

PÕLEVKIVI PÕLETUSTEHNIKAALASTEST UURINGUTEST

Arvo Ots

Tallinna Tehnikaülikool, soojustehnika instituut

Katlatehnika on üks vanimatest aladest, millesse on koondunud paljude teadustulemuste tehnilised ja tehnoloogilised väljundid. Kütuste põletustehnoloogia ja katlakonstruktsioonid on läbi käinud pika teekonna, et jõuda kaasaja tasemele. Katlatehnika kiire areng toimub ka tänapäeval ja ei ole kahtlust, et see jätkub samuti nii lähiajal kui ka kaugemas tulevikus.

Märgatava tõuke põletusseadmete arengusse, alates möödunud sajandi algaastatest, andis ulatuslik elektrikasutuselevõtt ja sellega seotud fossiilseid kütuseid põletavate elektrijaamade ehitamine. Soojusjõuseadme asukoht ei olnud seotud enam kindla tehase või vabrikuga. See lõi võimalused kontsentreeritud võimsustega soojusjõuseadmete tekkeks ning esines vajadus suurevõimsuseliste aurukatelde järele.

Põlevkivi kuulub sapropeelkütuste kategooriasse, mistõttu tema omadused erinevad järsult kivisöe kui huumusrea kütusest. Põlevkivi iseloomustab eelkõige suur mineraalosa sisaldus ning selle ja orgaanilise aine ülimalt keerukas koostis ja struktuur. See on olnud põhjuseks, miks kivisöe jt kütuste põletustehnoloogiad ei ole põlevkivi puhul otseselt rakendatavad.

Põlevkivi kaevandamise esmaeesmärgiks oli vajadus energeetilise toorme järele. Aastateni 1920–1925 oli Eestis esikohal puit, mis kattis enam kui 90 % kütuse vajadusest. Teisel kohal oli sisseveetav kivisüsi.

Esialgu kasutati põlevkivi veduritel. Üha enam hakkas põlevkivi põletamine levima ka tööstuskateldes. Enamasti oli kasutusel tolle aja standardile vastav 40 mm tüki suurusega põlevkivi.

Esimeseks põlevkivi kui energeetilise kütuse suurimaks tarbijaks möödunud sajandi 20ndatel aastatel oli Kunda tsemenditehas. Põlevkivi on eriti sobivaks kütuseks tsemendiklinkri põletamiseks pöördahjus, kuna selle mineraalosa koostis on väga lähedane tsemendiklinkri lähtematerjalile. Kunda tsemenditehases töötavad pöördahjud viidi 1921 täielikult üle põlevkiviküttele.

Tähtsaks etapiks põlevkivienergeetika valdkonnas oli Tallinna Soojuselektrijaama üleviimine 1924 põlevkiviküttele. Seda aastat tuleb lugeda põlevkivienergeetika algaastaks (elektrienergia genereerimise tähenduses). Tallinna Soojuselektrijaama võimsuseks 1933 oli 22 MW.

Lisaks Tallinna elektrijaamale ehitati Põhja-Eestisse veel mitmed põlevkivi põletavad elektrijaamad: Püssi (3,7 MW), Kohtla (3,7 MW), Kunda (2,3 MW) ja Kiviõli (0,8 MW). Sõjajärgne põlevkivi kasutatavate elektrijaamade koguvõimsus oli 32,5 MW.

Tolleaegsetes elektrijaamades põletati nn peent ehk kolmanda sordi põlevkivi tüki suurusega kuni 25 mm. Väljasorteeritud suuretükiline põlevkivi oli kasutusel peamiselt üttetehastes. Aurukatelde aurutootlikkus küündis 35 t/h, aururõhuks oli 3–4 MPa ja temperatuur 400–450 °C. Põlevkivi põletamiseks kasutati selleks otstarbeks väljatöötatud ja õnnestunud konstruktsiooniga töökindlaid Krull-Lomšakov ja Franz-Krull tüüpi liikuvlülidega kaldreoste.

Põlevkivi kui suure lendosade sisaldusega kütuse restil põletamise põhiprobleemiks kujunes nn tahmavaba põlemine. Küsimus lahendati küllaltki edukalt koldekambri sobiva kuju ja sekundaarõhu koldeesse andmise süsteemiga.

Põlevkivi põletamise märgatav areng restilpõletusele tuginevalt toimus kuni möödunud sajandi 60ndate aastateni. See põletustehnoloogia oli saavutanud oma lae ning sai piiravaks teguriks energiaploki võimsuse suurendamisel. Põlevkivi kasutamisel tuli üle minna uudele tolmpõletustehnoloogiale.

Esimesed katsed põlevkivi tolmpõletamise rakendamiseks tehti juba möödunud sajandi esimesel veerandil Eesti Raudtee veduritel ning ka Tallinna Soojuselektrijaamas. Need katsetused osutusid edukateks katlatorude tuhasadestistega kiire kattumise ja ummistumise tõttu.

Esimeseks tolmpõlevkivi põletavateks elektrijaamadeks olid 1949 käiku antud Kohtla-Järve elektrijaam ja 1951 käivitatud elektrijaam Ahtmes. Kateldena

kasutati nendes kivi- ja pruunsöe põletamiseks ettenähtud süvikveskitega keskrõhu katlaid.

Tolmpõlevkivi kütteil töötavate keskrõhu katelde eksploatatsioonikogemused näitasid, et nad on kiirgus- ja konvektiivpindade intensiivse tuhasadestistega kattumise ja ökonomaiseripindade kiire korrosioon-abrasiivse kulumise tõttu suutelised töötama projekteeritust vaid osalise koormusega. Kohtuti esimest korda katla küttepindade saastumise, kõrgtemperatuurse korrosiooni, kulumise, tuhasadestistest puhastamise ja soojusülekande probleemidega. Sai selgeks, et kivi- ja pruunsöe põletamiseks ette nähtud katlad ei ole suutelised rahuldavalt töötama põlevkivil kui keeruka mineraal- ja orgaanilise osaga kütusel. Probleemide lahendamine käis elektrijaamadele ülejõu. Mõõdapääsmatuks muutus põlevkivi põletamisega seonduvate uurimistöde käivitamine. Selleks loodi TPI soojusenergeetika kaatedri (praegune TTÜ soojustehnika instituut) juurde uurimisgrupp ning mõni aeg hiljem tööstusliku soojusenergeetika teadusliku uurimise laboratoorium.

Intensiivse uurimistöö tulemuste alusel rekonstrueeriti keskrõhuseadmed, töötati välja põlevkivi omadustele vastavad katlakonstruktsioonid ja selleks vajalikud projekteerimise ning arvutusmeetodid. Koostöös Taganrogi Katlatehasega projekteeriti originaalkonstruktsiooniga põlevkivi tolmküttekattlad nii Balti- kui ka Eesti Elektriijaamade tarvis.

Põlevkivienergeetika uueks arenguetapiks tuleb lugeda aastat 1959, mil anti käiku põlevkivi tolmkütteil töötavad kõrgrõhuagregaadid Balti Elektriijaamas. Esimene agregaat käivitati Eesti Elektriijaamas 1969.

Tahkekütuste põletustehnoloogia tehnilise arengu loomulikuks jätkuks on üleminek tolmpõletuselt keevkihtpõletustehnikale. Viimastel aastatel on TTÜ STI osalenud koostöös Eesti Energia ja mitmete välisfirmadega põlevkivi keevkihttehnoloogiaalastes uuringutes. Toetudes keevkihttehnoloogia põhiprintsiipidele, selles valdkonnas läbiviidud uurimustulemustele, tolmpõletusel omandatud põlevkivi põletustehnikale ja TTÜ STI soovitudele, projekteeriti firma Foster Wheeleri poolt praegu ehitusjärgus olevad atmosfäärirõhul tsirkuleeriva keevkihiga katlad Eesti- ja Balti Soojuselektriijaamade energiaplokkidele. Suur perspektiiv on põlevkivi põletamisel ülerõhul keevkihtkolletes. Selle rakendamine võimaldab tunduvalt suurendada energiamuunduse kasutegurit ning järsult vähendada heitmeid keskkonda (eriti süsihappegaasi).

Katla gaasipoolsed protsessid on üksteisele järgnevad ja omavahel tihedalt seotud nähtused. Metodoloogilisest küljest on otstarbekas need jagada kolmeks järgneva osaks. Esiteks, protsessid ruumis, kuhu kuuluvad sellised küsimused nagu põlevkivi orgaanilise osa põlemine, põlemisgaaside koostis, kütuse mineraalosa käitumine koldes ja tuha moodustumine, põletustehnoloogia mõju põlevkivi põlemisel eralduvale soojusele, keskkonda mõjutavate põlemisgaasi komponentide teke ja nende hulga mõjutamise võimalused jne.

Teiseks, ülekande nähtused ruumist pinnale (küttepinnale). Sii kuuluvad sellised protsessid nagu lendtuha sadestiste teke kiirgus- ja konvektiivküttepindadele, leelismetallide ühendite aurude kondenseerumine ja desublimatsioon, kiirgus- ja konvektiivne soojusülekanne põlemisgaasilt küttepinnale jt.

Kolmandaks, küttepinnal toimivad protsessid. Selisteks nähtusteks on lendtuha moodustunud saastakihi sulfatiseerumine vääveloksiidide ja hapniku toimel, tuhasadestiste ja küttepinna metalli vastastikune toime, küttepindade metalli kõrg- ja madalatemperatuurne korrosioon ja kulumine, puhastusjõudude toime sadestiste kihtidele ja metallile jne.

Alljärgnevalt probleemidest, mis avaldavad põlevkivikateldes toimuvatele protsessidele olulisemat mõju ning on põhjalikult uuritud soojustehnika instituudis.

PROTSESSID MINERAALOSAS

Kaasaja käsitluses ei vaadelda põlemist mitte ainult orgaaniliste komponentide hapnikuga ühinemisena, vaid see haarab endasse ka samaaegselt kütuse mineraalosas toimuvat. Kütuse põlemisel mineraalosas esinevatest protsessidest saavad alguse paljud katla gaasipoolsetel toimuvad nähtused.

Olulisteks parameetriteks, millest sõltub kütuse mineraalosas toimuvate protsesside kiirus ja ulatus, on põlemistemperatuur ja keskkonna koostis (eriti hapniku kontsentratsioon). Põlevkivi tolmpõletamisel ulatub temperatuur koldes 1 400–1 500 °C-ni, keevkiht-põletustehnoloogia kasutamisel aga ei ületa tavaliselt 850 °C.

Olulisteks parameetriteks temperatuuri kõrval on ka põlemisgaasi koostis ja rõhk (kütuse ülerõhul põletamine). Protsessid mineraalosas on suuresti määratud komponentide termilise lagunemise ja uusmineeralide moodustumisega tuha tekkeprotsessis.

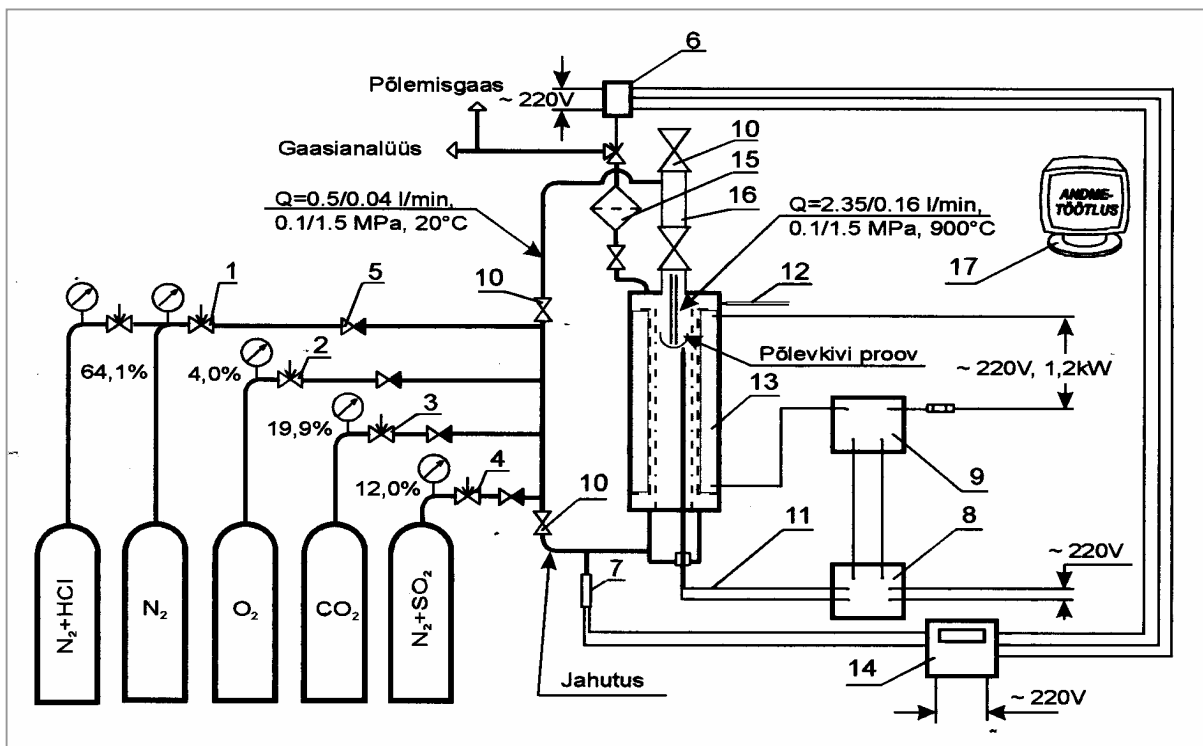
Üheks aktiivseks tuhakomponendiks katla küttepindade saastumise ja vääveldioksiidiga sidumise seisukohalt on põlevkivi põletamisel CaO, kas seotuna teiste mineraalidega või vabal kujul.

Vaba ja seotud CaO suhe sõltub põletustehnoloogiast, ulatudes tolmpõletusel 25–30 %-ni. Atmosfäärirõhul keevkihtpõletusel moodustub tuhas aga seotud kaltsiumi vähe, tehes selle eriti aktiivseks vääveloksiididega ühinemise suhtes.

Põlevkivi mineraalosas sisalduva kaltsiumoksiidi käitumine koldes on sõltuv temperatuuri kõrval ka põlemisgaasis sisalduva süsinikdioksiidi osarõhust. Kui CO₂ osarõhk ületab kaltsiumkarbonaadi termilise dissotsiatsioonirõhu (esineb põlevkivi ülerõhul põletamisel), siis puudub termodünaamiline võima-

lus vaba kaltsiumoksiidi moodustumiseks üldse ning vääveldioksiid ühineb otseselt karbonaadiga.

Põlevkivi kui suure leelismetallide sisaldusega kütuse põletamisel on oluline nende ühendite käitumine põlemise käigus. Leelismetallide aurud, olles keemiliselt suure aktiivsusega, moodustavad koldes küttepindadele kergesti kondenseeruvaid ühendeid. Leelismetallide lenduvus on määratud temperatuuri ja keskkonna koostisega. Need protsessid on olulisemad põlevkivi kõrgtemperatuurisel tolmpõletusel. Ohku saastavate ühendite teke põlevkivi põletamisel on samuti seotud protsessidega mineraalosas. Olulisemaks nendest on vääveldioksiid. Kaltsiumi ja väävli moolsuhe põlevkivis on suur – ligikaudu 8, mis peaks olema küllaldane väävliühendite efektiivseks sidumiseks tuhaga.



Seade põlevkivi mineraalosas toimuvate protsesside uurimiseks. Võimaldab modelleerida ülerõhul toimuvaid protsesse. 1–4 – gaasihulga regulaatorid; 5 – tagasilöögiklapp; 6 – rõhuhoideventiil; 7 – rõhuandur; 8 – temperatuuriregulaator; 9 – rele; 10 – kuulkraanid; 11–12 – termopaarid; 13 – reaktori küttekeha; 14 – rõhuregulaator; 15 – gaasifilter; 16 – lüüs; 17 – andmete salvestus.

Uuringud on näidanud, et põlevkivi tolmpõletuse korral jääb tuhaga sidumata 15–25% väävlit ning seetõttu paisatakse suur hulk väävlit vääveldioksiidina koos põlemisgaasiga õhku. Põhjuseks on madal vaba ja seotud lubja hulkade suhe tuhas. Vastandina sellele on põlevkivi atmosfäärirõhul keevkihtpõletusel vaba kaltsiumoksiidi osatähtsus tuhas suur ning SO₂ seotakse peaaegu täielikult. Samal tasemel seotakse väävel tuhaga ka põlevkivi ülerõhul põletamise tingimustes.

Põlevkivi eripäraks on väike lämmastiku hulk orgaanilises aines. Sellest johtuvalt ei ole lämmastikoksiidide emissioon põlevkivi põletamisel määravaks.

Põlevkivi põletamisel tekkivatest kasvuhoonegaasidest on olulisem süsihappegaas. Tulenevalt põlevkivi koostisest lisandub orgaanilisest süsinikust moodustuvale CO₂-le ka mineraalne süsihappegaas karbonaatsete ühendite lagunemisest. Viimane on sõltuv kütuse põletustehnoloogiast. Mainime, et põlevkivi ülerõhul põletamisel kaltsiumkarbonaadi termilist lagunemist ei toimu, viies seega CO₂ kontsentratsiooni vähenemisele põlemisgaasis.

Teiseks tähtsaks kasvuhoonegaasiks on dilämmastikoksiid, olles probleemiks mitmete kütuste põletamisel keevkihis. Mõõtmised on näidanud, et põlevkivi nii tolmi kui ka keevkihtpõletamisel N₂O kontsentratsioon põlemisgaasis on väike.

KÜTTEPINDADE SAASTUMINE

Aurukatla küttepindade tuhasadestistega kattumine (saastumine) on küllaltki keerukas füüsikalise-keemiliste nähtuste kompleks. Lähtudes põlevkivikateldes toimuvatest protsessidest osutus esmakordselt võimalikuks omavahel seostada aeromehaanika, keemia ja soojusvahetust ühendavad nähtused ning sellele vastavad küttepindade konstruktsioonid.

Küttepindade saastumise uurimisel on kaks eesmärki: (i) saastumise olemuse (mehhanismi) selgitamine ja (ii) küttepindade moodustunud sadestiste mõju soojusülekandele.

Tingituna põlemisgaasi ja katla küttepinna vahelisest soojusvahetusest ei ole temperatuur katla gaasikäigu ulatuses püsiv suurus. Sellest tulenevalt ei ole küttepinna saastumistingimused gaasikäigu erinevates kohtades samad. Nii näiteks kattuvad põlevkivi tolmpõletusel koldekraanid kõrge kiirgusintensiivsusega alas rauarikaste sadestistega, kuid katla ma-

dalatemperatuurilises osas võib kohata keemiliselt sidumata puistesadestisi. Üsna olulist mõju küttepindade saastumisele avaldab ka ajategur. Erineva vanusega sadestised omavad erinevat struktuuri, survetugevust, soojusfüüsikalisi omadusi jne.

Ülekaalus on seotud sadestised. Nende moodustumine saab alguse sadestiste algkihi tekkest, mis aja jooksul läheb üle stabiilseks, ajaliselt vähemuutuvaks sadestiseks. Põlevkivi põletamisel vastavate tingimuste olemasolul on algsadestiste tekkemehhanismis oluline leelismetallide sulfaatide ja kloriidide otsene kondenseerumine soojusvahetuspinna. Põlemisgaasis esinevate leelismetallide sulfaatide ja kloriidide aurude kondenseerumine on paljuski määratud protsesside ulatusega põlevkivi mineraalosas põlemise käigus.

Põlevkivikatla konvektiivküttepindadele moodustuva sadestistekihi kasvukiirusele avaldab otsustavat mõju mitte ainult pinda uhtuva põlemisgaasi kiirus, vaid ka lendtuha teraline koostis. Põlevkivi tolmpõletamisel moodustuva suhteliselt jämeda tuha korral on oluline tuhaosakeste sadestistekihti tugevdav ja kulutav toime, pidurdades niimoodi nende kasvu. Põlevkivi tsirkuleerivas keevkihis põletamisel on separaatorist väljuv tuhk, erinevalt tolmpõletusel moodustuvast tuhast, ülipeenike ning võib põhjustada küttepindade kiire saastumise.

SOOJUSÜLEKANNE

Soojusülekanne intensiivsus katla koldes ja konvektiivpindades on oluliselt sõltuv küttepinda katva tuhasadestise omadustest. Saastumise mõju soojusülekandele väljendub sadestistekihi termilises takistuses ja pinna kiirgusomadustes. Viimase mõju on eriti tähtis soojusülekandele koldes.

Tuhasadestise termiline takistus on sõltuv nende struktuurist (peamiselt poorsusest). Kiirgusomadused (peamiselt kiirgusneeldumistegur) on aga enamasti määratud sadestise keemilis-mineraloogilise koostisega.

Kiirgusülekanne koldes oleneb sadestise termilise takistuse ja kiirgusomaduste kõrval ka ekraanide ääres paikneva termilise piirikihi parameetritest. Selline piirikiht moodustab leegilt ekraanpinna suunalisele soojusvoole täiendava takistuse. Termilise piirikihi takistus soojusvoole ei ole mitte ainult määratud koldekeskkonna kiirgusomadustega, vaid ka koldesisese massiülekandega. Viimane aga sõltub omakorda kolde aerodünaamikat määravatest para-

meetritest (geomeetrilised mõõtmised, põletite paigutus, põlemisgaasi kiiruseväljad, soojuslikud erikoormused jt).

Tingituna nii koldekraanidele kui ka konvektiivpindadele moodustuva seotud sadestiste termilise takistuse ajalisest muutusest on soojusülekanne põlevkivikatla küttepindades oma olemuselt mittestatsionaarne protsess. Soojusülekanne mittestatsionaarsus väljendub küttepinnast või selle osast väljuva põlemisgaasi temperatuuri ajalisest muutusest. Kui küttepindadele tekib kahekihilise struktuuriga sadestis, siis tingituna nende mõlema kihi ajalisest kasvust, esineb kihtide kahekordne mõju mittestatsionaarsele soojusülekannele. Ülisuur mõju soojusülekanne ajalise kulgemise dünaamikale on küttepindade tuhasadestistest puhastamise tsüklilisusel.

KATLATERASTE KÕRGTEMPERATUURNE KORROSION JA KÜTTEPINNA KULUMINE

Katlateraste kõrgtemperatuurse korrosiooni ja kulumise probleem on seotud küttepindade metalli tööea ja lubatud piirtemperatuuriga. Seejuures on oluline tähtsus põlevkivi põlemisel moodustuvate klooriühendite korrosiooni kiirendaval toimel.

Katlateraste kõrgtemperatuurse korrosiooni kiirus sõltub terase koostisest, metalli temperatuurist ja küttepinnale ladestuvate tuhasadestiste omadustest. Oluline on ka ajategur.

Üldreeglina väheneb terase korrosioonikiirus ajaliselt metalli keskkonnast eraldava oksiidikihi paksuse kasvuga. Metall korrosioonikiiruse vähenemine põlevkivi põletamisel ei ole tingitud mitte ainult materjali pinnale moodustuva oksiidikihi difusioonilise takistuse ajalisest kasvust, vaid ka torudele kondenseerunud kloori sisaldavate ühendite üleminekust vääveldioksiidi toimel sulfaatideks. Sulfaatide korrosiooniline toime on aga kloriidide omastunduvalt nõrgem. Kloori väljatõrjumine vääveldioksiidi poolt ning tuhasadestiste korrosioonilise aktiivsuse muutus on ajaliselt toimiv protsess.

Aurukateldes kohtame enamasti mitte küttepinna metalli "puhast" kõrgtemperatuurset korrosiooni,

vaid nn korrosioon-erosiivset kulumist. Viimase olemus seisneb metalli katva oksiidikihi (osalises või täielikus) aeg-ajalises purunemises kui korrosiooni kiirendavas teguris. Küttepinna korrosioon-erosiivne kulumine esineb küttepinna puhastustsükli metallipinnale toimivate jõudude tagajärjel. See probleem seondub kõige teravamalt põlevkivikatelde aurulekuumendite tööea ja metalli lubatava temperatuuriga. Oksiidikihi purunemise ulatus ja selle toime korrosioonile on määratud küttepinna puhastustsükli oksiidikihi mõjuva jõuga. Lisame, et korrosioon ning kulumine ei intensiivistu mitte ainult oksiidikihi purunemisest, vaid ka torude pinnale moodustuva "värske" sadestise suuremast korrosioonilisest aktiivsusest, võrrelduna pikka aega pinnal püsinud tuhasadestisega.

KÜTTEPINNA PUHASTAMISE TEHNOLOOGIAD

Enamus põlevkivikatla küttepindu töötab tuhasadestiste piiramatut kasvu piirkonnas. Nende kasvu piiramiseks ja soojusülekanne stabiliseerimiseks seadistatakse katla küttepinnad puhastussüsteemidega. Puhastusseadme tüübist ja selle töötamise sagedusest sõltub oluliselt katla küttepinna saastumise iseloom ja dünaamika, küttepinnatorude tööiga ning soojusvastuvõtt. Puhastustsükli küttepinnale toimivad jõud ei mõju mitte ainult tuhasadestistele, vaid võivad purustada kas osaliselt või täielikult metallipinda kaitsva oksiidikihi. Oksiidikihi purunemise ulatus ja sagedus mõjutavad aga otseselt küttepinnatorude tööiga. Puhastussüsteemi valik sõltub küttepinnale tekkivate tuhasadestiste omadustest ja kasvukiirusest. Puhastustsükli küttepinnale mõjuva jõu toime ei ole määratud mitte ainult selle absoluutse suurusega, vaid ka puhastustsükli vahelise perioodiga. Puhastussüsteemi valikul tuleb arvestada tsüklilise mõjuga nii soojusülekannele kui ka metalli tööeale.

Põlevkivikateldel on kasutusel mitmed erinevad küttepindade puhastussüsteemid. Üheks efektiivsemaks süsteemiks on küttepindade puhastamine veejuga abil kas iseseisvalt või kombineeritud variandis. Viimane on sõltuv küttepinnas kasutatava metalli omadustest ja temperatuurist.