ettei synny takaiskuja tai liekki ei ala palamaan kaukana suuttimen kärjestä.
5) Lämpöarvo on se määrä lämpöä, joka syntyy kun tietty määrä polttokaasua palaa.
6) Ominaispaino kuvaa kaasun tiheyttä suhteessa ilmaan. Se kertoo miten kaasu voi käyttäytyä vuodon sattuessa. Jos ominaispaino on esimerkiksi pienempi kuin ilmalla, niin kaasu kohoaa ylöspäin ja voi kertyä huoneiden nurkkiin.

Taulukko 1. Polttokaasujen ominaisuudet, kun lämpötila on 15,6 °C ja paine 1,013 bar (Welding handbook 2004, s. 610).

Polttokaasu	Asetyleeni	Propaani	Maakaasu	Propyleeni	Vety
Kemiallinen kaava	C_2H_2	C_3H_8	CH_4	C_3H_6	H_2
Neutraalin liekin lämpötila [°C]	3100	2520	2540	2870	2660
Neutraalin liekin palamisnopeus [m/s]	6	4	5,5	-	11
Ydinliekin lämpöarvo [MJ/m³]	19	10	0,4	16	–
Sekundääriliekin lämpöarvo [MJ/m³]	36	94	37	72	–
Kokonaislämpöarvo [MJ/m³]	55	104	37	88	12
Kokonaislämpöarvo [MJ/kg]	50	51	56	49	142
Hapen ja polttokaasun suhde [m³ happea/ m³ polttokaasua]	2,5	5,0	2,0	4,5	0,5
Polttimen kautta tulevan hapen osuus (neutraali liekki) [m³ happea/ m³ polttokaasua]	1,1	3,5	1,5	2,6	–
Räjähdysrajat ilmassa [%]	2,5–82	2,3–9,5	3,4–10,8	2,0–10	4–75
Ominaistilavuus [m³/kg]	0,91	0,54	1,4	0,55	11,77
Ominaispaino (Ilma=1)	0,906	1,52	0,62	1,48	0,07

2.3.2.1 Asetyleeni

Asetyleeni eli etyyni on yleisin polttokaasu manuaalisessa leikkaamisessa. Sen suurimmat edut ja syyt yleiseen käyttöön ovat hyvä saatavuus, liekin korkea lämpötila, sekä yleinen tietoisuus ja tottumus asetyleeniliekin säätämisessä. Asetyleenin palaminen tuottaa kuuman ja lyhyen liekin, jolla on kirkas ydinliekki jokaisessa kuumennuskaasuseoksen virtauskanavassa. Ydinliekin kärki on koko liekin kuumin osa. Huomattava raja ydinliekin ja sekundääriliekin välillä helpottaa merkittävästi liekin säätämistä haluttuun tilaan. Asetyleeni palaa kahden reaktion kautta:

1) $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$
2) $4CO + 2H_2 + 3O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$

Kun nämä reaktioyhtälöt yhdistetään, saadaan koko palamisreaktioksi

$$2C_2H_2 + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$$

Ensimmäinen reaktio tuottaa ydinliekin ja toinen reaktio sekundääriliekin. (Welding handbook 2004, s. 611.)

Riippuen asetyleenin ja kuumennushapen suhteesta, liekki voidaan säätää hapettavaksi tai hiilettäväksi. Neutraali liekki saavutetaan noin 1:1 suhteella. Sitä käytetään yleisimmin manuaalisessa leikkauksessa. Korkein liekin lämpötila 3482 °C saadaan, kun hapen osuus suhteessa asetyleeniin on 1,5:1, jolloin liekki on hapettava. Hapettavaa liekkiä käytetään, kun tarvitaan nopeaa leikkauksen aloitusta, lävistetään reikiä tai tehdään lyhyitä leikkauksia. Hiilettävää liekkiä käytetään joskus valuraudan leikkaamisessa. (Welding handbook 2004, s. 611.)

Asetyleeni sopii parhaiten ohuiden kappaleiden leikkaamiseen, sekä silloin kun leikkauksen aloitukset muodostavat suuren osan leikkausajasta, esimerkiksi suoritettaessa lyhyitä leikkauksia. Tällöin asetyleenin korkea palamislämpötila antaa edun muihin kaasuihin verrattuna. (Welding handbook 2004, s. 611.) Paksujen kappaleiden leikkaamiseen asetyleeni ei sovellu kovin hyvin ja yli 500 mm:n paksuisten kappaleiden leikkaamiseen asetyleeniä käytetään erittäin harvoin, koska kyseinen leikkaus vaatii sekundääriliekiltä suurta lämpöarvoa ja pitkää liekkiä. Tällöin liekki voidaan kuitenkin säätää hieman hiilettäväksi, mikä pienentää palamisnopeutta, jolloin saadaan aikaan pidempi liekki. (Rickfält & Brodén 1995, s. 239.)

Asetyleeni on saatavissa ainoastaan pulloissa, joissa se on liuotettuna asetoniin. Syynä on, että asetyleeni on epävakaata ja se voi räjähtää iskusta myös ilman happea tai ilmaa. Asetoniin liuotettuna asetyleeni ei pääse reagoimaan. Asetyleenipullo on täytetty huokoisella materiaalilla, jonka tehtävänä on ennen kaikkea estää tyhjän tilan muodostuminen pulloon, koska siihen vapautuisi asetyleeniä, joka olisi korkean paineen alaisena altis räjähdykselle. Pullojen suurin sallittu täyttöpaine on 17,5 bar. (Blom 1975, s. 116.) Vapaassa tilassaan asetyleeniä ei saa käyttää yli 1,03 baarin paineessa, joka on yhtä kuin 2,07 baaria absoluuttista painetta (Welding handbook 2004, s. 608). Pullosta saa suositusten mukaan ottaa ainoastaan kymmenesosa tuntia kohden sen koko kaasukapasiteetista. Jos virtaus ylittää sen rajan, niin asetyleeniä ei ehdi vapautua riittävästi

ja sen mukana seuraa asetonia. Siksi voi olla tarpeen kytkeä useampia pulloja rinnan, jotta saadaan aikaan riittävä kapasiteetti. (Lyttle et al. 1997, s. 38.)

2.3.2.2 Maakaasu

Maakaasun koostumus vaihtelee lähteen mukaan, mutta suurin osa siitä on metaania (CH_4). Suomeen tuleva maakaasu sisältää 98 % metaania, loput 2 % ovat etaania ja typpeä. Myös propaania, hiilidioksidia ja happea on hyvin pieniä pitoisuuksia. (Gasum.) Maakaasun palamisreaktio on:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

Maakaasuliekin lämpötila on pienempi kuin asetyleeniliekin. Lisäksi maakaasuliekki on hajaantuneempi kuin asetyleeniliekki. Tästä johtuen maakaasua ja happea tarvitaan huomattavasti suurempia määriä kuin asetyleeniä ja happea tuottamaan saman kuumennusnopeuden leikkauksen aloituksessa. Maakaasuliekin eri tilojen tunnistaminen liekin ulkonäön perusteella ei ole yhtä helppoa kuin asetyleeniliekin. (Welding handbook 2004, s. 612.)

2.3.2.3 Propaani

Propaania saadaan öljynjalostuksen sivutuotteena. Suomessa propaania myydään nimellä nestekaasu, joka sisältää yleensä noin 98 % propaania ja 2 % butaania. Nestekaasua on saatavissa nesteytettynä erikokoisissa pulloissa. (AGA). Propaanin palamisreaktio on:

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 4H_2O$$

Propaani on polttokaasuna laadultaan melko huono, koska se tuottaa palaessaan suuren määrän kaasuja, jotka kuljettavat lämpöä pois huomattavia määriä. Oikein käytettynä se kuitenkin antaa hyvän leikkaustuloksen. Liekin matalan lämpötilan ansiosta leikkausrailon särmät eivät pyöristy, leikkauspinnasta tulee tasainen ja oksidien kiinnittyminen on vähäisempää. Useimmiten propaanille ja maakaasulle soveltuvat samat polttimet ja suuttimet. (Metals handbook 1983, s. 902.)

2.3.2.4 Propyleeni

Propyleeni eli propeeni on propaanin kaltainen kaasu. Propyleenin palamisreaktio on:

$$2C_3H_6 + 9O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

Ydinliekin lämpöarvo on lähes vastaava kuin asetyleenillä. Sekundääriliekin lämpötila on kuitenkin huomattavasti korkeampi kuin asetyleenillä. Propyleenissä yhdistyvät asetyleenin

ydinliekin ominaisuudet ja propaanin sekundääriliekin kuumennuskapasiteetti. (Donaghy 1995, s. 57.)

2.3.2.5 Vety

Vety palaa hapen kanssa lähes värittömällä liekillä reaktiolla:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Liekillä ei ole erillistä ydinliekkiä, joten on vaikea sanoa, että onko liekki neutraali. Vetyä käytetään harvoin polttokaasuna polttoleikkauksessa lukuun ottamatta erityistapauksia kuten vedenalaista leikkausta. (Welding handbook 2004, s. 612.)

2.3.2.5 Polttokaasujen vertailua

Asetyleenin edut propaaniin ja maakaasuun verrattuna (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 13):

1) Asetyleenin ydinliekin lämpötila ja lämpövirrantiheys ovat suuremmat, mistä seuraa, että
   – aloitettaessa leikkaus levyn keskeltä jää esikuumennusaika lyhyemmäksi
   – valssihilseisten, maalattujen ja ruosteisten levyjen leikkaus on nopeampaa
   – alle 10 mm levynpaksuuksille leikkausnopeus asetyleenillä on yleensä noin 5–10 % korkeampi
2) Kuumennushapen kulutus on seossuhteesta johtuen pienempää.
3) Asetyleeniä voidaan käyttää myös hitsauksessa.
4) Asetyleeni on ilmaa kevyempää. Propaani on ilmaa raskaampaa, jolloin se voi kerääntyä syvennyksiin ja aiheuttaa vaaratilanteita. Myös maakaasu on ilmaa kevyempää.

Propaanin ja maakaasun edut asetyleeniin verrattuna (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 13):

1) Propaanin ja maakaasun alhainen palamisnopeus johtaa vähäisempään takatuliherkkyyteen.
2) Leikkaustulos voi olla hieman parempi käytettäessä propaania tai maakaasua.
   – suuria ainevahvuuksia (>100 mm) leikattaessa yläsärmä pysyy paremmin terävänä johtuen ydinliekin pienemmästä kuumennustehosta

– suuria ainevahvuuksia leikattaessa ovat leikkauspinnat levyn paksuussuunnassa tasalaatuisempia. Syynä on pieni palamisnopeus, jonka ansiosta liekki tukee kauemmin leikkaushappisuihkua.

– leikkauspinnan kovuus on pienempi johtuen ydinliekin alhaisemmasta lämpötilasta

– työkappaleen muodonmuutokset ovat hieman vähäisempiä johtuen pienemmästä paikallisesta lämmöntuonnista

3) Propaania ja maakaasua käyttävät suuttimet kestävät yleensä kauemmin, koska niitä ei tarvitse puhdistaa yhtä usein.
4) Propaanin ja maakaasun hinta on alhainen.

Edellä suoritettu polttokaasujen vertailu perustuu puhtaasti kaasujen teoreettisiin ominaisuuksiin. Käytännön leikkaustyössä saavutettavat leikkaustulokset riippuvat myös ratkaisevasti suuttimen ominaisuuksista. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 13.)

2.4 Leikattavat materiaalit

Jotta metallia pystyttäisiin polttoleikkaamaan, sen on täytettävä seuraavat vaatimukset (Nicolai & Graham 1983, s. 297):

1) Metallin täytyy palaa kuumennettuna hapessa.
2) Metallin syttymislämpötilan täytyy olla alhaisempi kuin sen sulamislämpötila. Muuten leikattava kohta sulaa pois ennen syttymistään.
3) Metallin oksidien sulamispisteen täytyy olla alhaisempi kuin itse metallin.
4) Metallin lämmönjohtavuuden täytyy olla alhainen.
5) Metallin palamisen tulee tuottaa riittävästi lämpöä leikkaustapahtuman ylläpitämiseen.
6) Sulan metallioksidin viskositeetin täytyy olla alhainen, jotta se voidaan helposti poistaa leikkausrailosta.

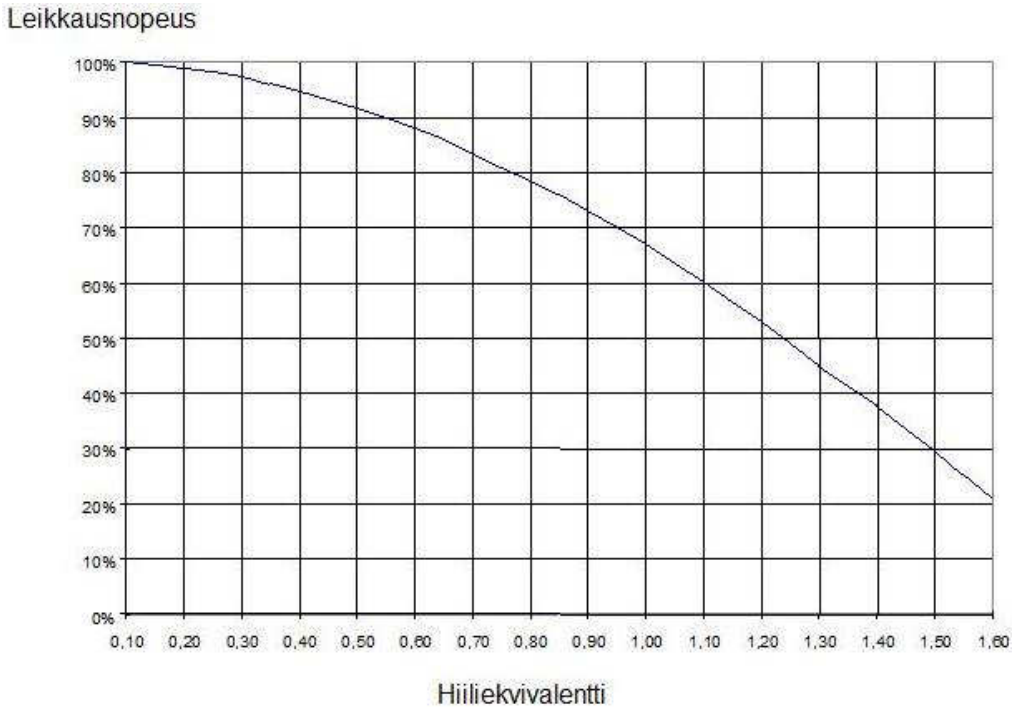
Nämä ehdot täyttyvät seostamattomilla ja niukkaseosteisilla teräksillä. Lisäksi on mahdollista polttoleikata myös titaania ja vanadiinia.

Ilman seosaineita puhdas rauta hapettuu nopeasti. Kun seosaineiden lukumäärä ja pitoisuudet kasvavat, hapettumisnopeus pienenee ja siten leikkaus vaikeutuu. Raudan oksidien sulamispiste on hieman alhaisempi kuin itse raudan. Kuitenkin monien seosaineiden, kuten alumiinin ja kromin, oksidien sulamispisteet ovat korkeampia kuin

raudan oksidien. Nämä seosaineiden oksidit voivat peittää materiaalin leikkausrailossa ja haitata rautaoksidin poistumista railosta. Näin ollen leikkausnopeus pienenee ja laatu huononee, kun seosaineiden määrä teräksessä kasvaa. Kuvassa 7 on esitetty teräksen hiiliekvivalentin vaikutus leikkausnopeuteen. Hiiliekvivalentti C_{ekv} lasketaan kaavalla

$$Cekv = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{Ni\%}{15} + \frac{Cr\%}{5} + \frac{Mo\%}{4} + \frac{V\%}{4} \qquad (1),$$

missä *C%, Mn%, Ni%, Cr%, Mo%* ja *V%* ovat kyseisten seosaineiden pitoisuudet massaprosentteina. Taulukossa 2 on esitetty eri seosaineiden vaikutus teräksen polttoleikattavuuteen. (Welding handbook 2004, s. 622.)



Kuva 7. Leikkausnopeuden riippuvuus teräksen hiiliekvivalentista (Framag 2008, s. 12).

Seostamattomia ja niukkaseosteisia teräksiä, joiden hiilipitoisuus on alle 0,25–0,3 %, voidaan leikata ilman erityisiä toimenpiteitä. Suuremmilla hiilipitoisuuksilla leikkauspintaan muodostuu helposti jäähtymisen yhteydessä martensiittia, jolloin pinta saattaa halkeilla. Martensiitin muodostuminen voidaan estää kuumentamalla kappale ennen leikkausta. Esikuumennuslämpötila *T* voidaan määrittää yhtälöstä

$$T = 500 \times \sqrt{Cekv - 0{,}45} \qquad (2),$$

ja käytännössä se on korkeintaan 600 °C. (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 23.)

Taulukko 2. Eri seosaineiden vaikutus teräksen polttoleikattavuuteen (Welding handbook 2004, s. 624).

Seosaine	Vaikutus
Hiili	0,25 % asti ei aiheuta ongelmia. Siitä korkeammilla pitoisuuksilla vaaditaan esikuumennusta. Yli 4 % tekee leikkauksesta mahdotonta.
Mangaani	Enintään 14 % mangaania ja 1,5 % hiiltä yhdessä.
Pii	Yleensä esiintyvät määrät eivät vaikuta polttoleikkaukseen. Yli 4 % tekee leikkauksesta mahdotonta.
Kromi	5 % asti pystytään leikkaamaan yleensä ilman suurempia vaikeuksia, jos pinta on puhdas. Sitä korkeammilla pitoisuuksilla vaaditaan erikoismenetelmiä.
Nikkeli	3 % asti voidaan leikata perinteisillä menetelmillä. Tyydyttäviin tuloksiin päästään aina 7 % asti.
Molybdeeni	Vaikutus samanlainen kuin kromilla. Yhdessä volframin kanssa suurina pitoisuuksina vaati erikoismenetelmiä.
Volframi	14 % asti leikkaus onnistuu melko hyvin. Yli 20 % pitoisuudella leikkaus ei ole mahdollista.
Kupari	2 % asti ei juurikaan vaikutusta.
Alumiini	Vaikutus huomattavissa vasta yli 10 % pitoisuuksilla.
Fosfori	Ei vaikutusta niissä määrissä, joissa sitä esiintyy teräksissä.
Rikki	Ei vaikutusta niissä määrissä, joissa sitä esiintyy teräksissä. Korkeammilla pitoisuuksilla leikkausnopeus pienenee ja rikkidioksidihuurut ovat huomattavia.
Vanadiini	Niillä määrillä, joita teräksissä esiintyy, vanadiini saattaa parantaa hieman polttoleikattavuutta.

Valuraudan korkean hiilipitoisuuden takia sitä on hankala leikata samoilla menetelmillä kuin niukkahiilisiä teräksiä. Valuraudat sisältävät hiiltä grafiittina tai sementiittinä eli rautakarbidina, jotka molemmat haittaavat raudan hapettumista. Koska valuraudan polttoleikkauksessa ei päästä samaan leikkauksen laatuun kuin teräksillä, niin polttoleikkaus rajoittuu lähinnä valujen vikojen poistoon, valutappien irrottamiseen ja romun leikkaukseen. (Welding handbook 2004, s. 624).

2.5 Polttoleikkauksen vaikutus leikattavaan materiaaliin

Teräksen polttoleikkauksen aikana leikkauspinnan viereisellä alueella lämpötila nousee riittävän korkealle aiheuttamaan mikrorakennemuutoksia. Jäähtymisen aikana syntyvät mikrorakenteet riippuvat jäähtymisnopeudesta. Jäähtymisnopeuteen vaikuttavat ympäröivän materiaalin lämmönjohtavuus ja massa, lämmön poistuminen säteilemällä ja konvektiolla, sekä leikkausnopeus. Leikattaessa terästä huoneenlämpötilassa

jäähtymisnopeus on riittävä sammuttamaan leikkauspinnat nopeasti, etenkin leikattaessa suuria kappaleita. Muutosvyöhyke (HAZ) voi olla 0,8–6 mm paksu, kun teräksen paksuus on 9–150 mm. Lähes kaikilla teräksillä esiintyy jonkinasteista kovuuden kasvua leikkauspinnan läheisyydessä. (Metals handbook 1983, s. 903.)

Terästä polttoleikattaessa leikkauspinta hiilettyy. Hiilettyminen eli hiilipitoisuuden kasvu johtuu rautaoksidikerroksesta, joka estää hiilimonoksidin muodostumisen. Siten sulassa tilassa olevan kerroksen hiilipitoisuus kasvaa. Myös nikkeli ja kupari rikastuvat tässä kerroksessa. (Blom 1975, s. 215.)

2.6 Leikatun pinnan laatu

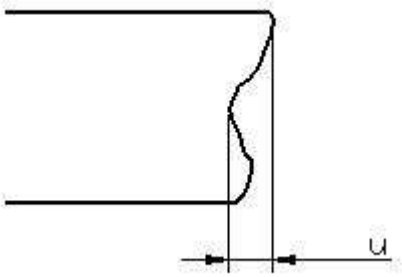
Polttoleikatun pinnan laatuun vaikuttaa noin parikymmentä eri muuttujaa. Tärkeimmät niistä ovat (Welding handbook 2004, s. 627):

1) Leikattavan teräksen tyyppi.
2) Materiaalin paksuus.
3) Teräksen laatu, esimerkiksi sulkeumat ja muut epäjatkuvuudet.
4) Leikattavan kappaleen pinnanlaatu.
5) Kuumennusliekin intensiteetti, sekä polttokaasun ja kuumennushapen suhde.
6) Leikkaushappikanavan muoto ja koko.
7) Leikkaushapen puhtausaste.
8) Leikkaushapen virtausnopeus.
9) Suuttimen leikkauspään puhtaus ja kohtisuoruus.
10) Leikkausnopeus.

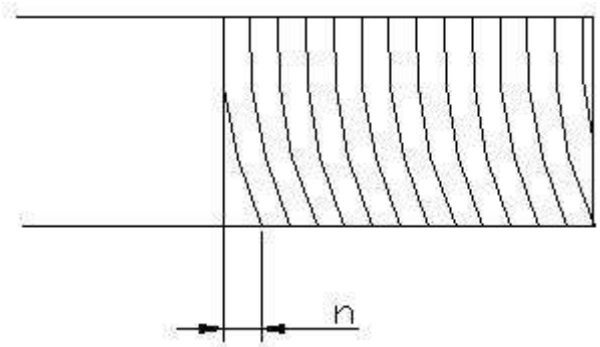
Standardissa SFS-EN ISO 9013 annetaan ohjeet termisesti leikattujen pintojen laadun luokitteluun. Se soveltuu polttoleikatuille pinnoille, joiden ainepaksuus on 3–300 mm. Polttoleikatun pinnan laadun kuvaamiseen käytetään tunnussuureita kohtisuoruustoleranssi *u* ja profiilinsyvyyden keskiarvo *Rz5*. Lisäksi voidaan käyttää jättämää *n*, leikkausuran reunan pyöristymää *r* ja mahdollisen parran tai sulapisaroiden esiintymistä leikkauksen alareunassa.

Kohtisuoruustoleranssi *u* on kahden yhdensuuntaisen viivan välinen etäisyys, jotka polttimen asetuskulmassa koskettavat leikkauksen pintaprofiilia (kuva 8). Profiilisyvyyden keskiarvo *Rz5* on viiden peräkkäisen profiilielementin korkeuksien aritmeettinen keskiarvo,

jossa profiilielementin korkeus *Zt* on profiilielementin syvimmän laakson ja korkeimman huipun summan. Profiilisyvyyden keskiarvo mitataan tyypillisesti etäisyydellä 2/3 leikkauksen yläreunasta. Jättämä *n* on leikkauksen etenemisrintaman kahden pisteen välinen projisoitu etäisyys leikkaussuunnassa (kuva 9). Leikkausuran reunan pyöristymä *r* kuvaa leikkausuran yläreunan muodon. (SFS-EN ISO 9013:2002, s.12–16.)



Kuva 8. Kohtisuoruustoleranssi *u* kohtisuorassa leikkauksessa levyn sivulta kuvattuna.



Kuva 9. Leikkauspinnan uurteiden jättämä *n*.

2.7 Polttoleikkauksen suoritus

Polttoleikattavan teräksen paksuusalue on laaja, 3–3200 mm. Siitä voidaan erottaa kolme eri paksuusaluetta, joilla on omat laitteistonsa ja menetelmänsä. Ohuet materiaalit 3–10 mm, keskipaksut materiaalit 10–300 mm ja paksut materiaalit yli 300 mm.

2.7.1 Ohuet materiaalit

Alle 3 mm paksun teräksen polttoleikkaus on vaikeaa. Railon läheisyydessä ei ole riittävästi massaa absorboimaan lämpöä kuumennusliekistä ja teräksen palamisesta, mikä johtaa ylettömään reunojen sulamiseen ja vääntyilyyn. (Welding handbook 2004, s. 625.)

Suoraan leikkaamiseen voi olla hyödyksi polttimen kallistaminen leikkaussuuntaan, jolloin lämpö jakaantuu suuremmalle alueelle. Muotojen leikkaamisessa polttimen täytyy kuitenkin olla kohtisuorassa levyyn nähden. Tärkeä tekniikka ohuille materiaaleille on useiden päällekkäisten levyjen leikkaaminen yhtä aikaa. Sillä voidaan välttää useimmat ongelmat ja lisäksi se lisää tuottavuutta. (Metals handbook 1983, s. 908.)

2.7.2 Keskipaksut materiaalit

Leikattaessa 10–300 mm paksua terästä polttoleikkaus saavuttaa suurimman tehokkuutensa ja tuottaa laadukkaimmat leikkaukset. 100 mm paksuuteen asti käytetään yleisimmin injektoripolttimia ja vastaavia suuttimia, koska kuumennusliekin säätäminen on helpompaa. Yli 100 mm paksuuksilla käytetään pääasiassa sekoitussuutinperiaatteella toimivia polttimia ja suuttimia. (Greifzu 1990, s. 19.) Levyn paksuuden kasvaessa, kasvaa myös suutinetäisyys. Alle 100 mm paksuuksilla suutinetäisyys on tyypillisesti 5–10 mm ja alle 300 mm paksuuksilla 8–12 mm. Useimmat polttokaasut soveltuvat käytettäviksi tällä paksuusalueella, mutta alueen yläpäässä maakaasu ja propaani ovat suositeltavimpia. (Rickfält & Brodén 1995, s. 239.)

2.7.3 Paksut materiaalit

Paksut kappaleet ovat usein arvokkaita ja siksi epäonnistumisten välttämiseksi pitäisi kiinnittää erityistä huomiota leikkausparametrien valintaan. (Rickfält & Brodén 1995, s. 239.)

Leikkaushapen paine on yleensä 3–9 bar. Liian suuri leikkaushapen paine leventää leikkausrailoa kappaleen alareunasta ja voi synnyttää myös lovia leikkauspintaan. Liian pieni leikkaushapen paine lisää jättämää ja voi olla vaikeaa edes läpäistä kappaletta. (Rickfält & Brodén 1995, s. 240.)

Leikkausnopeus vaihtelee välillä 50–120 mm/min riippuen leikattavan kappaleen paksuudesta. Liian suuri leikkausnopeus lisää jättämää ja jättämän viivoista tulee S-muotoisia. Lisäksi leikkauksen lopetuksessa levyn alanurkka voi jäädä leikkautumatta. Liian pieni leikkausnopeus puolestaan aiheuttaa yläsärmän sulamisen ja lovia leikkauspinnalle. (Rickfält & Brodén 1995, s. 240.)

Kaikkein kriittisin vaihe yli 300 mm paksujen kappaleiden leikkaamisessa on aloitus. Suurin ongelma aloituksessa on saada riittävästi lämpöä kappaleen alareunaan, jotta teräs saataisiin syttymään. Jos aloitus epäonnistuu, eli teräksen palaminen keskeytyy tai leikkaushappi ei pysty läpäisemään koko kappaletta, niin uusi aloitus samasta kohdasta on yleensä mahdotonta. Muutamia yleisimpiä tapoja leikkauksen aloitukseen ovat (Rickfält & Brodén 1995, s. 241):

1) Yläreunaa lämmitetään kunnes se muuttuu oranssin väriseksi. Leikkaushappi kytketään päälle, ja kun sula metallioksidi virtaa levyn reunaa pitkin koko levyn paksuudelta, poltinta aletaan liikuttaa eteenpäin. Metallioksidi auttaa syttymislämpötilan saavuttamisessa levyn alareunassa.
2) Levyn reunaa kuumennetaan käyttäen koko kuumennusliekin pituutta noin minuutin ajan. Poltin siirretään hieman eteenpäin levyn yläreunan päälle ja sitä lämmitetään, kunnes se muuttuu oranssin väriseksi. Sitten poltinta liikutetaan hieman taaksepäin, leikkaushappi kytketään päälle ja aloitetaan leikkaus.
3) Erittäin paksuille kappaleille voidaan edellä mainittua menetelmää laajentaa käyttämällä lisäksi toista poltinta lämmittämään kappaleen reunaa ja erityisesti sen alaosaa.
4) Materiaalin syttymisen helpottamiseksi voidaan reunaa vasten tuoda ohut terästanko siinä vaiheessa, kun sula alkaa valua reunaa pitkin.

2.8 Polttoleikkauksen edut ja haitat

Polttoleikkauksen edut (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 24):

1) Leikkauslaitteiston hinta ja käyttökustannukset ovat alhaiset.
2) Menetelmällä voidaan leikata erittäin paksuja levyjä ja takeita.
3) Kun leikkausarvot valitaan oikein, leikkaustulos on erittäin hyvä.
4) Polttoleikkaus on melko työntekijäystävällinen menetelmä.
5) Leikkausnopeus on muita termisiä leikkausmenetelmiä vähemmän riippuvainen levyn paksuudesta.
6) Leikkauspinnan kovuuden kasvu on melko pieni.

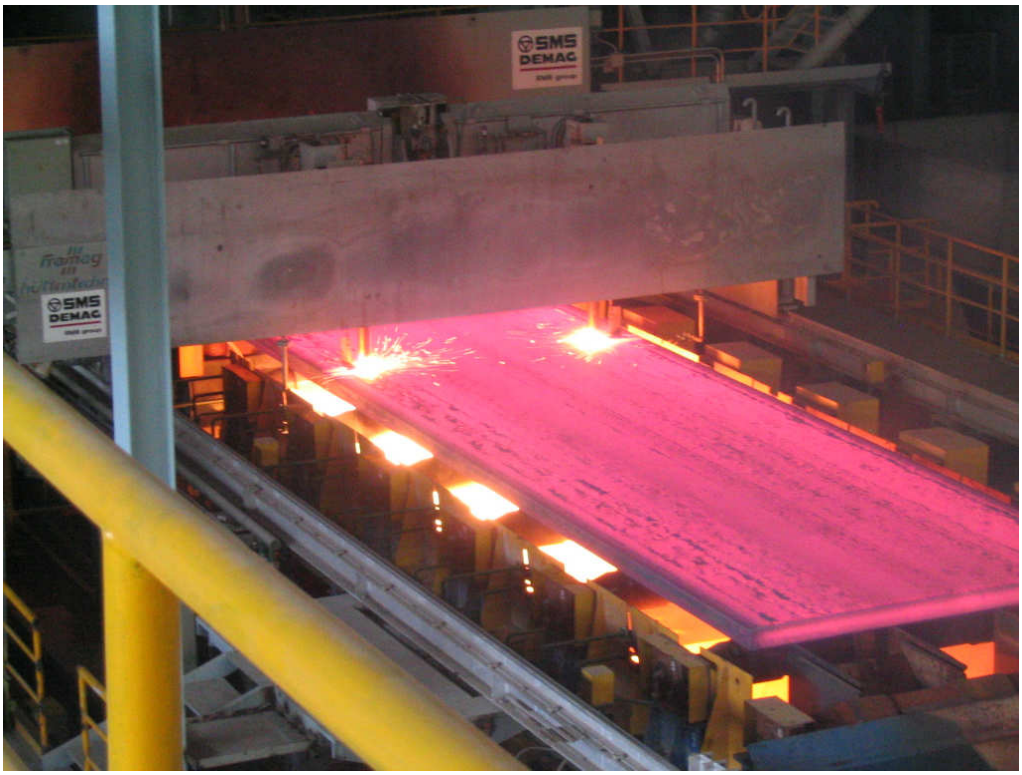
Polttoleikkauksen haitat (Teräslevyjen terminen leikkaus 1985, s. 24):

1) Lämpövaikutusalue on laaja ja suuren lämmöntuonnin aiheuttamat muodonmuutokset ovat suuria varsinkin pienillä levynpaksuuksilla.

2) Leikkausnopeudet ovat melko alhaisia alle 20 mm ainevahvuuksilla verrattuna muihin termisiin leikkausmenetelmiin.
3) Polttoleikkaus soveltuu pääasiassa seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen leikkaamiseen.
4) Polttoleikkaus ei sovellu pienten ja monimutkaisten muotojen leikkaamiseen.

3 KUUMAN TERÄKSEN POLTTOLEIKKAUS

Yleensä teräksen polttoleikkaus korotetuissa lämpötiloissa on kiinnostuksen kohteena, kun halutaan estää leikkauksen aiheuttamaa karkenemista ja sen synnyttämää halkeilua, sekä haluttaessa nostaa leikkausnopeuksia. (Spektor & Sukhinin 1969, s. 54.) Prosesseissa, jotka jo valmiiksi sisältävät kuuman teräksen käsittelyä, polttoleikkauksen suoritus kuumana poistaa tarpeettomia kuumennus- ja jäähdytyskertoja. Yleisimmät prosessit, joissa kuuman teräksen polttoleikkausta tarvitaan, ovat teräksen jatkuvavalu ja kuumavalssaus. (Kiernan & Sohn 1947, s. 301.) Jatkuvavalun yhteydessä polttoleikkaus on lähes yksinomaan käytetty leikkausmenetelmä, kun leikataan yli 150 mm paksua teelmää (neliö poikkileikkaus) tai bloomia (suorakaidepoikkileikkaus), mutta erityisen suvereeni se on leikattaessa säbiä (suorakaidepoikkileikkaus, leveämpi ja ohuempi kuin bloomi). Kilpailevat menetelmät ovat saksileikkaus ja kuumasahaus. (Möller & Jäger 1986, s. 121.) Kuvassa 10 on esitetty 3250x150 mm säbin katkaisu polttoleikkaamalla.

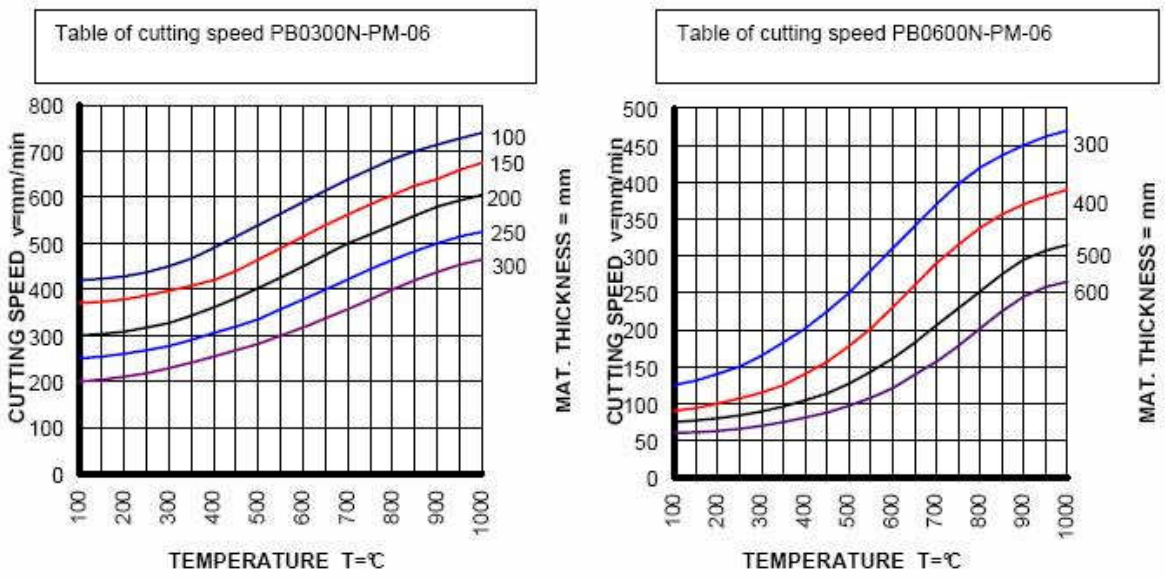


Kuva 10. 3250x150 mm säbin katkaisu polttoleikkaamalla (Framag).

3.1 Lämpötilan vaikutus polttoleikkaukseen

On osoitettu, että teräksen polttoleikkaus korotetuissa lämpötiloissa noudattaa samoja yleisiä periaatteita kuin kylmänä leikkaaminen ja molemmissa voidaan saavuttaa sama leikkauksen tarkkuus ja laatu. (Kiernan & Sohn 1947, s. 301.)

Suurin vaikutus teräksen lämpötilalla on leikkausnopeuteen. Esimerkiksi Spektorin ja Sukhinin (1969, s. 54) tutkimuksessa havaittiin, kun kaikki muut leikkausparametrit pidettiin vakiona ja teräksen lämpötila nostettiin huoneenlämpötilasta lämpötilaan 1000 °C, leikkausnopeus voitiin nostaa 3–3,5 kertaiseksi, kun ainepaksuus oli 20 mm. Kuvassa 11 on esitetty kahden modernin kuumalle teräkselle tarkoitetun polttoleikkaussuuttimen leikkausnopeuden riippuvuus teräksen lämpötilasta ja paksuudesta.



Kuva 11. Kahden eri paksuusalueille tarkoitetun kuuman teräksen polttoleikkaussuuttimen leikkausnopeudet lämpötilan funktiona. Eri käyrät edustavat eri ainepaksuuksia. (Framag 2008, s. 98)

Kun tutkittiin eri lämpötiloissa leikkaushapen kulutuksen suhdetta leikkausnopeuden lisääntymiseen, huomattiin, että tämä suhde on erilainen lämpötila-alueilla 20–600 °C ja 600–950 °C. Ensimmäisessä tapauksessa leikkausnopeus kasvaa leikkaushapen kulutuksen mukana, mutta ei kuitenkaan kovin pitkään. Tietyn rajan jälkeen leikkausnopeus lähtee laskuun, vaikka leikkaushapen kulutus kasvaa. Yli 600 °C lämpötilassa kuitenkin leikkaushapen kulutuksen kasvu johtaa suurempaan leikkausnopeuteen koko tutkitulla alueella. Ilmeisesti teräs on siinä vaiheessa riittävän kuumaa kompensoimaan

leikkaushappisuihkun viilentävän vaikutuksen. Voidaankin siis sanoa, että viimeistään kun teräksen lämpötila ylittää 600 °C, niin siinä vaiheessa erityisesti kuuman teräksen polttoleikkaukseen tarkoitetuilla suuttimilla ja polttimilla aletaan saavuttaa etua leikkausnopeuden suhteen verrattuna normaaleihin suuttimiin ja polttimiin. (Spektor & Sukhinin 1969, s. 54.)

Metallurgiset ongelmat, jotka liittyvät yli 0,3 % hiiltä sisältävien terästen leikkaukseen, poistuvat kuumana leikkauksen myötä. Kiernanin ja Sohnin (1947, s. 309) tutkimuksessa havaittiin, että lämpötilassa 980 °C polttoleikatuissa näytteissä ei ollut tapahtunut ollenkaan leikkausrailon reunojen hiilettymistä, toisin kuin kylmänä leikatuissa näytteissä. Kuumana leikatuissa näytteissä reunojen rakeenkasvu ei ollut merkittävää.

Korkeissa lämpötiloissa teräksen pinnalle muodostuu hapettumisen seurauksena hilsettä. Kiernanin ja Sohnin (1947, s. 309) tutkimuksessa havaittiin, että hilsekerros kappaleen sivulla hidastaa leikkauksen aloitusta hieman, kun haetaan maksimaalisia leikkausnopeuksia. Hieman alemmilla hyvään leikkauspinnan laatuun tähtäävillä leikkausnopeuksilla aloituspinnan hilsekerroksella ei ole juurikaan merkitystä. Yläpinnan hilsekerroksen paksuuden ylittäessä 2 mm joudutaan leikkausnopeutta pienentämään. Lisäksi tutkittiin halkeamien vaikutusta leikkaukseen ja havaittiin, että kohtisuorassa leikkausrailoon nähden olevat alle 3 mm leveät halkeamat eivät vaikuta leikkauksen kulkuun millään tavalla. Lisäksi halkeamat näkyvät selvästi leikkauspinnalta.

Kiernanin ja Sohnin (1947, s. 310) tutkimuksessa havaittiin, että kasvatettaessa leikkausnopeutta, löytyy tietty nopeus, jossa leikkausrailo alkaa muuttua suorasta alaspäin laajenevaksi. Nostettaessa nopeutta edelleen erottuu leikkauspinnasta selvä raja, josta alaspäin laajeneminen tapahtuu. Rajan yläpuolella leikkauspinta on normaalin tasainen, mutta rajan alapuolinen pinta voi olla aaltomainen ja kuoppainen. Tämän rajan etäisyys kappaleen yläpinnasta riippuu leikkausnopeudesta ja leikkaushapen virtausmäärästä. Etäisyys yläpintaan pienenee, kun leikkausnopeus tai leikkaushapen virtausmäärä kasvaa. Leikattavalla ainepaksuudella ei ole vaikutusta rajan etäisyyteen.

3.2 Käytettävät kaasut

Nykyään eniten käytetyt polttokaasut kuuman teräksen polttoleikkauksessa ovat hitaasti palavia eli maakaasu, propaani tai koksaamokaasu (coke-oven gas). Asetyleeniä käytetään yleensä vain silloin, kun muita kaasuja ei ole saatavissa. Hitaasti palavilta kaasuilta vaaditaan yleensä 1,5–2 baarin painetta. (Pfeuffer 1970, s. 178.)

Hapen puhtausasteen olisi hyvä olla vähintään 99,5 %. Paineeksi riittää yleensä 10–20 bar. Hapen kulutus kokonaisuudessaan poltinta kohden, kun leikataan korkeintaan 300 mm paksua yleisimmin tuotettavaa tyyppiä olevaa bloomia, on noin 50–70 Nm^3/h. (Pfeuffer 1970, s. 182.)

3.3 Laitteisto

Yleisimpien käyttökohteiden luonteesta johtuen valtaosa kuuman teräksen polttoleikkauksesta suoritetaan mekanisoidusti. Käsinleikkaukseen tarkoitettuja laitteistoja käytetään yleensä vain häiriötilanteissa.

3.3.1 Suuttimet ja polttimet

Nykyiset huipputehoiset suuttimet käyttävät samoja paine-asetuksia riippumatta leikattavan metallin lämpötilasta, ainepaksuudesta ja seostuksesta. Ainostaan leikkausnopeus vaihtelee niiden mukaisesti. (Pfeuffer 1968, s. 211.)

Suuresta lämpökuormituksesta johtuen suuttimet toimivat sekoitussuutinperiaatteella. Näin polttimessa ei ole kuumennuskaasuseosta, joka voisi polttimen kuumetessa räjähtää. Yhdestä kappaleesta valmistetut suuttimet johtavat hyvin lämpöä. Nykyään suurin osa suuttimista on varsinaisia sekoitussuuttimia, koska niillä saadaan aikaan kaikkein suurin lämpövirrantiheys ja siten nopein leikkauksen aloitus. Jälkisekoitussuuttimilla puolestaan päästään sileämpään leikkauspintaan ilman merkittävää yläsärmän sulamista. Sekoitus- ja jälkisekoitussuuttimien yhdistelmässä molempien tyyppien hyvät puolet pyritään yhdistämään optimaalisella tavalla. (Möller & Jäger 1986, s. 124; Framag 2008, s. 94.) Leikkaushappikanavan muoto voi olla yksinkertainen kartiomaiseksi laajeneva tai tiimalasia muistuttava ensin suppeneva ja sitten laajeneva (Rickfält & Brodén 1995, s. 242). Samoilla suuttimilla pystytään yleensä käyttämään maakaasua, propaania ja koksauskaasua, mutta asetyleeni vaatii omat suuttimensa (Pfeuffer 1968, s. 217).

Kuuman teräksen polttoleikkaukseen tarkoitetuilla suuttimilla käytetään huomattavan suurta 100–150 mm:n suutinetäisyyttä (Möller & Jäger 1986, s. 124). Sillä on suuri vaikutus suutinten kestävyyteen, koska kauempana suutin ei ole yhtä altis sulan teräksen ja rautaoksidin roiskeille sekä lämpenee vähemmän (Rickfält & Brodén 1995, s. 242; Framag 2008, s. 95).

Nykyisillä suuttimilla päästään huomattavan kapeisiin 6–7 mm railonleveyksiin ja melko paksuilla materiaaleillakaan railonleveys ei ole yli 10 mm. Leikkausrailon aiheuttama materiaalihukka on merkittävä taloudellinen tekijä, ja siksi pyritään koko ajan pienempiin railonleveyksiin. (Möller & Jäger 1986, s. 124.) Leikkausrailon leveys riippuu ainepaksuudesta, leikkausnopeudesta, leikattavan kappaleen lämpötilasta ja leikkaushapen paineesta (Pfeuffer 1970, s. 179).

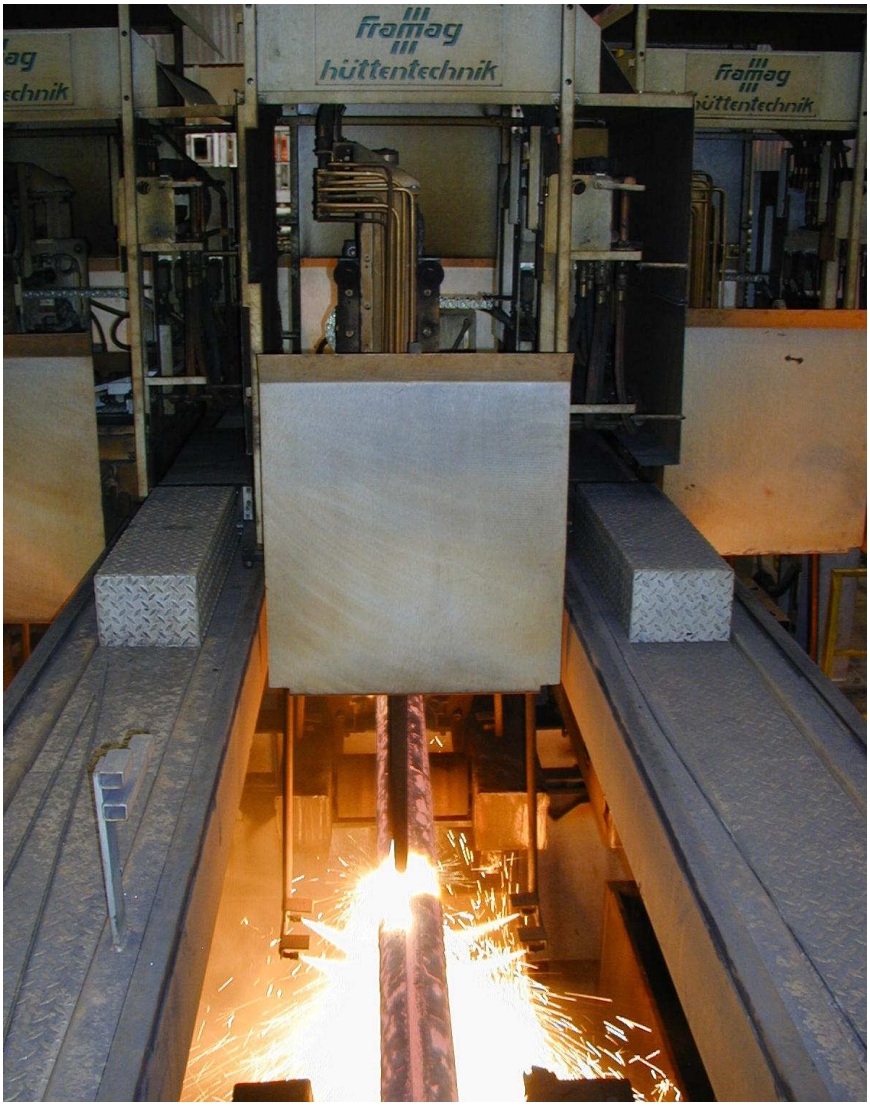
Polttimet ovat yleensä vesijäähdytteisiä. Niissä on erilliset liitännät leikkaushapelle ja kuumennushapelle. Suuttimet kiinnitetään polttimeen joko suoraan suuttimessa olevien kierteiden avulla tai erillisellä kiinnitysmutterilla. Liitteessä II on esitetty erään kuuman teräksen leikkaukseen tarkoitetun polttimen rakenne. (Pfeuffer 1968, s. 213; Möller & Jäger 1986, s. 124.)

3.3.2 Polttoleikkauskoneet

Polttoleikkauskoneiden rakenne riippuu leikattavan tuotteen koosta. Koneet jakautuvat karkeasti kolmeen ryhmään (Pfeuffer 1970, s. 182; Möller & Jäger 1986, s. 124):

1) Alle 600 mm leveiden teelmien, bloomien ja säläbien katkaisuun tarkoitetut koneet, joissa on yksi poltin.
2) Yli 600 mm leveiden säläbien katkaisuun tarkoitetut koneet, joissa on kaksi poltinta.
3) Säläbien pitkittäiseen halkaisuun tarkoitetut koneet.

Tapauksessa 1 polttimen liike voi olla vaakasuoraa tai poltin voi liikkua yläpäästään kiinnitetyn heilurin tavoin. Kuvassa 12 on esitetty teelmän polttoleikkaukseen tarkoitettu kone, jossa poltin liikkuu vaakasuoraan. Tapauksessa 2 polttimet liikkuvat vaakasuoraan.



Kuva 12. Pyöreän teelmän polttoleikkaus (Framag).

Jatkuvavalun yhteydessä tapahtuva katkaisu polttoleikkaamalla edellyttää polttoleikkauskoneen liikkeen synkronoimista valunopeuteen. Siihen on olemassa useita eri tapoja. Yleisimmät ovat tarraimien puristaminen joko päälle tai sivuille, koko polttoleikkauskoneen laskeminen leikattavan tuotteen päälle, tai sitten leikattava tuote kulkee leveän ketjun päältä pyörittäen sitä, mikä puolestaan liikuttaa polttoleikkauskonetta. Säläbien halkaisuun tarkoitetut koneet sijoitetaan yleensä erilliselle halkaisulinjalle. Kuvassa 13 on esitetty erillisellä linjalla toimiva säläbin halkaisuun tarkoitettu polttoleikkauskone. (Pfeuffer 1968, s. 214; Möller & Jäger 1986, s. 124; Lotz 1995, s. 52.)

Kuva 13. Säbin halkaisu polttoleikkaamalla (Framag).

3.3.3 Leikkaustapahtuma

Kaikkein kriittisin kohta leikkauksessa on aloitus. Usein tavoitteena on, että leikkaus voidaan aloittaa suoraan liikkuvalla polttimella ilman, että sitä täytyy pysäyttää reunan kuumentamiseksi. Jotta se onnistuisi luotettavasti, leikkausnopeutta voi joutua pienentämään noin 50 % leikkauksen aloituksessa. Aloituksen varmistamiseksi voidaan aloituksessa käyttää apuna rautajauhesyöttöä tai langansyöttöä. Rautajauhetta puhalletaan erillisen suuttimen kautta paineilman tai typen mukana leikkausrailoon, jolloin se palaa ja syttymislämpötila saavutetaan nopeammin. Langansyöttöä käytettäessä kuumennusliekin etuosaan syötetään ohutta teräslankaa, joka sulaa ja kulkeutuu leikattavalle pinnalle. Silloin se palaa ja syntynyt lämpö auttaa nostamaan kappaleen pinnan syttymislämpötilaansa. (Pfeuffer 1968, s. 214; Möller & Jäger 1986, s. 124.)

3.3.4 Laitteistovalmistajat

Seuraava lista kuuman teräksen polttoleikkaukseen tarkoitettujen laitteistojen valmistajista ei ole täydellinen. Se sisältää muutamia suurimpia valmistajia, joihin olen itse törmännyt tämän työn aikana. Listasta on jätetty pois muutamia valmistajia, joiden valikoimiin kuuluu pelkästään suuttimia ja polttimia.

GeGa on yksi johtavista terästeollisuudelle tarkoitettujen erikoisvalmisteisten polttoleikkaus-, kaasuhöyläys ja purseenpoistolaitteistojen valmistajista. Pääkonttori sijaitsee Saksassa. (GeGa 2009.)

Framag valmistaa polttoleikkauslaitteistoja teelmille, bloomeille, säläbeille, takeille ja romulle, sekä kaasuhöyläyslaitteistoja. Pääkonttori sijaitsee Itävallassa. (Framag 2005.)

A.L.B.A. valmistaa polttoleikkauslaitteistoja teelmille, bloomeille, säläbeille ja romulle, purseenpoistolaitteistoja, kaasukeskuksia sekä polttoleikkaukseen liittyviä tarvikkeita. Pääkonttori sijaitsee Italiassa. (A.L.B.A. 2009.)

CCR Technologies valmistaa polttoleikkauslaitteistoja teelmille ja bloomeille. Pääkonttori sijaitsee Kanadassa. (CCR Technologies 2009.)

3.4 Leikatun pinnan laadun erityispiirteet

Useissa sovelluskohteissa leikkauspinnan laadulla ei ole kovin suurta merkitystä (Kiernan & Sohn 1947, s. 302). Jatkuvavalun yhteydessä tapahtuvassa polttoleikkauksessa kiinnitetään kuitenkin erityistä huomiota leikkauksen alasärmään muodostuvaan partaan. Jos sitä muodostuu, eikä sitä poisteta, niin se häiritsee tulevaa käsittelyä ja huonontaa valssattujen tuotteiden laatua. (Lotz 1995, s.53.) Parta voidaan jakaa seuraaviin luokkiin (Deica & Lotz 2004, s. 29):

1) Erittäin pieni parta, jossa on vähemmän kuin 10 % metallista rautaa ja on helppo irrottaa raapimalla kovalla esineellä.
2) Pieni parta, jossa on suhteellisen suuri osuus metallista rautaa ja joka on kiinnittynyt tiukasti senkin jälkeen, kun hauras osa on poistettu.
3) Suuri parta, joka ei ole sulanut kiinni materiaaliin ja sisältää suhteellisen suuren osuuden metallista rautaa.

4) Suuri parta, joka on sulanut kiinni materiaaliin ja sisältää suhteellisen suuren osuuden metallista rautaa.

Oikein säädetty laitteisto ei tuota partaa lähes ollenkaan, mutta jos niin tapahtuu, niin parran poistamiseen kannattaa käyttää erillistä purseenpoistolaitetta.

3.5 Tämänhetkiset parhaat menetelmät kuuman teräksen polttoleikkaukselle

Seuraavat menetelmät ovat tällä hetkellä todennäköisesti nopeimmat mahdolliset kuuman teräksen polttoleikkaukseen.

3.5.1 HOBS

HOBS on GeGan kehittämä korkeapaineista happea käyttävä polttoleikkausjärjestelmä. Leikkaushapen paine on 30 baarin luokkaa, mikä on kaksinkertainen verrattuna normaalijärjestelmän paineeseen. Leikkaushapen paine suuttimessa on noin 27 bar. Tällä tavalla saavutetaan noin 40–50 % suurempi leikkausnopeus verrattuna normaaliin järjestelmään. (Deica & Lotz 2004, s. 29.)

HOBS vaatii sille erityisesti suunnitellut suuttimet, polttimet ja hapenjakelujärjestelmän. Riittävä hapen paine saadaan yleensä suoraan hapen tuotantolaitokselta, nestemäisen hapen tankista höyrystimen kautta tai nostamalla painetta pumpun avulla. Polttokaasuiksi soveltuvat propaani tai maakaasu. (Deica & Lotz 2004, s. 29.)

Taulukossa 3 on esitetty esimerkkinä vertailu GeGan normaalijärjestelmän suuttimesta SDS 26 F ja HOBS-järjestelmän suuttimesta HOT 30 S, kun leikattava ainepaksuus on 150 mm ja lämpötila 900 °C. Huomataan, että HOBS säästää kaasukuluissa leikattua matkaa kohden 14–23 % riippuen polttokaasusta. (GeGa 2005.)

Taulukko 3. SDS 26 F ja HOT 30 S suutinten vertailu.

Suutin	SDS 26 F	HOT 30 S
Leikkausnopeus [mm/min]	550	825
Leikkaushapen paine [bar]	15	30,5
Leikkaushapen kulutus [Nm³/h]	55	85
Kuumennushapen paine [bar]	2,5	3,2
Kuumennushapen kulutus [Nm³/h]	24	26
Maakaasun paine [bar]	1,5	1,5
Maakaasun kulutus [Nm³/h]	32	28
Propaanin paine [bar]	0,8	0,8
Propaanin kulutus [Nm³/h]	14	16
Kaasukustannukset maakaasulla [€/m]	5,70	4,38
Kaasukustannukset propaanilla [€/m]	5,24	4,51

3.5.2 LOXJET

LOXJET on kuuman teräksen polttoleikkaukseen tarkoitettu menetelmä, joka käyttää nestemäistä leikkaushappea normaalin kaasumaisen sijasta. Happi muuttuu nesteeksi normaalipaineessa lämpötilassa –183 °C, jolloin se on yli 700 kertaa tiheämpää kuin kaasumaisena. Tämä mahdollistaa huomattavasti suuremman happimäärän tuonnin leikkausrailoon normaalia pienemmässäkin suihkussa. Kun nestemäisen hapen paine nostetaan leikkauksessa käytettyyn noin 400 baariin, suihku saavuttaa suuren nopeuden ja liike-energian. Sen avulla oksidikerros säilyy ohuempana kuin normaalilla leikkaushappisuihkulla, ja siten saavutetaan keskimäärin nelinkertainen leikkausnopeus verrattuna normaaliin polttoleikkaukseen. (Grohmann 1996, s. 277.)

Kuumennus- ja leikkaussuutin on erotettu toisistaan siten, että edellä kulkee kuumennussuutin, joka kuumentaa pinnan syttymislämpötilaansa, ja taaempana tulee leikkaussuutin, josta tulee ainoastaan nestemäisen hapen muodostama leikkaussuihku. Leikkauspää koostuu useasta sisäkkäisestä putkesta. Sisimmässä putkessa kulkee nestemäinen happi leikkaussuuttimeen. Jäähdytykseen tarkoitettu nestemäinen typpi virtaa seuraavan ulomman putken muodostamassa tilassa. Näiden putkien ympärillä on tyhjiöeristys ja vielä sen päällä on vesijäähdytetty kuori. Nestemäinen happi johdetaan

tankista tehtaaseen tyhjiöeristetyn putkiston kautta. Siellä se kulkee jäähdyttimen läpi, jossa se jäähdytetään nestemäisellä typellä ja sen jälkeen sen paine nostetaan pumpulla halutulle tasolle. Sitten se johdetaan leikkauspäähän ja suuttimeen. (Grohmann 1996, s. 278.)

Samoin kuin tavallisessa kuuman teräksen polttoleikkauksessa, myös LOXJET:ssä leikkausnopeuteen vaikuttavat leikattavan materiaalin lämpötila, paksuus ja seostus. Näiden tekijöiden vaikutus on samanlainen, kuin tavallisessa polttoleikkauksessa. Kaikilla paksuusalueilla LOXJET:llä saavutettava leikkausnopeus on noin nelinkertainen verrattuna normaaliin polttoleikkaukseen. Yleensä käytetty leikkaushapen paine on 400 bar ja leikkaushappikanavan halkaisija on 1,2 mm. Leikkausnopeutta voidaan nostaa kasvattamalla painetta ja suurentamalla leikkaushappikanavan halkaisijaa. (Grohmann 1996, s. 280.)

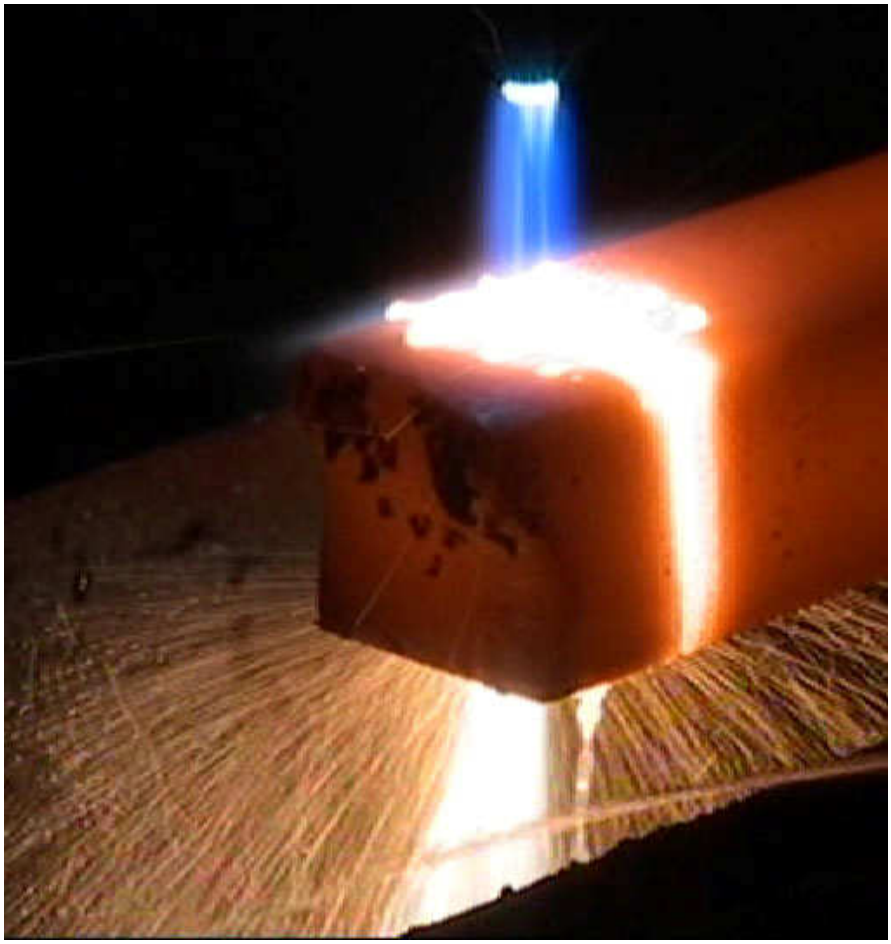
Jos leikataan esimerkiksi 210 mm paksua niukkahiilistä terästä, jonka lämpötila on 750 °C, niin leikkaushapen virtauma on noin 700 Nm^3/h eli 5–8 Nm^3 leikattua metriä kohden riippuen leikkausnopeudesta. Jäähdytykseen tarvittavan typen määrä on noin 30 % hapen määrästä. Nestemäisen typen hinta on likimain sama kuin nestemäisen hapen. Tavallisella polttoleikkauksella leikkaushapen kulutus vastaavassa tapauksessa on noin 2–5 Nm^3/m. LOXJET kuluttaa siis keskimäärin kaksinkertaisen määrän happea. Suuremmat kaasukulut kuitenkin kompensoituvat, koska suurempi leikkausnopeus lisää tuottavuutta. Lisäksi LOXJET tuottaa noin 2–3 mm kapeamman leikkausrailon, kuin tavallinen polttoleikkaus, mikä tarkoittaa huomattavaa materiaalin säästöä. Vasta leikkausnopeuden saavuttaessa 1700 mm/min, materiaalin säästö ei yksinään riitä kompensoimaan lisääntyneitä kustannuksia. (Grohmann 1996, s. 280.)

4 CASE OVAKO TAALINTEHDAS

Ovakon Taalintehtaalla valmistetaan lankaa valssaamalla 7,2 m pitkistä terästeelmistä päättymättömän valssausjärjestelmän (Endless Bar Rolling System, EBROS) avulla. EBROS-järjestelmässä teelmät liitetään yhteen leimuhitsaamalla, jonka esivalmisteluihin kuuluu teelmien päiden polttoleikkaus. (Räsänen 2008, s. 4.) Teräslaadut vaihtelevat matalahiilisistä SG1-S3 lajeista korkeahiilisiin noin 0,8 % hiiltä sisältäviin, lisäksi käytetään tavallista rakenneterästä, super soft –teräksiä, kettinkiterästä ja monia muita (Räsänen 2009).

Valssausprosessi alkaa uunista, jossa valssattavat teelmät kuumennetaan yli 1000 °C lämpötilaan. Uunista teelmä kulkee viiden esivalssauspiston jälkeen polttoleikkaukseen ja edelleen EBROS-laitteistoon. Esivalssauksen jälkeen teelmän koko on noin 115x115 mm ja lämpötila vielä noin 980 °C. Leimuhitsauksen onnistumisen kannalta olisi hyvä, että polttoleikatut pinnat olisivat melko tasaisia. Jos polttoleikkaus aiheuttaa liian suurta epätasaisuutta ja laaksoja teelmien päihin, hitsattaessa koko poikkipinta-ala ei leimutu yhtäläisesti ja liitokseen voi jäädä tyssäyksen jälkeenkin vielä sulkeumia ja epäpuhtauksia. (Räsänen 2008, s. 4–10.)

Polttoleikkauslaitteiston valmistaja on GeGa. Polttokaasuna käytetään asetyleeniä ja suutin on myös GeGan mallistosta. Ennen leikkauksen aloitusta teelmä tulee rataa pitkin leikkauspisteeseen, jossa on etupäässä stoppari, joka paikoittaa teelmän pituussuunnassa ja sen jälkeen sivusuuntainen stoppari liikuttaa teelmän sivusuunnassa oikeaan kohtaan. Tämän jälkeen poltin on halutussa asemassa, jolloin leikkaushappi kytketään päälle ja leikkaus suoritetaan suoraa rataa yli 900 mm/min nopeudella. Leikkaustapahtuma on esitetty kuvassa 14. (Räsänen 2009.)



Kuva 14. Teelmän pään polttoleikkaus.

5 CASE OVAKO IMATRA

Ovakon Imatran terästehtaalla kuuman teräksen polttoleikkaus on osa teräksen jatkuvavalulinjaa. Jatkuvavalulinjan rakenne on esitetty liitteessä I. Jatkuvavalukone on kaksilinjainen, ja sen tuottama bloomi on 370 mm leveää ja 310 mm korkeaa. Kokillissa pinnaltaan jähmettynet bloomi valuu ensin 15 metrin kaaressa vaakatasoon, jossa se sitten oikaistaan kolmipisteoikaisuna. Oikaisulaitteen jälkeen on polttoleikkauskone, jossa bloomit katkaistaan 3,6 - 6,0 metrin mittaisiksi riippuen valmistettavasta tuotteesta. Polttoleikkauskoneen kohdalla bloomin pintalämpötila on noin 850 °C ja sisälämpötila noin 1200 °C riippuen valunopeudesta. Valunopeus on normaalisti noin 0,62 m/min. (Johansson 2009)

Valmistettavien terästen hiilipitoisuudet vaihtelevat Imacron 0,03 prosentista laakeriterästen 1 prosenttiin. Tehtaalla valmistetaan myös nuorrutusteräksiä, rakenneteräksiä, hiiletysteräksiä, jousiteräksiä ja monia muita, mutta ei kuitenkaan

työkaluteräksiä tai ruostumattomia teräksiä. Vuosittainen valmistus on noin 250 000 tonnia terästä, joka on noin 60 000 bloomia. (Johansson 2009)

Polttoleikkauskoneen on valmistanut GeGa ja se on asennettu paikoilleen vuonna 1988. Kone liikkuu kiskoilla bloomien päällä ja leikkauskohdan tullessa se painaa bloomin päälle tarraimen, jolla kone saadaan liikkumaan samalla nopeudella bloomin kanssa. Leikkauksen jälkeen kone palautuu omalla moottorilla kotiasemaan odottamaan seuraavaa leikkausta. Leikkauskohta varmistetaan mittapyörän avulla, joka juoksee vasten bloomin kylkeä. (Johansson 2009)

Ennen leikkauksen alkua kaasuvirtaukset kytketään päälle, jolloin pilottipoltin sytyttää varsinaisen liekin. Polttimen leikatessa bloomia se kulkee kaarevaa rataa korkeussuunnassa ollen lähimpänä aloituksessa, ja sen jälkeen nousee varsinaiseen käyttöetäisyyteen. Tarkoituksena on varmistaa leikkauksen aloituksen onnistuminen. Leikkausnopeus vaihtelee teräksen mukaan välillä 300 - 320 mm/min. Suuttimena on käytössä A.L.B.A:n AOG 500 DR. Polttokaasuna on maakaasu, jota saadaan kaasuverkosta. Maakaasun paine on 1,5–2 bar, kuumennushapen 2,5–3,2 bar ja leikkaushapen 11–14 bar. Hapen kokonaiskulutus on korkeintaan 72 Nm^3/h ja maakaasun 28 Nm^3/h. Happi saadaan putkistoa pitkin viereiseltä AGAn tuotantolaitokselta. (Johansson 2009)

6 YHTEENVETO

Yleensä terästä leikataan korotetuissa lämpötiloissa, kun halutaan estää leikkauksen aiheuttamaa karkenemista. Siihen tarkoitukseen käytetyt lämpötilat ovat kuitenkin usein huomattavasti alle 600 °C. Yleisimmät prosessit, joissa joudutaan polttoleikkaamaan yli 600 asteista terästä, ovat teräksen jatkuvavalu ja kuumavalssaus.

Leikattavan teräksen lämpötilalla on huomattava vaikutus leikkausnopeuteen. Riippuen lämpötilasta ja ainevahvuudesta, voidaan leikkausnopeus parhaimmillaan moninkertaistaa. Erityisesti kuuman teräksen polttoleikkaukseen tarkoitetuilla laitteistoilla saavutetaan etua leikkausnopeudessa viimeistään, kun lämpötila ylittää 600 °C.

Kuuman teräksen polttoleikkauksessa käytetyt suuttimet ovat sekoitussuuttimia. Ne kestävät hyvin lämpörasitusta. Kestävyyden takaamiseksi suutinetäisyys on noin 100–150 mm. Myös polttimet suunnitellaan kestämään korkeita lämpötiloja ja ne ovatkin yleensä vesijäähdytteisiä.

Yleisimmät polttokaasut ovat hitaasti palavia eli maakaasu, propaani ja koksauskaasu. Niiden paine on yleensä 1,5–2 bar. Samat suuttimet soveltuvat normaalisti kaikille kolmelle kaasulle. Leikkaushapen paine on yleensä 10–20 bar.

Useimmissa käyttökohteissa leikkauspinnan laadulla ei ole kovinkaan suurta merkitystä. Jatkuvavalun yhteydessä tapahtuvassa polttoleikkauksessa kiinnitetään kuitenkin erityistä huomiota leikkauksen alasärmään muodostuvaan partaan. Jos sitä muodostuu, eikä sitä poisteta, niin se häiritsee tulevaa käsittelyä ja huonontaa valssattujen tuotteiden laatua. Oikein säädetty laitteisto ei tuota partaa lähes ollenkaan.

Tällä hetkellä nopeimmat kuuman teräksen polttoleikkausmenetelmät ovat HOBS ja LOXJET. HOBS:lla saavutetaan 40–50 % suuremmat leikkausnopeudet kuin normaalilla järjestelmällä, ja sitä kautta 14–23 % säästö kaasukuluissa. LOXJET:llä saavutetaan nelinkertainen leikkausnopeus verrattuna normaalijärjestelmään.

LÄHTEET

AGA. Nestekaasu [verkkodokumentti]. Viitattu 20.7.2009. Saatavissa: http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/likelgagafi.nsf/docbyalias/nav_products_propane

A.L.B.A. 2009. [A.L.B.A:n www-sivuilla]. Päivitetty toukokuu 2009. [viitattu 28.7.2009]. Saatavissa: http://www.albacut.com/grigio/machine.php?cat=1

Blom, Stig. 1975. Hitsaustekniikka 1: Hitsausmenetelmät. Porvoo: Werner Söderström. 293 s. ISBN 951-0-06648-6.

CCR Technologies. 2009. [CCR Technologies www-sivuilla]. Päivitetty toukokuu 2009. [viitattu 28.7.2009]. Saatavissa: http://www.ccr-technologies.com/product/index.shtml

Deica, Alexander & Lotz, Horst Karl. 2004. High speed cutting and efficient deburring of slabs and blooms. Metallaurgical plant and technology international. Vol 27: nro 4. s. 28–31. ISSN 0935-7254.

Donaghy, Jim. 1995. Choose the gas that's right for the cutting operation. Welding journal, Vol 74: nro 12. s. 55–60. ISSN 0043-2296.

Framag. 2005. [Framagin www-sivuilla]. Päivitetty 1.12.2005. [viitattu 28.7.2009]. Saatavissa: http://www.framag.com/english/industrial_plant_build.htm

Framag. 2008. Training material, SGN torch cutting machine. 122 s. Opetusmateriaalia eräälle asiakkaalle liittyen polttoleikkauskoneeseen.

Gasum. Mitä on maakaasu [verkkodokumentti]. Viitattu 20.7.2009. Saatavissa: http://www.gasum.fi/tietoamaakaasusta/mita_on_maakaasu/Sivut/Etusivu.aspx

GeGa. 2005. Nozzle data [verkkodokumentti]. Julkaistu 2005 [viitattu 20.7.2009]. Saatavissa: http://www.gega.com/us/files/gega_dh_0506.pdf

GeGa. 2009. [GeGa:n www-sivuilla]. Päivitetty huhtikuu 2009. [viitattu 28.7.2009]. Saatavissa: http://www.gega.de/1-1-home.html

Greifzu, M. 1990. Selection of nozzles for flame cutting and gas welding. Svetsaren, nro 2. s. 16-19. ISSN 03468577.

Grohmann, Paul. 1996. High speed flame cutting process. Welding in the world, Vol 37: nro 6. s. 277–282. ISSN 0043-2288.

Johansson, Jarmo. 2009. Diplomi-insinööri; Kunnossapitopäällikkö, Ovako Imatra. Mika Karttusen henkilökohtaiset keskustelut 15.7.2009.

Kiernan, J. F. & Sohn, J.S. 1947. Oxygen cutting of steel at elevated temperatures. The Welding Journal, Vol 26: nro 4. s. 301–313.

Lotz, Horst, Thoma, Gunther ja Norman, Ian. 1979. Latest ideas and developments in the field of flame cutting machinery. Iron and steel engineer, Vol 56: nro 7. s. 43-47. ISSN 0021-1559.

Lotz, Mattias. 1995. New developments in oxy fuel cutting of slabs and billets. Metallaurgical plant and technology international. Vol 18: nro 5. s. 52–54. ISSN 0935-7254.

Lyttle, K. A., Garth Stapon, W. F. ja Guimaraes, A. 1997. Selecting the proper fuel gas for cost-effective oxyfuel cutting. Weldin Journal, Vol 76: nro 7. s. 35–38. ISSN 0043-2296

Metals handbook, Volume 6: Welding, Brazing and Soldering. 1983. Ninth edition. Ohio: American Society for Metals. 1152 s. ISBN 0-87170-007-7.

Möller, Karl H. & Jäger, Albert. 1986. Autogenous cutting in continuous casting plants and in slitting plants. Worl Steel & Metalworking, Vol 7. s. 121–128. ISSN 0724-0791.

Nicolai, Manfred & Graham, A. 1983. Flame cutting in modern industrial production. Welding review, Vol 2: nro 5. s. 297–300. ISSN 0262-642X.

Pfeuffer, Alfred. 1968. The special effects involved with flame-cutting of blooms and the application of this process to continuous casting cutting. Steel international, nro 6. s.211–218.

Pfeuffer, Alfred. 1970. The interaction of the main units in a continuous casting plant, with a particular reference to the flame-cutting equipment. Wire World International, Vol 12: nro 4. s. 178–189. ISSN 0043-6046.

Rickfält, C & Brodén, G. 1995. Oxy-fuel cutting of thick plates. Welding in the world. Vol 35: nro 4. s. 238–242. ISSN 0043-2288.

Räsänen, Anna-Niina. 2008. Booriseosteisen kylmätyssäysteräksen liittäminen leimuhitsaamalla jatkuvan valssauksen yhteydessä [verkkodokumentti]. Lappeenranta: lokakuu 2008 [viitattu 20.7.2009]. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 52 s. Saatavissa: http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe200901141028

Räsänen, Anna-Niina. 2009. Kandityö [yksityiset sähköpostiviestit]. Vastaanottaja: Mika Karttunen. Lähetetty 9.7.2009 ja 17.7.2009.

SFS-EN ISO 9013. 2002. Terminen leikkaus. Termisesti leikattujen pintojen luokittelu. Geometriset tuotemäärittelyt ja laatutoleranssit. Suomen Standardisoimisliitto. 55 s.

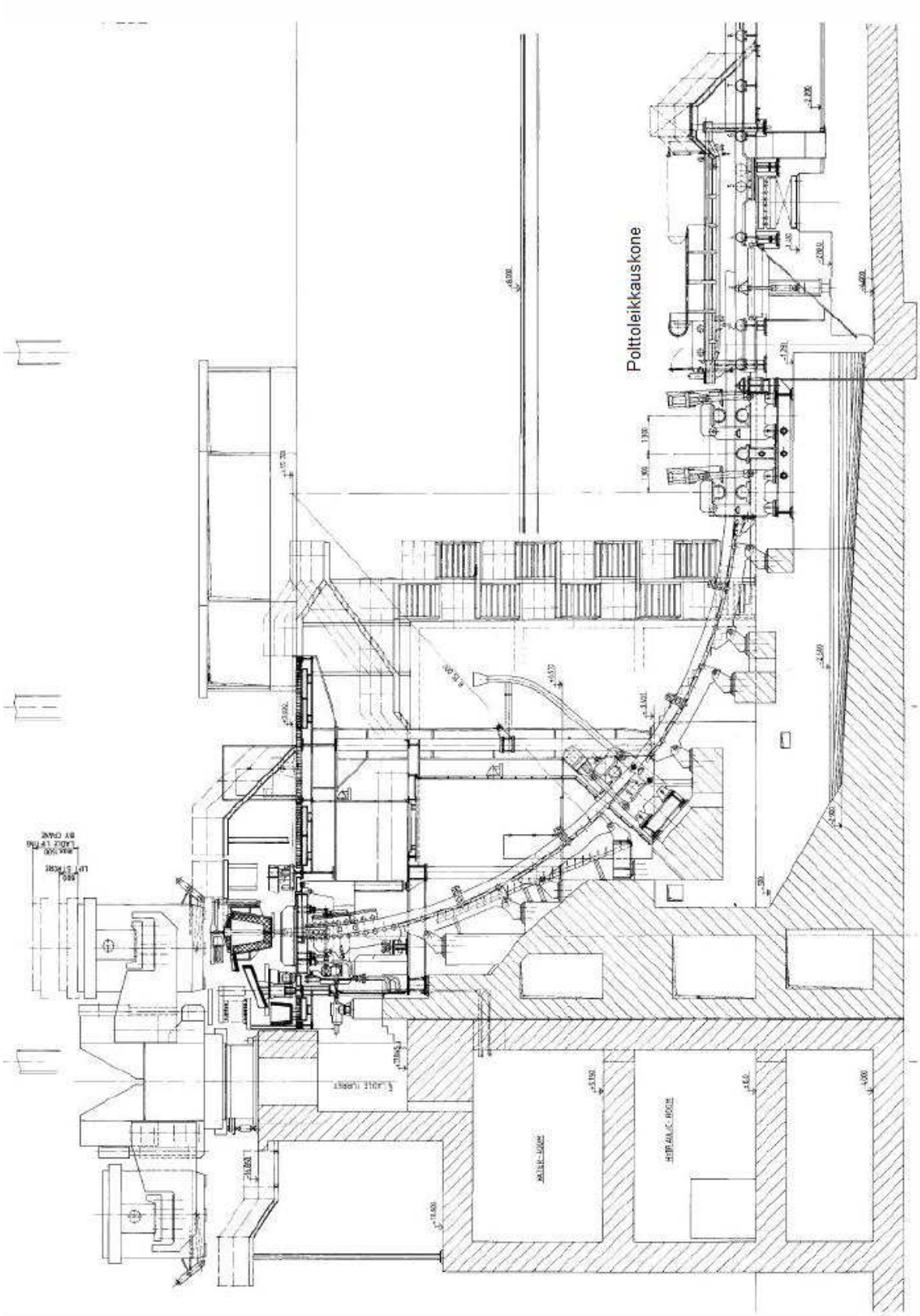
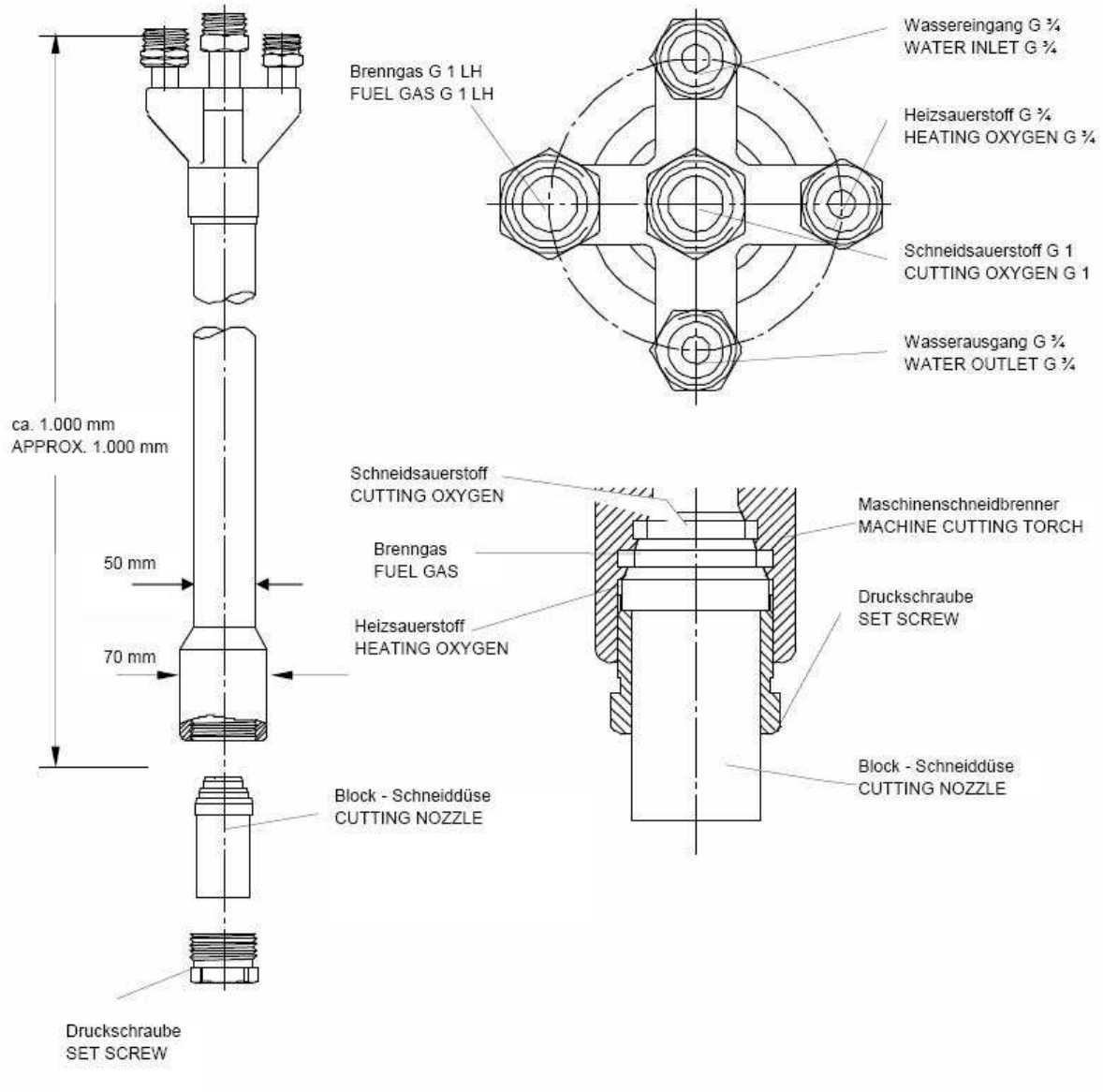
Spektor, O. & Sukhinin, G. K. 1969. The problem of cutting hot metal. Welding production, Vol 16: nro 11. s. 54–56. ISSN: 0043-230X.

Takatulisuoja estää letkuräjähdyksen. 2007. Magasiini, nro 3. s. 3.

Teräslevyjen terminen leikkaus. 1985. Tekninen tiedotus 9/85. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus. 93 s. ISBN 951-817-221-8, ISSN 0357-7368.

Welding handbook Volume 2: Welding Processes, Part 1. 2004. Ninth edition. Miami: American Welding Society. 720 s. ISBN 0-87171-729-8.

Liite I. Ovakon Imatran tehtaan jatkuvavalulinja sivulta kuvattuna.



Liite II. Erään kuuman teräksen polttoleikkaukseen tarkoitetun polttimen rakenne.