

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Mechanikos inžinerijos katedra

Saulius Razmas

DUONOS PJAUSTYMO ĮRENGINIO DILIMO TYRIMAS

Perdirbimo pramonės inžinerijos studijų programos magistro
baigiamasis darbas

Klaipėda, 2011

TURINYS

SANTRAUKA	4
IVADAS	5
I. TEORINĖ DALIS	7
1. 1. Paviršiaus irimas	7
1. 2. Dilimo tipai	10
II. MOKSLINIŲ TYRIMŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ	12
2. 1. Plieno mikrostruktūros įtaka dilimo atsparumui	17
2. 2. Terminio apdirbimo įtaka dilimo atsparumui	21
2. 3. Legiruojančių elementų įtaką dilimo atsparumui	23
III. NORMINIŲ DOKUMENTŲ REGLAMENTUOJANČIŲ REIKALAVIMUS MAISTO PRAMONĖS ĮRENGINIAMS APŽVALGA	29
IV. MEDŽIAGŲ PARINKIMAS TYRIMAMS	32
V. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI LABORATORINĖMIS SĄLYGOMIS	34
5. 1. Terminis apdirbimas	34
5. 2. Prispaudimo jėgos nustatymas	36
5. 3. Dilimo bandymų atliktų laboratorinėmis sąlygomis atlikimo metodika	38
5. 4. Dilimo bandymų atliktų laboratorinėmis sąlygomis rezultatai	39
VI. DILIMO BANDYMAI NATŪRINĖSE SĄLYGOSE	43
6. 1. Medžiagų kietumo nustatymas	44
6. 1. 1. Kietumo nustatymo atlikimo metodika	44
6. 1. 2. Rezultatų analizė	46
6. 2. Natūrinėmis sąlygomis atlikto dilimo bandymo metodika	48
6. 3. Natūrinių eksperimentų rezultatų analizė	51
IŠVADOS	59
LITERATŪRA	61
PRIEDAI	64

SANTRAUKA

Pagrindinė mašinų elementų dilimo priežastis yra išorinė trintis, pasireiškianti dviejų kūnų lietimosi paviršiuje. Šiame moksliniame tiriamajame darbe analizuojamas nerūdijančių plienų dilimo reiškinys. Duonos pjaustymo įrenginio eksploatavimo metu dėl nepertraukiamo pjūklų veikimo kreipiančiosiose pasireiškia dilimo procesas. Darbe atlikta naujausių mokslinių dilimo reiškinio tyrimų, nagrinėjamų įvairių šalių mokslininkų tyrimuose, apžvalga ir analizė, kurios pagrindu sukurta dilimo reiškinų bei priežasčių tyrimų technologijų schema. Atlikta medžiagų, atsparių dilimui, apžvalga. Apžvalgos analizės pagrindu atrinktos medžiagos tinkančios maisto pramonės įrenginiams sąrašas. Šios apžvalgos pagrindu parinktos medžiagos eksperimentiniams tyrimams, siekiant nustatyti medžiagą geriausiai atitinkančią eksploatacijos metu susidarancias sąlygas. Atlikti pasirinktų medžiagų palyginamieji eksperimentiniai bandymai laboratorinėmis ir natūrinėmis sąlygomis. Nustatytas dilimo proceso mechanizmas. Tyrimų pagrindu parinkta medžiaga pjūklų kreipiančiųjų gamybai tinkanti maisto pramonės įrenginiams, bei pasižyminti reikiamomis atsparumo dilimui charakteristikomis.

Raktiniai žodžiai: *Dilimas, maisto pramonės įrenginiai, nerūdijantis plienas.*

The main reason of wear in machine elements is external friction, characterized by a two-body contact surface. This research work analyzes stainless steel wear phenomenon. Wear process takes effect in bread-slicing machines saw guides. The work carried out review and analysis of the most recent scientific studies on the wear phenomena. Created scheme of the wear phenomena researches technology. An overview of the materials resistant to wear was done. Based on review was selected a list of materials suitable for food industry. Materials were selected on the basis of this review for experimental studies to determinate best suited to conditions arising during machine operation. Experimental tests of materials were carried out in laboratory and natural conditions. Wear mechanism was determined. Material suitable for the saws guides' production was determined based on investigations.

Keywords: *Wear, food industry machinery, stainless steel.*

IVADAS

Žmogus ir mašinos tapo jau nebeatsiejami dalykai. Įvykus pilnai industrializacijai 20 amžiuje pradėjo vykti ir visų gamybos procesų robotizacija. Nieko nestebina automatizuotos gamyklos su minimaliu darbuotoju skaičiumi ir dideliu kiekiu mašinų, aparatų bei robotų. Besivystantis technologijoms mašinos pradeda skverbtis ir į paslaugų sektorių: pieno, kavos, pilstymo automatai, sulčių spaudimo automatai, bankomatai, automatinės automobilių plovyklos ir t. t.

Tačiau, kad ir kiek vystytųsi ir besiplėstų mašinų panaudojimo galimybės, jų esminės problemos nesikeičia. Visose mašinose yra judančių ir nejudančių dalių, kurios vienaip ar kitaip sąveikauja tarpusavyje. Todėl visada bus aktualus mašinos komponentų atsparumas tokioms sąveikoms kaip ciklinis atsparumas, stipruminis atsparumas ir t. t. Beveik visos judančios dalys, grandys yra tarpusavyje surištos mechaniniais ryšiais, kontaktiniais paviršiais. Deja, kol kas tik fizikiniais ryšiais susietų mechaninių komponentų, tokių kaip magnetiniai guoliai, yra nedaug. Visur dažniausiai dominuoja kontaktiniai paviršiai. Komponentai kontaktuoja tiesiogiai, tai kai detalės tarpusavyje liečiasi, kaip, kad sferinis šarnyras, bei netiesiogiai, kai naudojami tarpiniai elementai, tokie kaip tepalas. Tačiau nesvarbu koks, tiesioginis ar netiesioginis kontaktas būtų, visur pasireiškia dėvėjimasis. Todėl šiuo atveju yra aktualus dilimo (tribologinis) atsparumas.

Dilimo procesas yra sudėtingas procesas, kurį įtakoja daug faktorių. Tai sunkina inžinierių, projektuotojų darbą, nes reiškinys nėra tiksliai prognozuojamas. Inžinierius norėtų žinoti, kaip iš pagamintų medžiagų kinematinė pora veiks, koks saugus eksploatacijos laikas, dilimo intensyvumas bei kaip galima efektyviau parinkti medžiagas kinematiniai porai užtikrinant pakankamą atsparumą dilimo procesui esant įvairiomis eksploatacijos sąlygomis.

Pradėjus intensyviai naudoti mašinas maisto gavybos, apdirbimo bei gaminimo procesuose dilimo reiškinys įgauna didesnę svarbą nei kitose pramonės šakose. To priežastis yra, jog vykstant dilimo procesui ir esant tiek tiesioginiam ar netiesioginiam kontaktui su maisto produktais, nudilusi medžiagos dalis gali patekti į maisto produktus. Nors šių patekusių medžiagų kiekiai ir būna sąlygiškai nedideli, tačiau nors ir maža koncentracija, ji gali pakenti žmonių sveikatai ar net gali būti mirtina. Todėl aktualu nustatyti leistinas šių priemaišų maisto produktuose ribas bei žinoti dilimo proceso intensyvumą.

Darbe nagrinėjamas dilimo reiškinys, kuris pasireiškia duonos pjaustymo įrenginyje. Juostinių peilių kryptį reguliuoja suprojektuotos kreipiančiosios, pasukančios peilius tinkama pjovimui kryptimi ir užtikrinančios jų statmenumą pjaunamos duonos atžvilgiu (1 pav.). Judant peiliui dideliu greičiu vyksta peilių ir kreipiančiųjų lietimasis, dėl to kreipiančiosios intensyviai

dyla. Keliami hipotezė: netinkamai parinktos triboporos medžiagos. Galimas problemos sprendimas: pjūklų kreipiančiųjų medžiagos keitimas.



1 pav. Juostinių pjūklų kreipiančiosios

Šio darbo tikslas: „Nustatyti nerūdijančio plieno kietumo įtaką dilimo atsparumui“.

Tikslui pasiekti keliami šie uždaviniai:

- Atlikti mokslinių dilimo reiškinio tyrimų apžvalgą ir analizę, siekiant nustatyti parametrus įtakojančius dilimo atsparumą;
- Nustatyti reikalavimus maisto pramonėje naudojamam nerūdijančiam plienui;
- Atlikti atsparių dilimui medžiagų apžvalgą ir pagal maisto pramonės keliamus kriterijus parinkti potencialias medžiagas;
- Atlikti pasirinktų medžiagų palyginamuosius eksperimentinius bandymus laboratorinėmis sąlygomis nusakančius optimalų terminį apdirbimą;
- Atlikti natūrinius dilimo bandymus su parinktomis medžiagomis ir nustatyti medžiagų kietumo įtaką dilimo atsparumui.

I. TEORINĖ DALIS

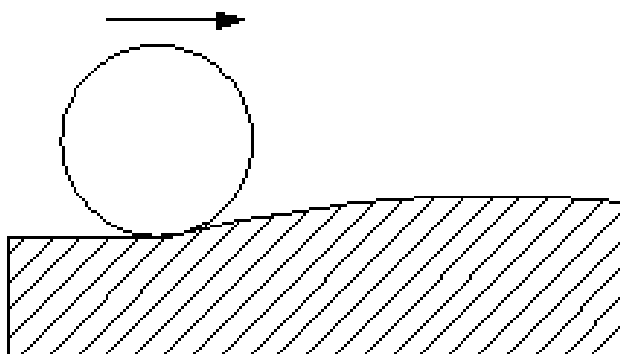
Dilimas – tai procesas kurio metu kietos medžiagos paviršius yra ardomas veikiant trinčiai. Trintis – dviejų kūnų priešinimasis judėjimui vienas kito paviršiumi (Bhushan,1991). Trintis skiriama į vidinę ir išorinę (paviršinę). Vidinė trintis suvokiama kaip plastiškos ar birios medžiagos priešinimasis vidinių sluoksnių judėjimui vienas kito paviršiumi arba kietųjų kūnų, skysčių ar dujų vidinės energijos sklaida dėl molekulių susidūrimo, tempimo, sukibimo, slydimo ir svyravimų. Išorinė (paviršinė) – dviejų paviršių priešinimasis judėti vienas kitu. Dilimo proceso metu paviršius gali būti ir deformuojamas. Dėl dilimo keičiasi mašinų detalių geometrija, tuo pačiu gali kisti ir medžiagų savybės.

Medžiagų dilimas priklauso nuo faktorių: slėgio trinties paviršiuose, santykinio greičio, medžiagos parametrų (struktūra, cheminė sudėtis, mechaninės savybės), paviršiaus būklės (šiurkštumas, standumas, įtempimai ir pan.). Dilimo pasekmė yra medžiagų paviršiaus irimas.

1. 1. Paviršiaus irimas

Paviršių irimo klasifikavimas pateikiamas pagal V. Serapiną.

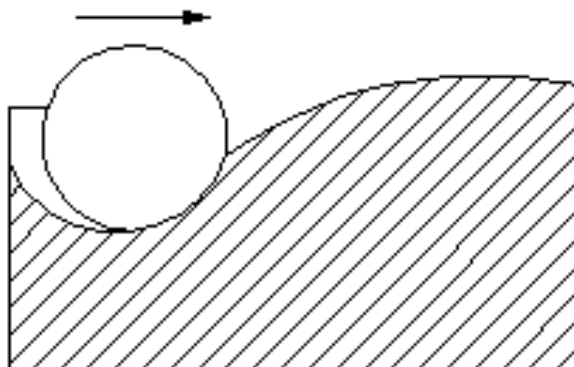
Tamprus medžiagos nustumimas. Jis vyksta kai veikianti apkrova ir adhezija sąlyčio zonoje nesukelia įtempimų, viršijančių takumo ribą. Medžiagos irimas-dilimas šiuo atveju galimas tik dėl tribologinio nuovargio (2 pav.).



2 pav. Tamprusis sąlytis

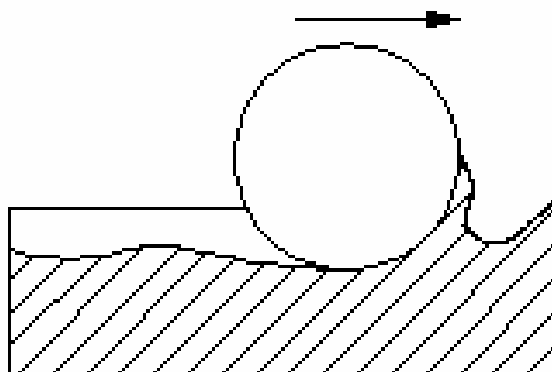
Plastinis medžiagos nustumimas vyksta, kai sąlyčio įtempiai pasiekia plastiškumo ribą, medžiaga apteka įsigilinusias kūno paviršiaus iškyšas. Įsispaudęs trinties paviršiaus ruožas ar dalelė slydimo metu nustumia medžiagą (3 pav.) prieš save ir į šonus po savimi, palikdama rėžį.

Dažniau pasitaikantis atvejis, kai plastinio nustūmimo zona uždengia ankstesnę rėžį. Dilimo paviršius apsidengia rėžiais, beveik lygiagrečiais slydimo keliui, o tarp rėžių yra medžiaga, patyrusi daugkartinę plastinę deformaciją, sukietinta ir perkietinta, t.y. nebegalinti plastiškai deformuotis. Tokiame apkrovų veikiamame ruože susidaro įtrūkimų, kuriems plečiantis, medžiaga atsiskiria nuo giliau esančių sluoksnių.



3 pav. Plastinis sąlytis

Mikropjovimas. Jis vyksta, kai sąlyčio įtempiai ar deformacijos pasiekia reikšmes, kurioms esant medžiaga pradeda irti – sutrikdomas iškyšų aptekėjimas medžiaga (4 pav.). Kai tribopaviršiaus kieta dalelė pakankamai įsigilina, abrazyvo ar medžiagos dilimo dalelės gali atlikti medžiagos mikropjovimą, susidaro mikrodrožlė. Mikropjovimas trinties ir dilimo procesų metu vyksta retai, nes pasirinkus triboporų apkrovas, įsigilinimo gylis pjovimui nepakankamas.



4 pav. Mikropjovimas

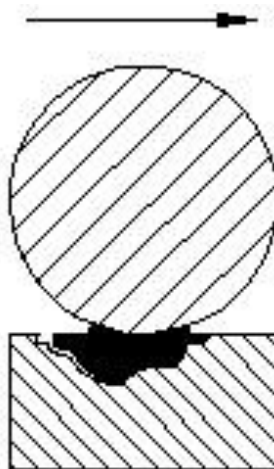
Atsisluoksniavimas - irimas medžiagos plastinio nustūmimo metu. Vykstant plastiniam deformavimui, ji gali būti nustumta į šoną nuo dilimo paviršiaus, ir dėl pasikeitusių mechaninių

savybių medžiaga paviršiuje atsisluoksniuoja. Jei linijinio ar taškinio kūnų sąlyčio metu įtempimai sluoksnio gylyje didesni už medžiagos nuovargio ribą, susidaro įtrūkimų, dėl kurių paviršinių sluoksnių medžiaga atsiskiria žvynų pavidalu. Toks reiškinys gali įvykti grūdintuose ir cementuotuose dilimo porų paviršiuose. Šlakų intarpai, laisvas cementitas ir kiti defektai bei dideli liekamieji tempimo įtempimai skatina paviršių atsisluoksniavimą.

Ištrupėjimas. Detalių dilimo paviršių ištrupėjimas riedėjimo metu be praslydimo ar slystant yra dažnas frikcinių ryšių irimo pavidalas. Ištrupėti gali kietos struktūrinės dedamosios po to, kai išdyla: minkštas lydinio pagrindas; pilkojo ketaus pagrindinės masės ploteliai, apkraštuoti grafitiniais intarpais; antifricinio metalinio sluoksnio detalės dėl nuovarginių pažeidimų, kietos oksidinės plėvelės; metalizuotų dangų dilimo detalės ir kt. Ištrupėjimas susijęs ir su dideliais liekamaisiais tempimo įtempimais paviršiniame sluoksnyje po jo apdirbimo, su įtrūkimais po cementavimo, grūdinimo ar sendinimo, su dideliais terminiais įtempimais, susidarančiais priklausomai nuo trinties sąlygų ar dėl nepakankamo tepimo. Įtrūkimų susidarymas yra ištrupėjimo ir atsisluoksniavimo procesų dedamoji.

Fricinis suardymas. Fricinio ryšio adhezinis suardymas nesukelia betarpiško irimo, bet turi įtakos sąlytyje veikiantiems įtempimams ir deformacijoms, nuovarginiams procesams.

Giluminis išplėšimas. Santykinai pasislinkus sukibusiems kūnams dėl molekulinės tarpusavio sąveikos įvyksta giluminis išplėšimas, kai dėl tokios sąveikos dilimo paviršių susilitavimas yra atsparesnis už vieno ar dviejų kinematinės poros kūnų medžiagų atsparumą (5 pav.). Irimas vyksta vieno iš trinties poros kūnų atitinkamame gylyje. Plastiškų medžiagų paviršiui yrant, išilgai judesio krypties susidaro keteros ir kūgiai, siaurėjantys gilyn į medžiagą. Prie išplėšų tribopaviršių ruožai daugiau ar mažiau deformuojasi plastiškai. Išplėšta medžiaga lieka tribopaviršiuje – viena iš medžiagos pernešimo trinties metu priežasčių.



5 pav. Giluminis išplėšimas

1. 2. Dilimo tipai

Dilimo tipą galima nustatyti pagal trinties porų išorinį vaizdą. Norint dilimo rūši nustatyti tiksliau, reikia ištirti plonų paviršinių sluoksnių sudėtį, fizikines ir mechanines savybes. Dilimo rūšys skirstomi į 3 pagrindinius tipus (Serapinas, 1999):

- **mechaninis** dilimas vyksta, kai detalės paviršius mechaniškai veikiamas trintimi;
- **korozinis mechaninis** (tribocheminis) dilimas vyksta chemiškai aktyvioje aplinkoje arba veikiant elektros energijai mechaniškai dyla;
- **elektroerozinis** dilimas pasireiškia esant elektros srovės išlydžiams ir taip suardomas detalės paviršius.

Dilimo būdų skirstymas pateikiamas 6 paveiksle. Abrazyvinis dilimas taip pat dar skirstomas pagal abrazyvo sąveiką su kontaktiniu paviršiumi (6 pav.).

Mechaninis dilimas.

Abrazyvinis dilimas pasireiškia, kai didesnio kietumo detalės paviršiaus šiurkštumas (nelygumai) arba atskiros kietos abrazyvinės dalelės kontakto zonoje nuglemžia minkštesnės medžiagos mikronelygumus, t.y. pasireiškia mikropjovimas. Šis procesas gali vykti dujinėje ir skystoje terpėje.

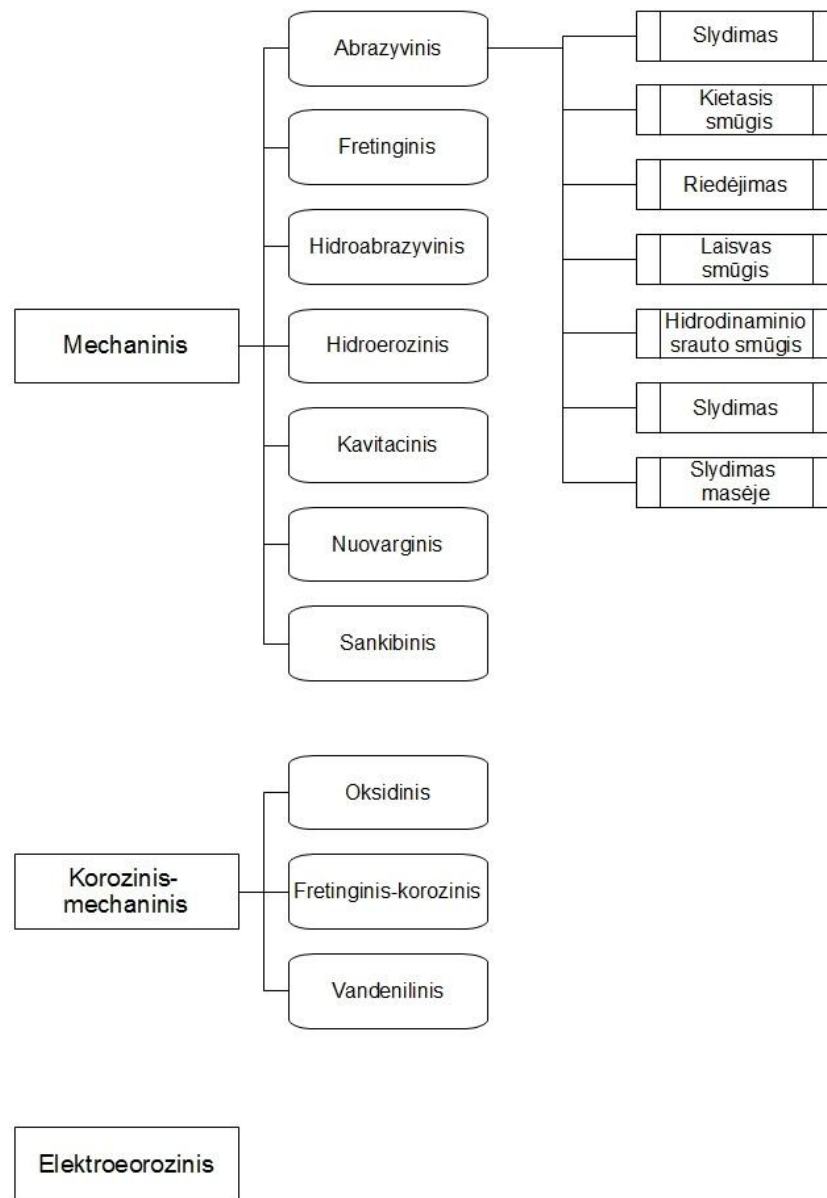
Adhezinis (sankybinis) dilimas pasireiškia, kai detalės spaudžiamos normalinės krypties jėgų dėl plastinių deformacijų susilydo ir detalėms judant šie susilydę mikrosluoksniai yra nuplėšiami nuo abiejų detalių. Adhezinis dilimas vyksta dėl molekulinės traukos, todėl dilimą įtakoja detalių paviršiaus bei medžiagos parametrai, taip pat prispaudimo jėga ir temperatūra.

Fretinginis dilimas pasireiškia, kai detalės vienos kitos atžvilgiu svyruoja. Dėl mažų svyravimo amplitudžių pažeidimai kaupiasi mažame plote. Dilimo produktai negali išeiti iš sąlyčio zonos, tai sudaro didelius slėgius kontakto zonoje ir padidina šių produktų abrazyvinį poveikį kūnui.

Hidroerozinis (dujų erozinis) dilimas pasireiškia veikiant mechaninei paviršiaus apkrovai fluideo (skyčio, dujų) aplinkoje, sraute. Esant dideliame srauto greičiui susidaro detalės paviršiaus trintis ir smūgiai.

Kavitacinis dilimas pasireiškia, kai skystyje esančios oro ertmės (burbuliukai) sprogs ant detalės paviršiaus. Tokie sproginiai kontakto vietoje padidina slėgį ir temperatūrą, sukelia smūgius, vibracijas. Sukeliamas medžiagos nuovargis, gali pasireikšti tuo pačiu ir korozija.

Nuovargio dilimas pasireiškia esant ciklinėms paviršiaus apkrovoms, kurios po tam tikro laiko gali viršyti medžiagos atsparumą nuovargiui, vėliau medžiagos dalelės pradeda atsiskirti, atsiranda įtrūkimai, paviršiaus įdubos.



6 pav. Dilimo tipai

Mechaninis-korozinis dilimas.

Oksidacinis dilimas vyksta, kai ant kontaktuojančių paviršių susidaro oksidacinės plėvelės, dilimo metu jos yra suardomos ir vėl suformuojamos. Dilimo produktas – oksidas.

Fretinginis-oksidas dilimas pasireiškia analogiškai kaip ir paprastas fretinginis dilimas, tik šiuo atveju dilimas vyksta chemiškai aktyvioje aplinkoje.

Vandenilinis dilimas vyksta dėl tribocheminių reakcijų trinties zonoje. Šis dilimas priklauso nuo vandenilio koncentracijos tribopaviršiniuose sluoksniuose. Dilimo metu vandenilis skverbiasi pro medžiagos paviršių, kur susidaro didesnė temperatūros zona dilimo metu, o tai palengvina dilimo procesą. Vandenilinis dilimas pasireiškia praktiškai visuose plieninių ir ketaus detalių paviršiuose.

II. MOKSLINIŲ TYRIMŲ APŽVALGA IR ANALIZĖ

Siekiant nustatyti dilimo reiškinio problemos aktualumą, tiriamus dilimo atvejus, jų priežastis bei problemos sprendimo būdus, atlikta išsami mokslinių tiriamųjų darbų apžvalga ir analizė. Apžvalgos metu analizuoti apie 700 mokslinių straipsnių susijusių su plieno dilimo tyrimais. Straipsnių paieška atlikta naudojantis EBSCO Publishing, IEEE Xplore, Wiley InterScience bei Science Direct duomenų bazėmis. Pastaroji buvo naudota plačiausiai dėl didesnio straipsnių prieinamumo. Daugiausiai dominančios informacijos aptikta šiuose žurnaluose: *Wear*, *Journal of Materials Processing Technology*, *Tribology International*, *Materials Science and Engineering A*, *Surface and Coatings Technology*.

Atlikus straipsnių apžvalgą, pastebėta, jog pagrindinius dilimo reiškinio tyrimus pagal atlikimo technologiją, galima grupuoti kaip pavaizduota 7 paveiksle. Dilimo bandymų įrangos schemų pavyzdžiai pateikti 8 -11 paveiksluose.

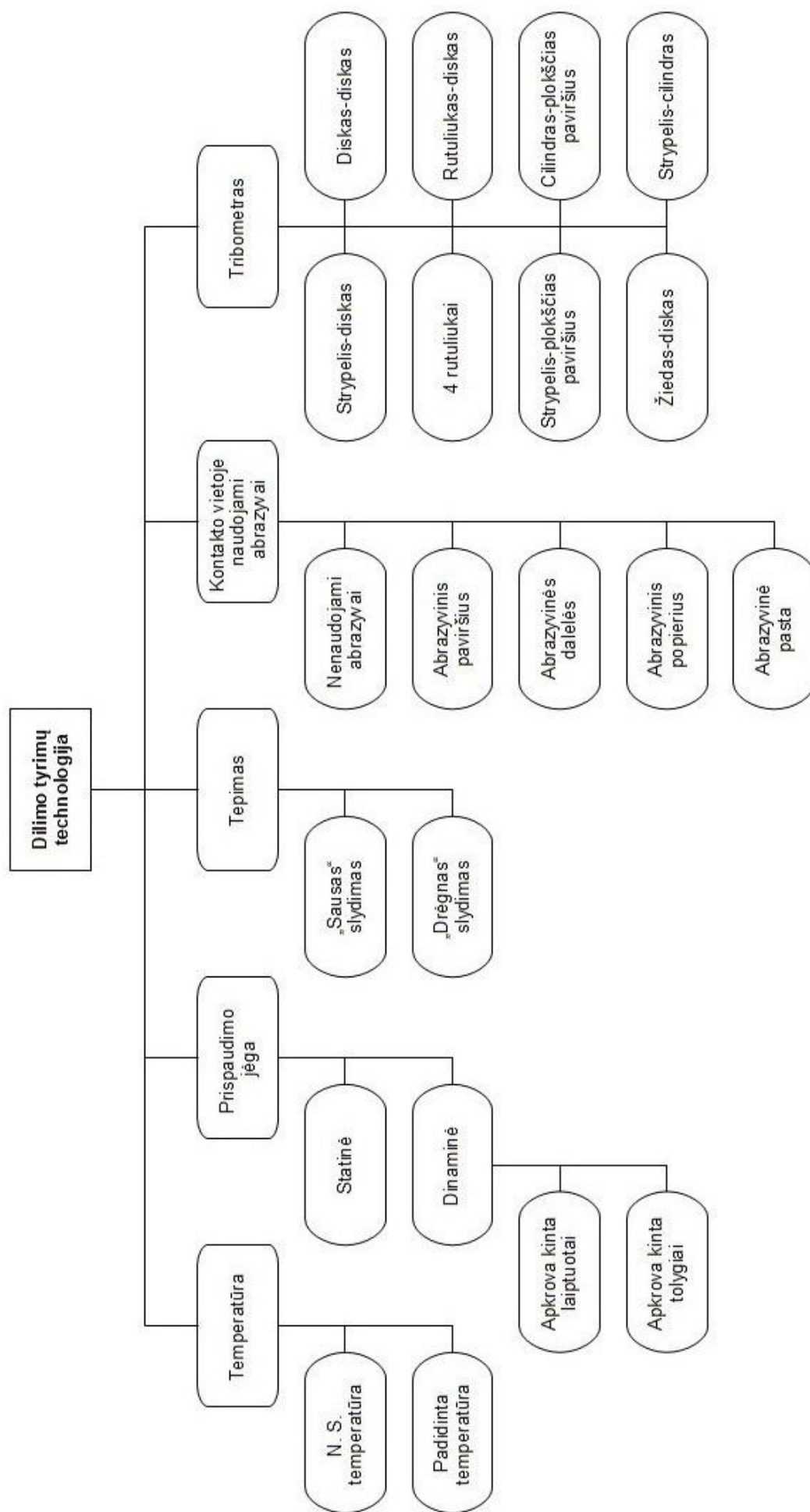
Atliekant eksperimentinių tyrimų apžvalgą labiau gilintasi į plieno dilimo reiškinį, kadangi duonos pjaustyklės pjūklų kreipiančiosios pagamintos iš plieno.

Tyrimais nustatyta, jog martensitinė struktūra turi gerą atsparumą dilimui (Kim, et al., 2009). Tiriamos ir kitos struktūros, kaip bainitinė, perlitinė, (Viáfara et al., 2005), austenitinė, tačiau paskutiniu metu daugiausiai skiriama dėmesio martensitinei struktūrai arba austenitinės struktūros daliniui virsmui į martensitą (Zandrahimi et al., 2007; Farias et al., 2007).

Atlikus apžvalgą nustatyta, jog dažniausiai atliekami abrazyvinio ir „sausjo slydimo“ dilimo tyrimai, nes šios sąlygos yra agresyviausios dilimo požiūriu. Todėl yra tikslinga nustatyti taip vadinamo „blogiausio varianto“ įtaką medžiagoms. Atliekami tyrimai ir specifinėmis sąlygomis. Simuliuojamas papildomas terminis apkrovimas, kuomet siekiama iširti medžiagų dilimo atsparumo charakteristikas esant aukštoms temperatūroms. Esant agresyviai aplinkai, naudojamos kontakto vietoje ir papildomos cheminės medžiagos, kaip rūgštys, oksidatoriai ir pan. Atliekant tepalų ar lubrikantų įtaką dilimui galimas ir tepimo kontakto vietoje naudojimas.

Dažniausiai tiek abrazyvinio, tiek „sausjo slydimo“ dilimo tyrimams yra naudojamas „smeigė ant disko“ konstrukcijos standas. Priežastis elementari – tokia konstrukcija technologiškai nėra sudėtinga bei yra mažų gabaritų.

Dilimui įvertinti naudojami dažniausiai du parametrai – tai dilimo kiekis ir dilimo intesyvumas. Dilimo kiekis nustatomas po kiekvieno dilimo etapo bandinį sveriant. Bandinio svoris palyginamas su svoriu prieš bandymą ir po. Dilimo intesyvumas išreiškiamas kaip tūrio pokytis atvirksčiai proporcingas veikiančios jėgos ir dilimo kelio sandaugai (m^3/Nm). Netektas dilimo metu



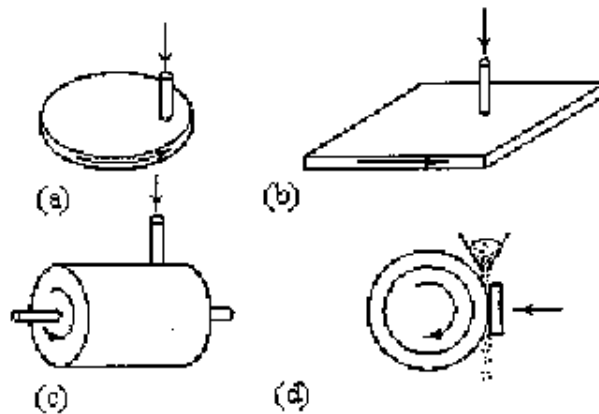
7 pav. Dilimo tyrimų technologija

tūris išreiškiamas matematiškai žinant bandinio tankį ir dilimo metu netektos masės kiekį (Uzunsoy, 2010):

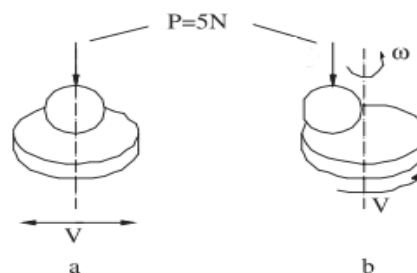
$$w = \frac{\Delta m}{L \cdot \rho \cdot F}, \quad (1)$$

čia w – dilimo intensyvumas, mm^3/Nm ;
 Δm – masės pokytis bandymo metu, g;
 ρ – medžiagos tankis, g/cm^3 ;
 F – normalinė apkrova veikianti smeigę, N;
 L – slydimo kelias, m.

Atsparumas dilimui, tai yra atvirkščias dilimo intensyvumui dydis.



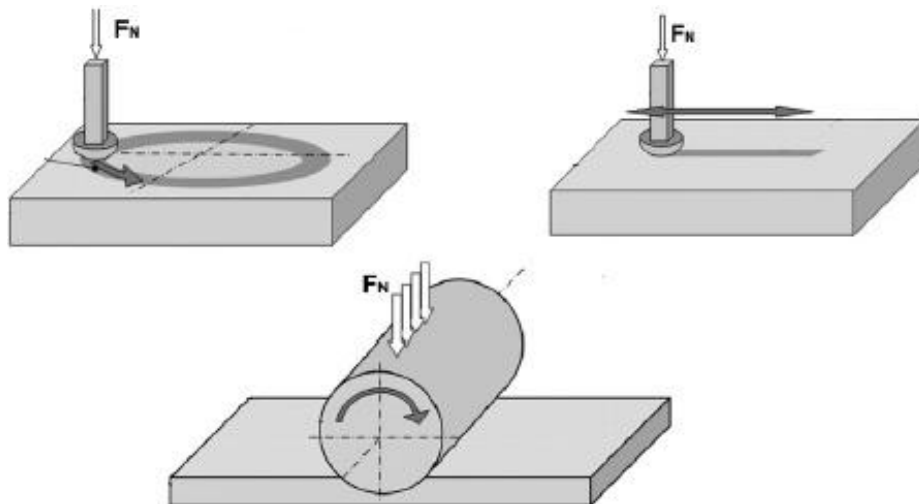
8 pav. Dažniausiai dilimo bandymams naudojamos įrangos schemas: (a) strypelis-diskas, (b) strypelis-plokščias paviršius, (c) strypelis - cilindras, (d) plokštuma-cilindras su beriamomis abrazyvinėmis medžiagomis



9 pav. Rutuliukas-diskas bandymo schema (Bradley et al., 2000)



10 pav. Cilindras-diskas bandymo schema (Grzesik et al., 2006)



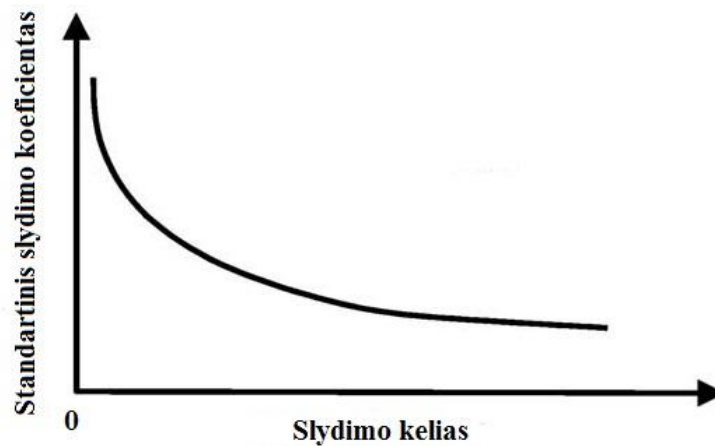
11 pav. Bandymų schemas gumoms (Karger-Kocsis et al., 2008)

Dilimo intensyvumas gali būti parašomas ir klasikine Archard'o formule (arba Rabinowicz) (Archard, 1953; Rabinowicz, 1965):

$$w = K \cdot \frac{FL}{H}, \quad (2)$$

čia H – paviršiaus kietumas, Pa;
 K – bedimensinis dilimo koeficientas.

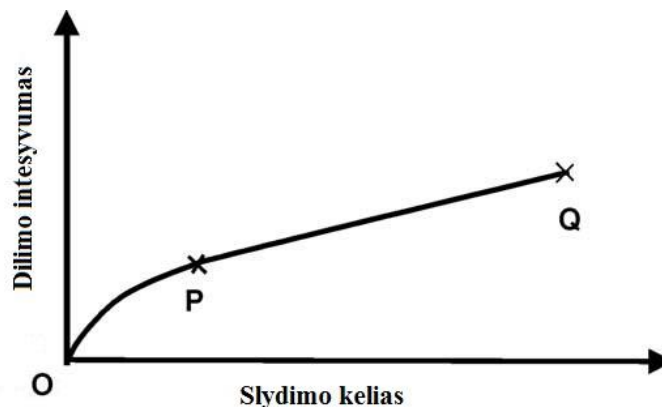
Formulė (2) galioja „strypelis-diskas“ tipo dilimui. Tačiau Yang (2005, 1455 p.) teigimu K koeficientas dilimo metu varijuoja (12 pav.), todėl pagal Archard'o formulę koeficientas K parodys didesnę nusistovėjusio dilimo reikšmę. Autorius siūlo sekančią formulę (2005, 1456 p., 10 f.), kuri tiksliau nustatytų neto stabilaus dilimo koeficientą (3 formulė).



12 pav. Standartinio dilimo koeficiento priklausomybė nuo slydimo kelio (Yang, 2005)

$$K_s = \frac{3HA}{FL} [1 - e^{-BL}], \quad (3)$$

čia A, B – konstantos, nustatomos pagal kreivę (13 pav.);
 K_s – nusistovėjusio neto dilimo koeficientas.



13 pav. Dilimo intensyvumo priklausomybė nuo slydimo kelio (Yang, 2005)

Esama daug dilimo reiškinių aprašymo ir tyrimų modelių, dalis yra Archard'o modelio aplikacijos (Hegadekatte et al., 2008). Tačiau dar vis nėra būdo, galinčio tvirtai ir tiksliai nuspėti tribologinius procesus kinematinėse porose, tiek esant tepimo ar sauso kontakto sąlygomis (Williams, 1999). Šį teiginį patvirtina ir atliktas tyrimas (Godet, 1988), kurio metu nustatyta, kad dilimo koeficientai gauti įvairiuose tyrimuose varijuoja net 1000 %.

Nėra ir universalus modelio, kuris galėtų būti taikomas visose situacijose (Williams, 1999). Sausojo slydimo metu medžiagos paviršiaus irimas priklauso (bent jau) nuo šių faktorių (Williams, 1999):

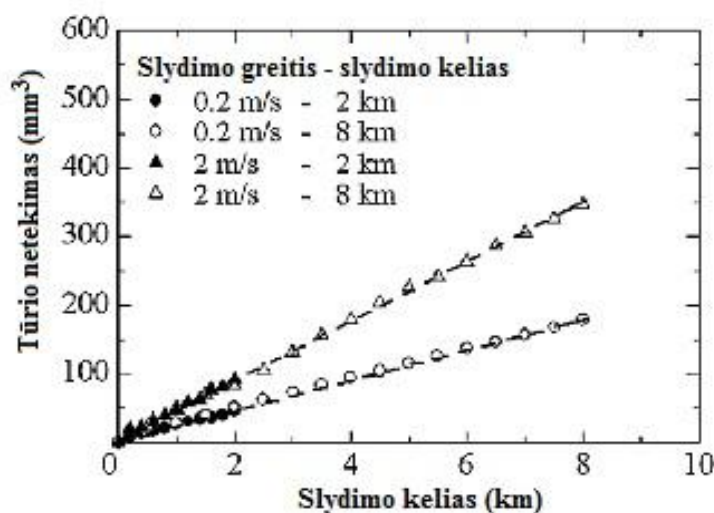
- Normalinė apkrova;
- Santykinis slydimo greitis;
- Geometrija (makroskopinė ir lokali arba topografinė);
- Pradinė temperatūra;
- Supanti aplinka;
- Terminės, mechaninės ir cheminės kontaktuojančių medžiagų savybės.

Atsižvelgiant į šiuos faktorius, toliau atliekama apžvalga siekiant nustatyti faktorių įtaką dilimo atsparumui.

2. 1. Plieno mikrostruktūros įtaka dilimo atsparumui

Darbe (Kanchanomi et. al., 2009) autoriai atliko dilimo tyrimą esant skirtingiems slydimo greičiams. Sausojo slydimo dilimo tyrimas atliktas naudojant „strypelis-diskas“ konstrukcijos tyrimo standą (Phoenix Tribology: TE-88). Tiro plieno cheminė sudėtis: C – 0,024%, Si – 0,81%, Mn – 0,80%, Ni – 12,53%, Cr – 16,49%, Mo – 2,10%. Eksperimentiniai tyrimai atlikti esant šioms aplinkos sąlygoms: temperatūra $25 \pm 2^\circ\text{C}$, santykinis drėgnumas $60 \pm 5\%$. Slydimo greičio diapazonas 0,2-2 m/s, prispaudimo slėgis 1 MPa, slydimo kelio diapazonas 2-8 km.

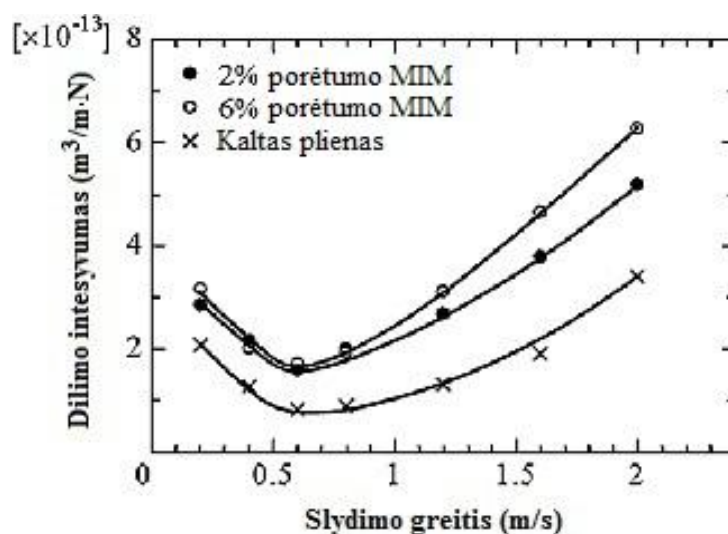
Nustatytas ryšys tarp tūrio praradimo ir slydimo kelio ilgio 316L plieno su 2% porėtumu pavaizduota 14 paveiksle. Visais atvejais pastovi būseną buvo pasiekta po apytiksliai 300 m slydimo kelio. Kaip parodė tyrimo rezultatai, nudilusio tūrio priklausomybė nuo slydimo kelio beveik nepasikeičia nuo kelio ilgio padidėjimo.



14 pav. 316L plieno su 2% porėtumu netekto tūrio ir slydimo kelio priklausomybė (Kanchanomi et. al., 2009)

Visais tyrimo atvejais pastebėta, jog trinties koeficientas būna aukštas dilimo bandymo pradžioje ir mažėja ilgėjant slydimo keliui, tuomet stabilizuojasi pasiekus maždaug 300 m.

Nustatyta funkcinė priklausomybė tarp dilimo kiekio 316L porėto nerūdijančio plieno ir kalto 316L nerūdijančio plieno pavaizduota 15 paveiksle. Nustatyta, jog esant mažiems slydimo greičiams (0,2-0,6 m/s) nerūdijančio plieno su 2% ir 6% porėtumu, dilimo kiekiai panašūs. 316L nerūdijančio plieno su 6% porėtumu esant dideliems slydimo greičiams (0,6-2 m/s) dilimo intensyvumas pastebimas didesnis nei su 2% porėtumu. Kalto nerūdijančio plieno elgsena buvo panaši kaip ir nerūdijančio plieno su 2% ir 6% porėtumu, bet dilimo kiekis buvo žymiai mažesnis.



15 pav. Poringumo įtaka dilimui esant įvairiems slydimo greičiams (Kanchanomi et. al., 2009)

Porėtumo įtaka dilimo atsparumui nustatyta ir (Dahlke et al., 2007) autorių, tačiau tyrimuose autoriai naudojo lubrikantą. Tyrimuose tirtas miltelinės metalurgijos būdu gautas AISI 316L plienas. Naudoti 5 tipų bandiniai: 4 skirtingo porėtumo (2 lentelė) ir 1 neporėtas kaltinis 316L plienas.

Bandymuose naudota „žiedas-diskas“ dilimo schema. Žiedo kontaktinis paviršius apdirbtas mechaniškai, pasiektas šiurkštumas $Ra=0,15 \mu\text{m}$. Bandymai atlikti tepimo sąlygomis naudojant 2% vandeningumo karboksimetilo celiuliozės tirpalą (angl. *carboxymethyl cellulose*, arba CMC). Porėti bandiniai prieš atliekant bandymus prisotinti lubrikanto vakuuminėje džiovavimo kameroje. Kiekvieno atlikto dilimo bandymo trukmė 4h. Eksperimentų rezultatai pateikti 3 lentelėje. Pažymėti „0“ numeriu bandiniai – neporėtas kaltas 316L plienas.

Bandymai parodė, jog naudojant porėtas medžiagas sumažėja trinties koeficientas ir dilimas lyginant su neporėtu. Nustatyta, jog poros dydis tirtose medžiagose turi įtakos medžiagos tribologinėms charakteristikoms, ypač dilimo atsparumui. Tarp porėtų medžiagų su panašiu

porėtumu, struktūra turinti didesnes poras užtikrina geresnes tepimo sąlygas, nes daugiau būna prisisotinusio lubrikanto, dėl šios priežasties didėja dilimo atsparumas.

2 lentelė. Porėtų bandinių charakteristikos (Dahlke et al., 2007)

Bandinio nr.	Paviršutinis sluoksnis			Vidinis sluoksnis			Glaudinimo slėgis, MPa	Bandinio pralaidumo koeficientas, α
	Storis, mm	Miltelių dalelės dydis, μm	Poringumas, %	Storis, mm	Miltelių dalelės dydis, μm	Poringumas, %		
1	1,4	430-600	26	2,8	125-150	25	500	$6,14 \times 10^{-13}$
2	2,1	430-600	26	2,1	125-150	25	500	$6,17 \times 10^{-13}$
3	1,4	430-600	23	2,8	125-150	22	700	$2,38 \times 10^{-13}$
4	1,4	125-150	25	2,8	430-600	26	500	$6,86 \times 10^{-13}$

3 lentelė. Tribologinių bandymų rezultatai (Dahlke et al., 2007)

Bandinių nr.	Kietumas HBW 10/250, MPa	Trinties koeficientas	Linijinis dilimas, μm
0	2452	0,38-0,50	640
1	300	0,30	27
2	227	0,30	22
3	339	0,30	28
4	405	0,35	35

Atliktas dilimo atsparumo tyrimas (Bermúdez et al., 2009) įvertinantis plieno struktūros ir slydimo dažnio įtaką. Autoriai tyrė liejamą M-238 (1.2738; 40CrMnNiMo8-6-4) plieną, kuris grūdintas 880 °C ir atleistas 650 °C temperatūroje. Plieno cheminė sudėtis: C – 0,38%, Si – 0,23%, Mn 1,52%, P – 0,013%, S – 0,023%, Cr – 1,87%, Mo – 0,21%, Ni – 1,02 %, V – 0,01%, W – 0,01%, Cu – 0,015%, Al – 0,008%, Fe – likusi dalis. Terminis apdirbimas ir kiekvieno bandinio kietumas pateiktas 4 lentelėje.

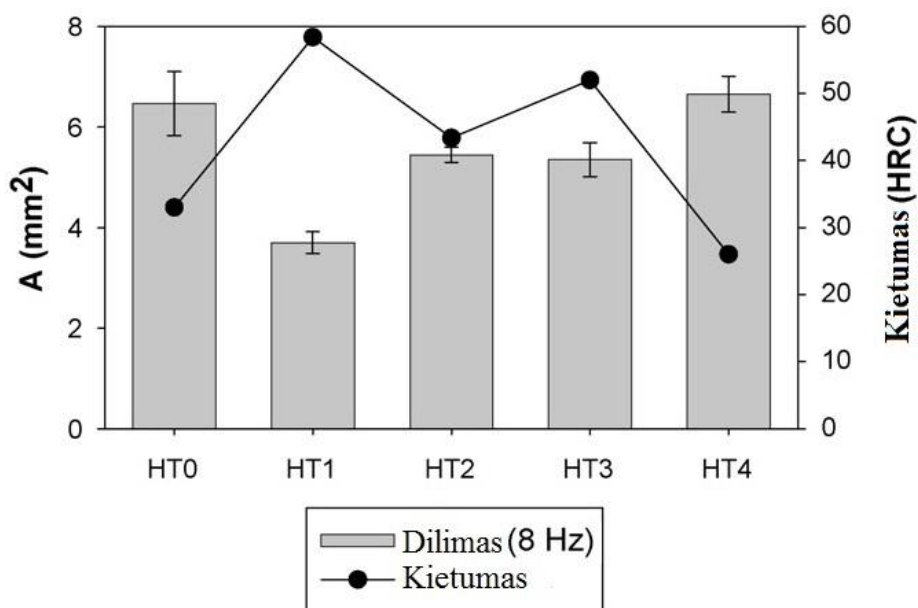
Tribologiniai bandymai atlikti naudojant „strypelis-plokštuma“ tribometrą. Bandymuose naudotas 8 mm skersmens rutuliukas pagamintas iš AISI 52100 plieno (1,52 % Cr; 0,95 % C; 0,25 % Si; 0,33 % Mn). Plieno kietumas – 852 HV, šiurkštumas (Ra) <0,01 μm . Prieš kiekvieną bandymą tiriamos medžiagos nuriebalintos ir nuvalytos naudojant etanolį ir acetoną, po to išdžiovintos.

Bandymai atlikti esant nekintančiomis sąlygomis: normalinė 10 N apkrova; 50 m slydimo kelias; 5 mm amplitudė. Slydimo dažnis 1 ir 8 Hz.

4 lentelė. Bandinių terminis apdirbimas ir kietumas (Bermúdez et al., 2009)

Bandinys	Terminis apdirbimas	Kietumas (HRC)
HT0	Standartinis (grūdintas 880 °C ir atleistas 650 °C)	33,0
HT1	Grūdintas (880 °C)	58,4
HT2	Grūdintas (880 °C) ir atleistas (550 °C)	43,4
HT3	Grūdintas (880 °C) ir atleistas (300 °C)	52,0
HT4	Atkaitintas (900 °C)	26,0

Terminio apdirbimo pasekoje HT1 bandiniai įgavo martensitinę struktūrą. HT0, HT2 ir HT3 – mišrią mikrostruktūrą, o HT4 – perlitinę-feritinę mikrostruktūrą. Bandymo rezultatai (16 pav.) parodė, jog martensitinė mikrostruktūra atsparesnė dilimui esant didesniai slydimo dažniui. Esant mažiems dažniams (1 Hz) medžiagų kietumas ir mikrostruktūra neturi įtakos dilimo atsparumui. Minkšto atkaitinto plieno (HT4) atsparumas dilimui mažėja didėjant slydimo dažniui.



16 pav. Nusidėvėjimo ploto ir bandinių kietumo gautos priklausomybės esant 8 Hz (Bermúdez et al., 2009)

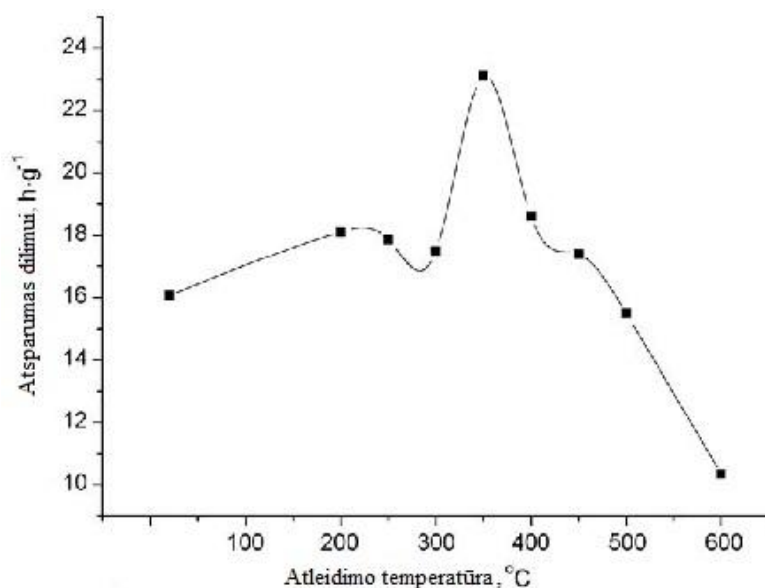
2. 2. Terminio apdirbimo įtaka dilimo atsparumui

Darbe (Fu et al., 2005) autoriai tyrė terminio apdirbimo įtaką plieno, turinčio daug mažos koncentracijos legiruojančių elementų, mechaninėms savybėms. Tuo pačiu tirtas ir atsparumas dilimui. Bandinių cheminė sudėtis pateikta 5 lentelėje.

Dilimo bandymai atlikti kambario temperatūroje su MM-200 mašina esant 200 N statinei apkrovai. YG6 kietlydinys naudotas kaip dilimui atspari medžiaga. Kiekvieno bandymo trukmė iki 30 min.

5 lentelė bandinių cheminė sudėtis (%) (Fu et al., 2005)

Elementas	Kiekis
C	0,6 – 1,0
Si	0,5 – 1,0
Mn	0,8 – 1,2
Cr	0,5 – 1,5
Ni	0,4 – 0,6
Mo	0,4 – 0,8
B	0,005 – 0,015
Y	0,05 – 0,10
K	0,05 – 0,15
Na	0,05 – 0,15



17 pav. Atleidimo temperatūros įtaka dilimo atsparumui (Fu et al., 2005)

Paveiksle 17 pavaizduota atlikto grūdinimo esant 900°C ir atleidimo įtaka dilimo atsparumui būnant skirtingoms atleidimo temperatūroms. Kuomet vykdytas atleidimas iki 300°C, temperatūros įtaka dilimo atsparumui nėra ryški. Tačiau dilimo atsparumas žymiai padidėja atleidžiant virš 300°C ir didžiausias padidėjimas fiksuotas ties 350°C atleidimo temperatūra. Po to atsparumas dilimui krenta didėjant temperatūrai. Ryšys tarp dilimo atsparumo ir atleidimo temperatūros yra susijęs su medžiagos kietumu ir smūginiu tąsumu. Dylančios medžiagos dilimo kiekis gali būti išreikštas priklausomybe (Fu et al., 2005):

$$W = W_c + W_f, \quad (4)$$

$$W_c = K_1 \frac{P}{H}, \quad (5)$$

$$W_f = K_2 \frac{P}{(\varepsilon_f H)^2}, \quad (6)$$

- čia W_t – medžiagų dilimo intensyvumas, mm³/Nm;
 W_c – dilimo intensyvumas dėl pjovimo, mm³/Nm;
 W_f – dilimo intensyvumas dėl medžiagos nuovargio, mm³/Nm;
 P – slėgis, Pa;
 K_1, K_2 – koeficientai;
 H – kietumas, HRC;
 ε_f – lūžio deformacijos įtempimai ties viena ašimi, kas atspindi medžiagos tąsumą, Pa.

Iš (4) – (6) lygčių galima daryti išvadą – dilimo atsparumas priklauso nuo medžiagos tąsumo ir kietumo. Kuomet atleista esant 350°C temperatūrai, tiek šios medžiagos kietumo ir tąsumo parametrai reliatyviai aukšti, tai ir dilimo atsparumas yra didžiausias. Toliau keliant temperatūrą, tąsumas gerėja, tačiau kietumas stipriai mažėja, todėl ir dilimo atsparumas mažėja.

Darbe (Babakhani et al. 2008) tirtas terminio apdirbimo bei tepimo įtaka Fe – 3% Cr – 0,5% Mo – 0,45% C Astaloy P/M lydinio (Astaloy CrM) plieno dilimo kiekiui. Dilimo bandymai atlikti esant 2 m/s slydimo greičiui bei 40 N apkrovai. Minimalus dilimo kelias 43,200 m, temperatūra 20-23°C, drėgnumas 45-55%.

Eksperimento rezultatai pateikti 6 lentelėje (Babakhani et al. 2008).

Tyrimų metu nustatyta, jog didinant temperatūrą, didėja dilimo kiekis. Didžiausias atsparumas yra, kai naudojamas atleidimas iki 450°C. Tačiau kuomet naudojamas atleidimas iki 200°C, dilimo atsparumas mažėja. Taip pat aptikta, jog esant žemoms temperatūroms, stearmidas

yra žymiai efektyvesnis lubrikantas nei ličio stearatas, tačiau esant aukštesnėms temperatūroms Li stearatas mažina dilimo kiekį.

6 lentelė Bandinių žymėjimas ir nustatytos savybės

Žymėjimas	Kepimo temperatūra	Terminis apdirbimas	Lubrikantas	HV 30	K10E-15 (m ³ /mN)	Skersinio trūkio stiprumas	ρ (g/cm ³)
A	1120	-	Li stearatas	269	151,4	555	7,22
B	1250	-	Li stearatas	299	88,9	713,7	7,32
C	1120	-	Stearamidas	271	134,4	597,5	7,24
D	1250	-	Stearamidas	312	112,4	823,3	7,34
A'	1120	G+A (450°C)	Li stearatas	383	39,1	871	7,22
B'	1250	G+A (450°C)	Li stearatas	415	17,3	1395,6	7,32
C'	1120	G+A (450°C)	Stearamidas	378	20,9	919,5	7,24
D'	1250	G+A (450°C)	Stearamidas	405	12,1	1805	7,34
A ^{''}	1120	G+A (200°C)	Li stearatas	400	40,5	1088,9	7,22
B ^{''}	1250	G+A (200°C)	Li stearatas	564	44	1427	7,32
C ^{''}	1120	G+A (200°C)	Stearamidas	467	30,1	1181	7,24
D ^{''}	1250	G+A (200°C)	Stearamidas	503	60,4	1884,3	7,34

2. 3. Legiruojančių elementų įtaką dilimo atsparumui

Darbe (Aksoy et. al. 2001) autoriai tyrė nerūdijančio feritinio plieno (Cr 18%) priemaišų ir homogenizacijos įtaką adhezinio dilimo atsparumui.

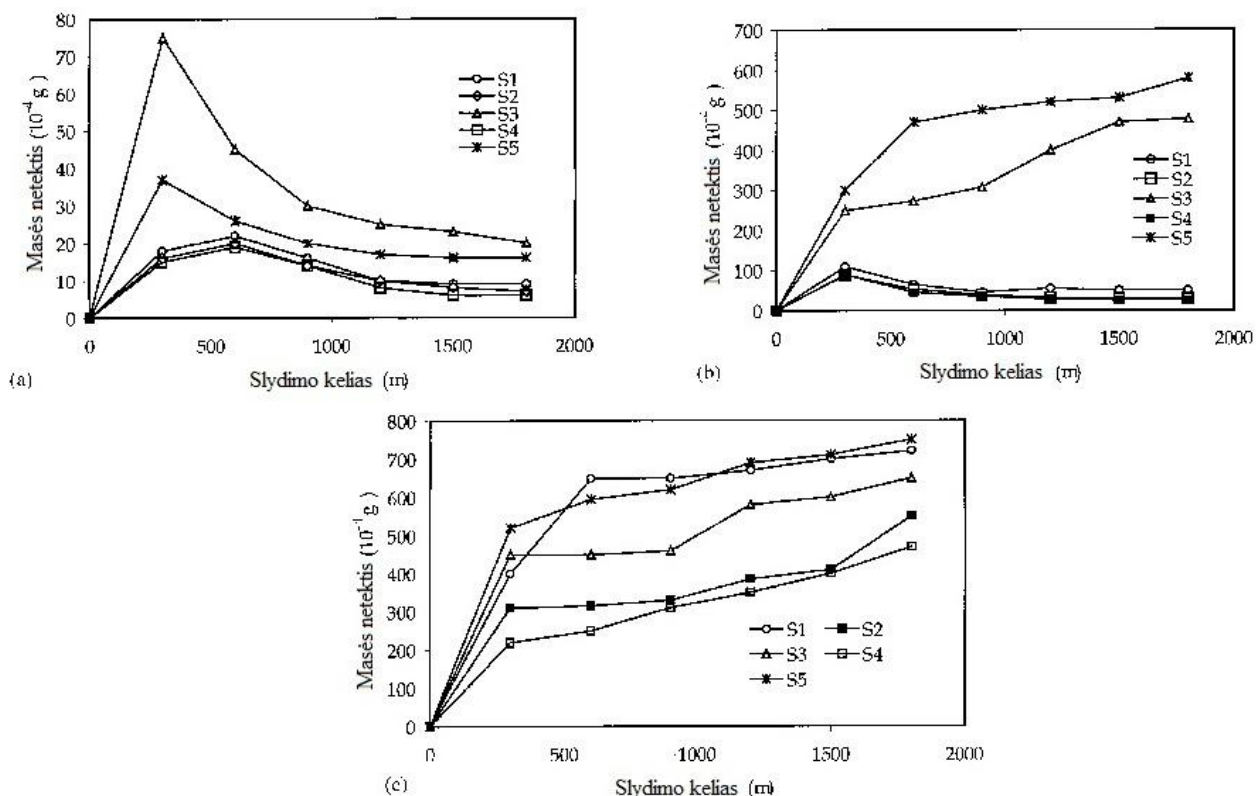
7 lentelė. Bandinių cheminė sudėtis (Aksoy et. al. 2001)

Bandinys	Elementas, %										
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V	Nb	P	S	N
S1	0,048	0,25	0,28	18,21	-	-	-	-	0,02	0,01	0,008
S2	0,043	0,28	0,28	18,02	1,0	-	-	-	0,02	0,01	0,008
S3	0,047	0,38	0,54	18,17	-	1,0	-	-	0,02	0,01	0,008
S4	0,035	0,33	0,36	18,21	-	-	1,0	-	0,02	0,01	0,008
S5	0,052	0,30	0,30	17,75	-	-	-	1,0	0,02	0,01	0,008

Bandinių cheminės sudėtys pateiktos 7 lentelėje. Lydiniai buvo išlieti ir karštai suformuoti į 20 mm skersmens strypus. Kai kurie bandiniai homogenizuoti 1100°C temperatūroje 1,5h ir grūdinti vandenyje.

Homogenizuoti ir nehomogenizuoti bandiniai tirti sausoju slydimu naudojant „blokas-žiedas“ tipo konstrukcijos eksperimentinį standą. Plieninio žiedo medžiaga AISI 1050.

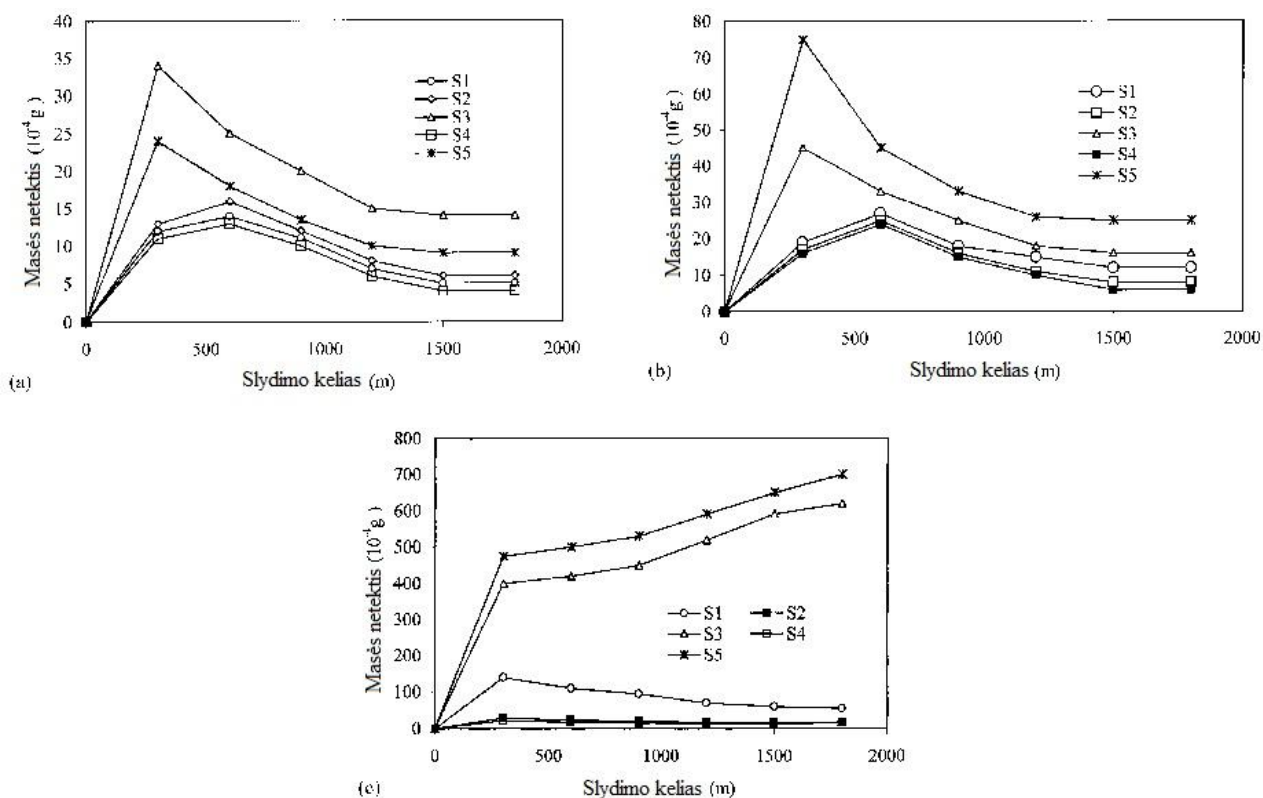
Kiekvieno bandymo metu naudoti po 3 identiškus bandinius ir naujus plieninius žiedus, po to išvestas rezultatų vidurkis. Sausojo slydimo bandymo metu bandiniai apkrauti 40, 60 ir 80 N jėga ir išlaikytas pastovus slydimo greitis 36,8 m/min. Bandymas atliktas sausojo oro aplinkoje. Nehomogenizuotų bandinių eksperimento rezultatai pateikti 18 paveiksle. Homogenizuotų bandinių rezultatai pateikti 19 paveiksle.



18 pav. Nehomogenizuotų bandinių masės nuostolių priklausomybė nuo slydimo kelio esant apkrovoms: (a) 40 N, (b) 60 N, (c) 80 N (Aksoy et. al. 2001)

Bendri homogenizuotų ir nehomogenizuotų bandinių masės nuostoliai pateikti 8 lentelėje (Aksoy et. al. 2001).

Kaip parodė tyrimai, mažiausiai masės iš nehomogenizuotų bandinių netekę yra S2 ir S4. Skirtumas tarp pirmos grupės (S1, S2, S4) ir antros grupės (S3, S5) masės skirtumų paryškėjo tik padidinus apkrovą. Taip pat, S3 ir S5 apkrovos padidėjimas įtakojo perėjimą nuo minkšto dilimo iki aštraus dilimo esant 60 N apkrovai. Šis procesas pastebėtas ir visiems bandiniams, bet esant tik 80 N apkrovai. Oksidų susiformavimas ant bandinių paviršiaus tapo efektyvi priemonė didinanti dilimo atsparumą.



19 pav. Homogenizuotų bandinių masės netekimo priklausomybė nuo slydimo kelio esant apkrovoms: a) 40 N, (b) 60 N, (c) 80 N (Aksoy et. al. 2001)

8 lentelė. Bendras homogenizuotų ir nehomogenizuotų bandinių masės netekimo kiekis

Bandinys	Bendras masės praradimas ($\times 10^{-4}$ gr)					
	40 N		60 N		80 N	
	Homogenizuotas	Nehomogenizuotas	Homogenizuotas	Nehomogenizuotas	Homogenizuotas	Nehomogenizuotas
S1	54	81	103	305	530	3790
S2	61	75	85	270	123	2300
S3	122	218	153	2180	3011	4190
S4	48	68	77	250	98	2000
S5	84	132	229	2900	3445	3885

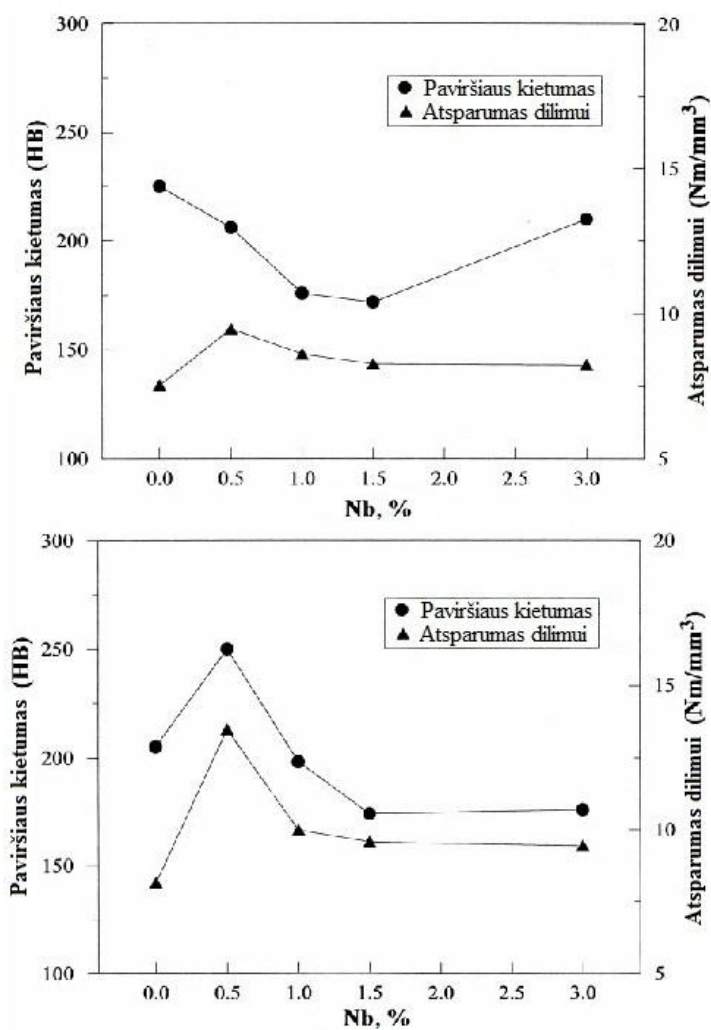
Homogenizacijos procedūros sumažino visų bandinių dilimą. Po homogenizacijos apdirbimo S1, S2 ir S4 dilo minkštai esant visoms apkrovoms, tik S3 ir S5 pradėjo dilti aštriai esant 80 N apkrovai.

Darbe (Aksoy et al., 1999) autoriai atskirai tyrė Nb ir homogenizacijos įtaką dilimo atsparumui. Bandymams naudotų lydinių cheminė sudėtis pavaizduota 9 lentelėje. Bandiniai homogenizuoti esant 1100°C temperatūrai ir staigiai ½ h aušinti. Po to bandiniai apdirbti SiC 80

rūpumo šlifavimo popieriumi. Bandyme naudota „strypelis-diskas“ konstrukcijos dilimo mašina. Visi bandiniai apkrauti statine 10 N jėga. Atsparumas dilimui (Aksoy et al., 1999) nustatytas $\pm 0,2$ tikslumu naudojant (1) formulę. Bandymo rezultatai pateikti 20 paveiksle (Aksoy et al., 1999).

9 lentelė. Bandinių cheminė sudėtis (Aksoy et al., 1999)

Bandinio Nr.	Elementas, %						
	C	Mn	Si	Cr	Nb	P	S
1	0,048	0,25	0,28	18,21	-	0,020	0,010
2	0,054	0,26	0,26	17,95	0,5	0,020	0,010
3	0,052	0,30	0,30	17,75	1,0	0,020	0,010
4	0,055	0,30	0,33	17,59	1,5	0,020	0,010
5	0,053	0,35	0,47	17,07	3,0	0,020	0,010



20 pav. Paviršiaus kietumo ir dilimo atsparumo priklausomybė nuo Nb kiekio:

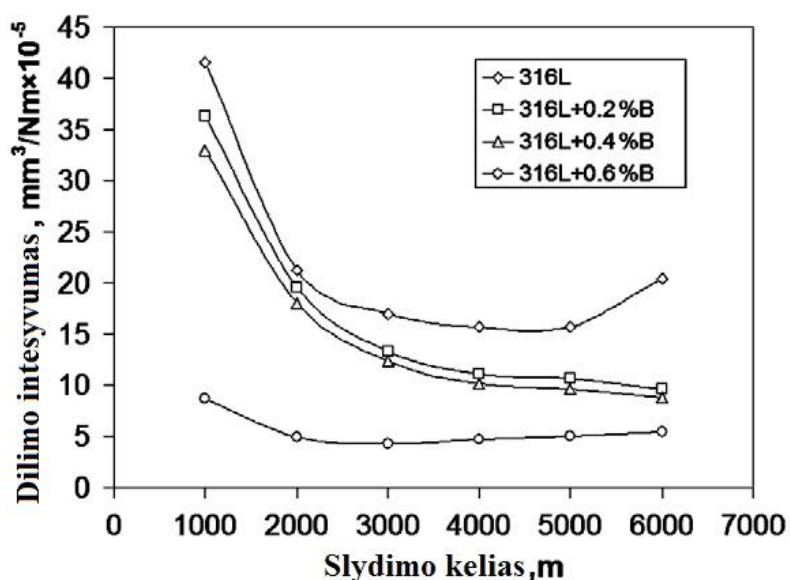
(a) nehomogenizuoti bandiniai; (b) homogenizuoti bandiniai

Tyrimo metu pastebėta, jog Nb neturi ypatingos įtakos nehomogenizuotų bandinių dilimo atsparumui. Tačiau homogenizacija padidino bandinių atsparumą dilimui. Didžiausią atsparumą dilimui turėjo homogenizuoti bandiniai turintys 0,5% Niobio. Homogenizacija 1,5-3,0% Nb turinčių plienų didina ir paviršiaus stiprumą. Taip pat nustatyta, jog kuo didesnis bandinio stiprumas, tuo mažėja atsparumas abrazyviam dilimui. Nustatyta, jog dilimas tiesiogiai priklauso ir nuo kietumo savybių, t.y. kuo didesnis medžiagos kietumas, tuo didesnis atsparumas dilimui.

Miltelinės metalurgijos (MM) gautu būdu plieno AISI 316L, legiruotu boru, atsparumas dilimui tirtas autoriaus (Uzunsoy, 2010) darbe. Fizikinės ir mechaninės bandinių savybės pateiktos 10 lentelėje.

10 lentelė. Fizikinės ir mechaninės MM AISI 316L plieno aglomeruoto su boru sąlygos (Uzunsoy, 2010)

Boro kiekis, %	Aglomeravimo tankis, g/cm ³	Vidutinis kietumas, HRB	Gniuždimio stiprumas, MPa	Stiprumo riba, MPa	Takumo riba, MPa	δ, %	Bendras porėtumas, %
0,0	6,65	81,3	838,8	99,7	72,5	0,2	15,6
0,2	7,06	113,3	998,35	139,5	83,5	8,8	11,3
0,4	7,41	119	1149,67	347,4	164,1	15,4	5,9
0,6	7,5	131,1	1281,35	350,2	227,3	2,1	4,8



21 pav. Dilimo intensyvumas priklausantis nuo medžiagos ir slydimo kelio (Uzunsoy, 2010)

Dilimo eksperimentai atlikti naudojant „strypelis-diskas“ tipo bandymus be papildomo tepimo. Diskas pagamintas iš SEA 1040 plieno, kurio kietumas 180 HV10. Bandymai atlikti esant nekintančiai 10,8 N apkrovai, $2,1 \times 10^{-1}$ m/s slydimo greičiui ir bendram 6000 m slydimo keliui. Smeigės masės pokytis matuotas kas 1000 m kruopščiai nuvalant bandinį.

Dilimo intensyvumas apskaičiuotas naudojant (1) formulę. Bandymų rezultatai išreikšti grafiškai (21 pav.).

Eksperimentai parodė, jog boras MM pliene aglomeracijos metu suformuoja skystą fazę. Skystoji fazė užpildo susidariusias poras, taip suteikiant plieno bandiniams didesnę teoretinę tankį ir kietumą. Taip pat didina plieno atsparumą dilimui, didžiausias atsparumas pasiektas esant 0,6 % boro pliene.

Išvados. Išanalizavus tarptautinius tyrimus, galima teigti, jog nėra universalus bei patikimo matematinio modelio galinčio tiksliai prognozuoti tribologinius procesus. Esami modeliai gali prognozuoti nusistovėjusį dilimą, tačiau kintant sąlygoms gali prasidėti „aštrus“ dilimas, tokiu atveju žymiai padidėja medžiagų dilimo procesas. Atlikti tyrimai taip pat parodė, jog kiekvienu dilimo tyrimų atveju, dilimo intensyvumo koeficientas gaunamas skirtingas. Tai parodo, jog kiekvienu atveju sukurtas matematinis modelis tinka tik konkrečiai sistemai. Todėl atlikti bandymai laboratorinėmis sąlygomis, gali skirtis nuo atliktų natūrinėmis sąlygomis. Tokiu atveju būtina atlikti bandymus tiek laboratorinėmis, tiek natūrinėmis sąlygomis.

Parenkant medžiagas triboporai, apžvalga parodė, jog būtina atsižvelgti į esančias apkrovas, supančią aplinką, medžiagų termines, mechanines ir chemines charakteristikas.

III. NORMINIŲ DOKUMENTŲ REGLAMENTUOJANČIŲ REIKALAVIMUS MAISTO PRAMONĖS ĮRENGINIAMS APŽVALGA

Pjūklų kreipiančiosios yra sumontuotos maisto pramonės įrenginyje, todėl yra tikimybė, jog dilinat kreipiančiosioms dilimo produktai gali papulti į maisto produktus (duoną). Dėl šios priežasties kreipiančiųjų medžiaga negali būti iš Lietuvos higienos normos HN 36 „Draudžiamos ir ribojamos medžiagos“ sąrašo. Taip pat naudojamos medžiagos turi atitikti HN 16 „Medžiagų ir gaminių, skirtų liestis su maistu, specialieji sveikatos saugos reikalavimai“. Cheminės medžiagos, migruojančios į maistą, neturi viršyti lygių, nurodytų šios higienos normos 11 lentelėje.

Cheminės medžiagos, nenurodytos šios higienos normos 11 lentelėje, neturi migruoti į maistą. Atskiri cheminiai dariniai ir jų lygiai (ne)galintys migruoti į maisto produktus plačiau pateikti LR (HN 16) įstatyme.

11 lentelė. Cheminių medžiagų, migruojančių į maistą, didžiausi leidžiami lygiai (HN 16:2006)

Medžiagos pavadinimas	Leidžiamas lygis mg/l, ne daugiau kaip
Aliuminis	0,5
Boras	0,5
Cinkas	5,0
Chromas	0,1
Geležis	0,3
Gyvsidabris	0,005
Kadmis	0,001
Nikelis	0,1
Švinas	0,03
Varis	1,0
Fluoras	1,0
Arsenas	0,05

Standartai susiję su duonos pjaustymo mašinomis reglamentuojantis reikalavimus:

LST EN 12268:2003 „Maisto gamybos įranga. Juostinės pjaustymo mašinos. Saugos ir higienos reikalavimai“;

LST EN 12855:2004 „Maisto gamybos įranga. Sukiosios būgninės pjaustyklės. Saugos ir higienos reikalavimai“;

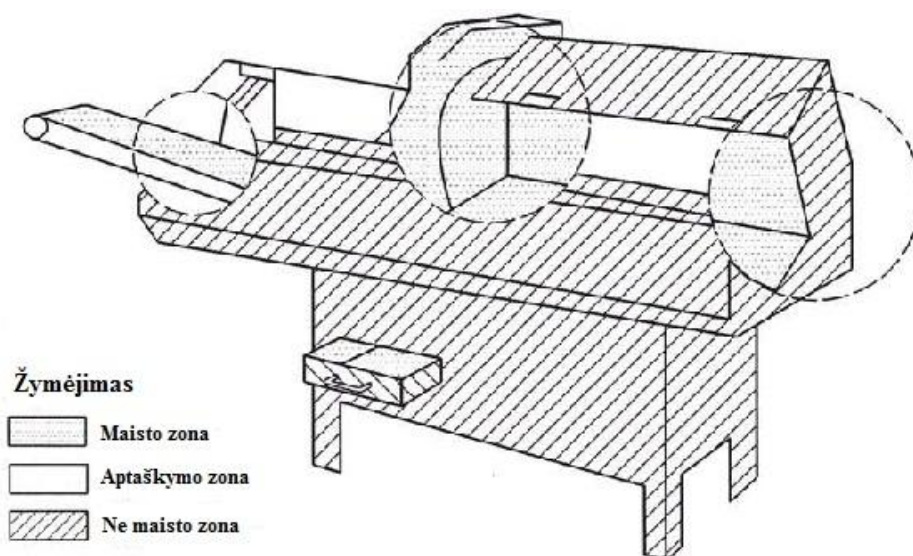
LST EN 13870:2005 „Maisto perdirbimo mašinos. Pjausnių pjaustymo mašinos. Saugos ir higienos reikalavimai“;

LST EN 1974:2002 „Maisto gamybos įranga. Pjaustyklės. Saugos ir higienos reikalavimai“;

LST EN 13954:2006 „Maisto perdirbimo mašinos. Duonos pjaustytuvai. Saugos ir higienos reikalavimai“.

Pagal standartą (LST EN 13954:2006) su maistu kontaktuojančios duonos pjaustymo mašinos zonos pateikiamos 22 paveiksle.

Mašinos detalių medžiagos esančios zonose kontaktuojančios su maistu turi būti Europos Direktyvų sąrašė. Medžiagas numato EN 1672-2:2005 standartas: 5.2.2 punktas – medžiagos esančioms maisto taškymosi zonoje, 5.2.3 punktas – medžiagos nepatenkančios į tiesioginio kontakto zoną. Paviršiaus šiurkštumo reikalavimai remiantis EN ISO 4287:1998 standartu pateikiami 12 - 13 lentelėse.



22 pav. Higienos zonos (LST EN 13954:2006)

12 lentelė. Paviršiaus šiurkštumas maisto kontakto zonoje (LST EN 13954:2006)

Konstrukcijos technologinė dalis	Šiurkštumas (Rz), μm
Traukiama-ridinama-sukama	≤ 34
Lieta-formuota	≤ 40
Mechaniškai apdirbta	≤ 34
Įšvirkšta	
- metalas	≤ 34
- plastikas	≤ 34

Konstrukcijos technologinė dalis	Šiurkštumas (Rz), μm
Danga	
- dažai (išankstiniai bandymai)	≤ 22
- plastikai (išankstiniai bandymai)	≤ 22
- stiklas	≤ 22
- metalas (išankstiniai bandymai)	≤ 22

13 lentelė. Paviršiaus šiurkštumas maisto aptaškymo zonoje (LST EN 13954:2006)

Konstrukcijos technologinė dalis	Šiurkštumas (Rz), μm
Traukiama-ridinama-sukama	≤ 40
Lieta-formuota	≤ 54
Mechaniškai apdirbta	≤ 54
Išvirkšta	
- metalas	≤ 54
- plastikas	≤ 54
Danga	
- dažai (išankstiniai bandymai)	≤ 40
- plastikai (išankstiniai bandymai)	≤ 40
- stiklas	≤ 40
- metalas (išankstiniai bandymai)	≤ 40

Išvados. Parinkta kreipiančiosioms medžiaga turi neprieštarauti LR higienos normai HN 16, bei medžiagos šiurkštumas turi neviršyti LST EN 13954:2006 standarto reikalavimų. Pjūklų kreipiančiosios patenka į maisto aptaškymo zoną. Kreipiančiosios yra neliejamos, o mechaniškai padirbamos, kad būtų užtikrintas glotnus paviršius. Todėl kreipiančiųjų paviršiaus šiurkštumas pagal LST EN 13954:2006 turi būti ≤ 54 Rz.

IV. MEDŽIAGŲ PARINKIMAS TYRIMAMS

Mechanizmams ir konstrukcijoms dažniausiai naudojami plienas ir ketus. Tačiau šių medžiagų įvairovė yra labai didelė (pilkasis ketus, kalusis ketus, konstrukcinis plienas, įrankinis plienas ir pan.), todėl būtina prieš parenkant galimas naudojimui medžiagas, atlikti medžiagų (plieno ir ketaus) apžvalgą ir atrinkti jau pasižyminčias atsparumu dilimui. Apžvalga atlikta remiantis autorių (Janutienė 2005; Pavaras ir kt., 1999; Šniuolis, 2004; Гелин, 1987) leidiniais. Medžiagų apžvalga (14-15 lentelės) pateiktos 1 ir 2 prieduose.

Nors atsparių dilimui medžiagų yra ne mažai, tačiau ne visos medžiagos tenkina keliamus nagrinėjamam maisto pramonės įrenginiui reikalavimus (3 skyrius). Taip pat ne visos medžiagos pasižymi geru terminiu apdirbimu, kuris turi įtakos dilimo atsparumui (2. 2. skyrelis). Atsižvelgiant į šiuos kriterius parenkamos eksperimentams medžiagos.

AISI 304 (pagal GOST standartą: 08X18H10; pagal EN: 1.4301). Šis nerūdijantis plienas pasirinktas kaip etaloninis plienas, kadangi yra dažniausiai naudojamas maisto pramonėje ir ne tik. Eksperimentiniuose tyrimuose atliekant rezultatų palyginamąją analizę, AISI 304 bandinių tyrimo rezultatai yra pradinis atskaitos taškas (medžiaga). AISI 304 cheminė sudėtis: maks. 0.08% C, 18-20% Cr, 8-10.5% Ni, 2% Mn, 0.75% Si, 0.05% P, 0.03% S, 0.1% N.

AISI 316 (pagal EN standartą: 1.4401, 1.4436). AISI 316 nerūdijantis plienas yra antras pagal naudojimo dažnumą. Šis plienas dažniausiai naudojamas maisto ir medicinos pramonėje. Kadangi įrenginys skirtas pjaustyti maisto produktus (duoną), todėl pasirinktas AISI 316 dėl savo plataus panaudojimo maisto pramonėje. Cheminė sudėtis: 0.08% C, 18-20% Cr, 10-14% Ni, 2% Mn, 0.75% Si, 0.05% P, 0.03% S, 0.1% N, 2-3% Mo.

AISI 440 C (pagal GOST standartą: 95X18; pagal EN: 1.4125). AISI 440 C yra nerūdijantis plienas, kuris pasižymi dideliu anglies kiekiu ir dideliu kietumu. Dėl šio plieno didelio kietumo ir sąlyginai mažos kainos, plienas naudojamas peilių gamybai. Dėka antikoroziinių savybių, naudojamas maisto pramonėje. Sąlyginai maža kaina bei didelis kietumas, kuris yra vienas iš parametrų parodantis didesnę medžiagos atsparumą dilimui, lemia pasirinkimą eksperimentiniams tyrimams. Taip pat atlikus plienų ir ketaus atsparumo dilimui apžvalgą (1 priedas), nustatyta, kad ši medžiaga pasižymi didesniu atsparumu dilimui (Glaeser, 1992). Taip pat svarbus faktorius yra didelis anglies kiekis, leidžiantis atlikti kokybišką terminį (kokybiškas nerūdijančių plienų terminis apdirbimas pasiekiamas, pasak autoriaus A. Pavaro, kuomet anglies kiekis $C > 0,9$ proc.) apdirbimą. Tokiu būdu galima atlikti tyrimus nustatant terminio apdirbimo įtaką dilimo atsparumui. Plieno 440 C cheminė sudėtis: 0.95-1.2% C, 16-18% Cr, 1% Mn, 1% Si, 0.04% P, 0.03% S, 0.75% Mo.

Tinkamas terminis (temperatūros) apdirbimas AISI 440 C plienui turi būti nustatytas eksperimentiškai. Terminiam apdirbimui nepasiteisinus, galimas termocheminis apdirbimas. Atsparumą dilimui didina: Azotinimas, cianavimas, borinimas ir chrominimas (Pavaras ir kt., 1999).

Pasirinkus pradinį atskaitos tašką (medžiagą) dilimo atsparumui nustatyti AISI 304, reikia nustatyti ribinį tašką (medžiagą), kurį viršijant, pagal atsparumą dilimui, būtų galima teigti, jog medžiagos atsparumas dilimui yra pakankamas. Medžiagos, kurių viena iš pagrindinių savybių yra atsparumas dilimui, yra įrankiniai ir greitapjūviai plienai. Todėl yra tikslinga naudoti ribinę medžiagą vidutinio atsparumo dilimui įrankinį arba greitapjūvį plieną.

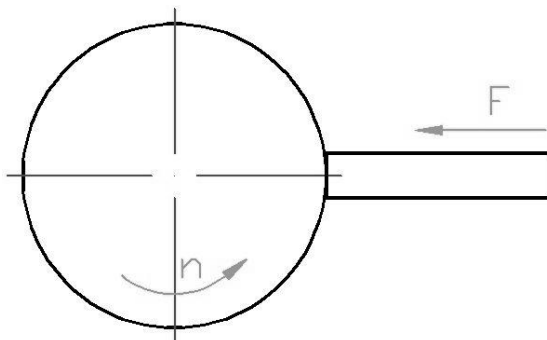
AISI M2 (pagal GOST standartą: P6M5; EN: 1.3343). Ši medžiaga yra greitapjūvis plienas. Medžiaga pasižymi atsparumu dilimui, todėl naudojama pjovimo procesuose. AISI M2 yra vidutinio dilimo atsparumo iš greitapjūvių plienų (Pavaras ir kt., 1999). Plieno AISI M2 cheminė sudėtis: C 0.78-1.05%, Si 0.2-0.45%; Mn 0.15-0.40%, P 0.03%, S 0.03%, Cr 3.75-4.5%, Mo 4.5-5.5%, W 5.5-6.75%, V 1.75-2.2%, Cu 0.25%.

V. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI LABORATORINĖMIS SĄLYGOMIS

Atliekant dilimo bandymus trinties porą stengiamasi parinkti kiek galima artimesnę realioms sąlygoms. Todėl yra naudojama labai daug įvairių bandymo schemų, kurios imituoja vieną ar kitą realią trinties porą (6 pav.). Parenkant bandymo schemą atsižvelgiama į trinties poros konstrukciją, geometrinę formą, trinties rūšį (slydimo, riedėjimo), tepimo rūšį ir sąlygas, bei trinties poros elementų santykinio judesio pobūdį. Eksperimentų metodika sudaryta atsižvelgiant (ASTM G 99 - 04, 2004; ASTM G 132 - 96, 1996) standartais ir moksliniais straipsniais (Bateni, 2006; Büscher, 2003; Bressan, 2008; Farias, 2007; Kanchanomi, 2009; Riviere, 2009).

Įvertinus dažniausiai naudojamas trinties bandymų schemas, sudaryta trinties bandymo schema, kuri geriausiai atitiks nagrinėjamo atvejo darbo sąlygas. Esamu atveju trinties bandymams keliami uždutis nustatyti cilindrinio bandinio (strypelio) dilimo kiekį kiek galima artimesnėms realios konstrukcinio elemento eksploatacijos sąlygoms. Pasirinkta bandymo schema pavaizduota 23 paveiksle.

Kaip matyti iš 23 paveikslo, prieš atliekant eksperimentus reikia žinoti bandinio apsisukimų skaičių bei strypo prispaudimo jėgą. Strypas, šiuo atveju pjūklas, o besisukantis cilindras – bandomoji kreipiančiųjų medžiaga. Siekiant nustatyti prispaudimo jėgą, atlikti matavimai realiame įrenginyje.



23 pav. Bandymo schema „cilindras-strypelis“. F – prispaudimo jėga, n – bandinio apsisukimai

5. 1. Terminis apdirbimas

Bandymuose tirti specialios formos bandiniai (24 pav.). Darbinės dalies skersmuo 20 mm. Termiškai apdorojant šiuos bandinius laboratorijos sąlygomis taip išvengtas didesnis bandinių geometrijos išsikraipymas.



24 pav. Bandiniai

Bandymuose naudoti bandiniai pagaminti iš martensitinio nerūdijančio plieno AISI 440 C (arba kitaip GOST 95X18, EN 1.4125). Šios rūšies plienas turi sąlyginai didelį kiekį anglies (0,95 %), kuris pakankamas atlikti terminį apdirbimą

Palyginimui vienas bandinys (AISI M2) pagamintas iš greitapjūvio plieno (Nr. 9).

Terminio apdirbimo tikslas – padidinti bandinių paviršiaus kietumą, tuo pačiu padidinant atsparumą dilimui. Bandiniams taikyti skirtingų temperatūrų terminiai apdirbimai. Dalis bandinių grūdinti 1000 °C temperatūroje, kaitinimo trukmė 20 minučių. 1050 °C temperatūros kaitinimo trukmė 30 minučių, aušinta alyvoje. Po apdirbimo nustatytas kietumas pagal Rokvelio skalę.

Atleidimo temperatūros: dalis bandinių atleisti esant 200 °C temperatūrai, kita dalis - 520 °C temperatūroje, likusi - 550 °C temperatūroje. Kaip ir po grūdinimo, taip ir po atleidimo, nustatytas bandinių kietumas. Terminio apdirbimo sąlygos ir bandinių kietumas po grūdinimo pateikti 16 lentelėje.

16 lentelė. AISI 440 C terminio apdirbimo sąlygos ir bandinių kietumas

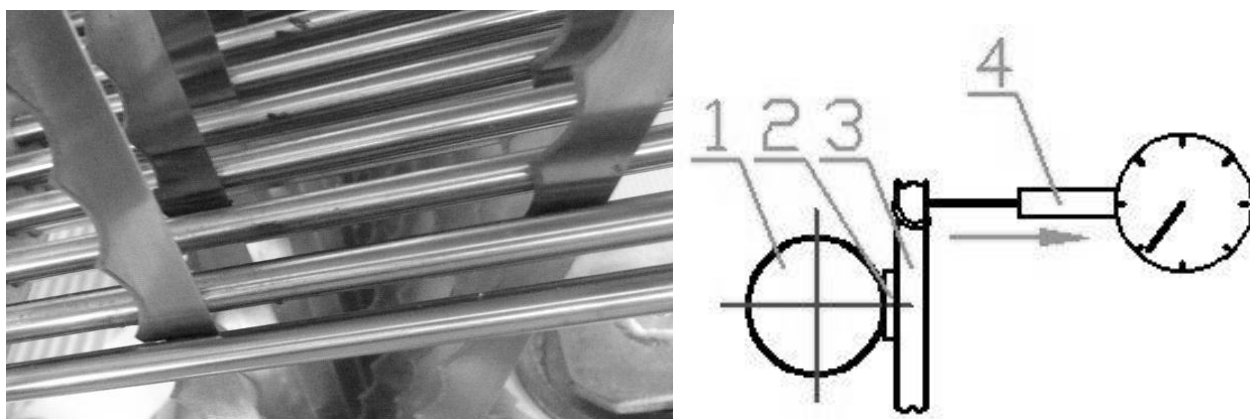
Bandinio Nr.	Grūdinimas		Atleidimas	
	Temperatūra T, °C	Kietumas, HRC	Temperatūra T, °C	Kietumas, HRC
1	1000	58	200	58
2	1000	58	200	57
3	1050	59	200	57
4	1050	59	200	57,5

Bandinio Nr.	Grūdinimas		Atleidimas	
	Temperatūra T, °C	Kietumas, HRC	Temperatūra T, °C	Kietumas, HRC
5	1050	59	520	56,5
6	1050	58	520	55,5
7	1050	60	550	52
8	1050	58	550	51,5
9	1050	59,5	550	58,5

5. 2. Prispaudimo jėgos nustatymas

Prispaudimo jėga esanti tarp pjūklo ir kreipiančiosios nustatyta naudojant dinamometrą (4) ir tarpinę (2) (25 pav.).

Tarpinė įdėta tarp kreipiančiosios ir pjūklo. Tokiu atveju pjūklas spaudžia tarpinę tokia pat jėga, kaip kreipiančiąją prieš tai. Ši jėga prispaudžia tarpinę prie kreipiančiosios. Tuomet ant dinamometro sumontuotu kabliuku užkabinamas pjūklas. Traukiant pjūklą nuo kreipiančiosios (25 pav.), pasipriešinimo jėga fiksuojama dinamometru. Procesas vyksta tol, kol pjūklas atitraukiamas nuo tarpinės ir netekusi prispaudimo jėgos, veikiama gravitacijos tarpinė iškrenta iš kontakto zonos. Tuomet fiksuojamas jėgos dydis. Pjūklų prispaudimo jėgos matavimas kartojamas 3 kartus. Taip eksperimentas atliekamas su visais pjūklais.



25 pav. Pjūklų prispaudimo jėgos nustatymo schema. 1 – kreipiančioji, 2 – tarpinė, 3 – pjūklas, 4 – dinamometras

Atliktas eksperimento rezultatų statistinis įvertinimas. Apskaičiuoti pagrindiniai įverčiai: vidurkis, dispersija, standartinis nuokrypis ir variacijos koeficientas (Narmontas D., 2008). Eksperimento rezultatai pateikiami 17 lentelėje.

Vidurkis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (7)$$

čia: \bar{x} - vidurkis;
 x_i - diskretusis dydis;
 n - eksperimentų skaičius.

Dispersija - tai dydis, įvertinantis reikšmių išsibarstymo nuotolį nuo vidurkio. Dispersija apskaičiuojama:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (8)$$

Praktikoje sklaidos matą patogiau apibūdinti atsitiktinio dydžio dimensija. Toks sklaidos matas yra vidutinis kvadratinis nuokrypis.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}. \quad (9)$$

Dydis σ dar vadinamas standartu (angl. *standard deviation*, SD). Variacijos koeficientas apskaičiuojamas:

$$\text{var} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (10)$$

17 lentelė. Jėgos matavimo rezultatai

Bandymo Nr.	Prispaudimo jėga, N	Bandymo Nr.	Įtempimo jėga, N	Bandymo Nr.	Prispaudimo jėga, N
1	2,0	21	2,0	41	2,2
2	2,2	22	2,2	42	2,2
3	2,2	23	2,2	43	2,2
4	2,2	24	2,2	44	2,2
5	1,8	25	2,2	45	2,0
6	2,0	26	2,0	46	2,2
7	2,0	27	2,0	47	2,2

17 lentelės tęsinys

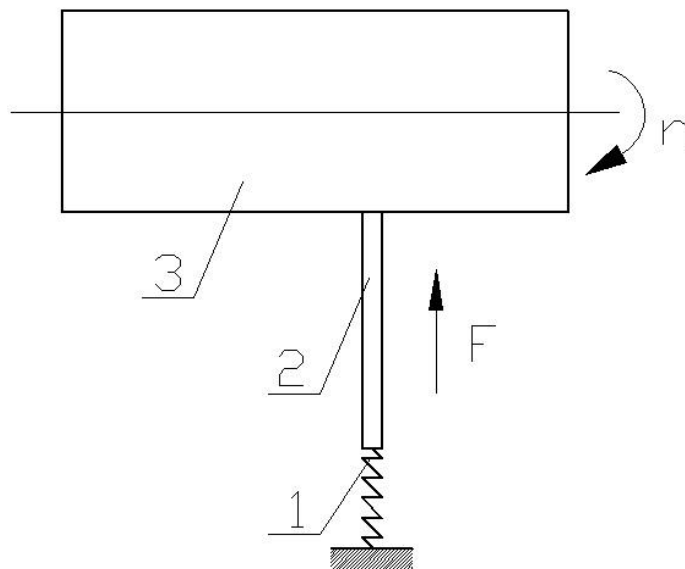
Bandymo Nr.	Prispaudimo jėga, N	Bandymo Nr.	Įtempimo jėga, N	Bandymo Nr.	Prispaudimo jėga, N
8	2,2	28	2,2	48	2,2
9	2,2	29	2,2	49	2,2
10	2,2	30	2,2	50	2,2
11	2,2	31	2,2	51	2,2
12	2,0	32	2,0	52	2,2
13	2,2	33	2,2	53	2,2
14	2,2	34	2,2	54	2,2
15	2,2	35	2,2	55	2,2
16	2,2	36	2,2	56	2,2
17	2,2	37	2,0	57	2,2
18	2,0	38	2,2	58	2,2
19	2,2	39	2,2	-	-
20	2,2	40	2,2	-	-
Vidurkis, N					2,16
Standartas, N					0,09
Variacijos koef., %					4,27

5. 3. Dilimo bandymų atliktų laboratorinėmis sąlygomis atlikimo metodika

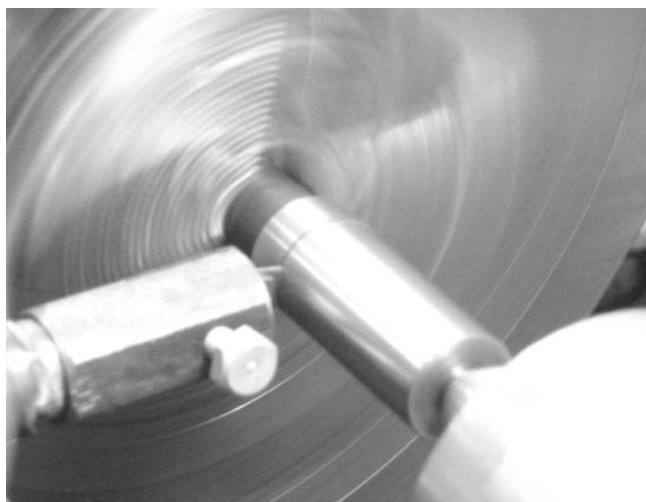
Eksperto atlikimo technologinė schema pateikta 26 paveiksle. Bandymuose kontrakūnas prispaustas 200 N jėga. Toks sprendimas priimtas, kad paspartinti dilimo procesą. Bandinio apsisukimai eksperimento metu $n=600$ aps/min. Prispaudimo jėgos stabilumą užtikrina spyruoklė (3). Šio bandymo technologijos pagrindinis trūkumas – bandinio dilimas vyksta visu perimetru, tokiu būdu gauti rezultatai ne pilnai atspindi realią situaciją. Technologijos privalumas, jog realius elementus (šiuo atveju pjūklas) galima panaudoti kaip kontrakūną (2). Tokiu būdu išvengiami matavimo netikslumai, kurie atsiranda naudojant atskirai pagamintus bandinius, nes pagamintų bandinių medžiagos savybės gali skirtis nuo įrenginyje naudojančios (pjūklo) medžiagos savybių.

Eksperto metu prie besisukančio bandinio prispaudžiamas pjūklo elementas (27 pav.). Bandymais nustatytas pjūklo kietumas yra 48 HRC. Pjūklo prispaudimo jėga viso

eksperimento metu išlaikoma nekintanti. Kiekvieno dilimo bandymo metu eksperimentas atliekamas 600 s.



26 pav. Dilimo bandymo schema: 1 – prispaudimo jėgą užtikrinantis tamprus elementas, 2 – kontrakūnas (pjūklo elementas), 3 – cilindrinis bandinys (smeigė)



27 pav. Dilimo eksperimento vaizdas

5. 4. Dilimo bandymų atliktų laboratorinėmis sąlygomis rezultatai

Dilimui kiekio įvertinimui naudotas masės pokyčio metodas. Pokytis apskaičiuojamas naudojant formulę:

$$m = \frac{m_0 - m_{pb}}{m_{pb}} \cdot 100, \quad (11)$$

čia m – dilimo kiekio procentinė išraiška, %;
 m_0 – pradinė bandinio masė prieš eksperimentą, g;
 m_{pb} – bandinio masė po bandymo, g.

Prieš ir po bandymo bandiniai sverti precizinėmis svarstyklėmis. Dilimo intensyvumas apskaičiuojamas pagal (1) formulę. Gauti eksperimento rezultatai pateikti 18 lentelėje.

18 lentelė. Bandinių masės pokytis

Bandinio Nr.	Procentinis masės pokytis, %
1	0,040
2	0,041
3	0,043
4	0,043
5	0,042
6	0,043
7	0,057
8	0,064
9	0,040

Eksperimento metu kietesni bandiniai, kaip ir tikėtasi, dilo mažiau nei minkštesni, gauti po atleidimo (28 pav.). Pagal gautus eksperimentinių tyrimų rezultatus atliekama regresinė analizė, naudojant mažiausių kvadratų metodą, pagal tiesės lygtį (Puškorius, 2001, 185 p.):

$$y = f(x; a, b) = ax + b, \quad (12)$$

čia y – dilimo kiekio procentinė išraiška, %;
 x – bandinių kietumas, HRC;
 a, b – lygties koeficientai.

Pritaikant (12) formulę gaunamos dvi lygtys, kuriomis naudojantis skaičiuojami parametrai a ir b (Puškorius, 2001, 185 p.):

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]x_i = 0, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)] = 0. \quad (14)$$

Išsprendus lygtį gaunama:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (15)$$

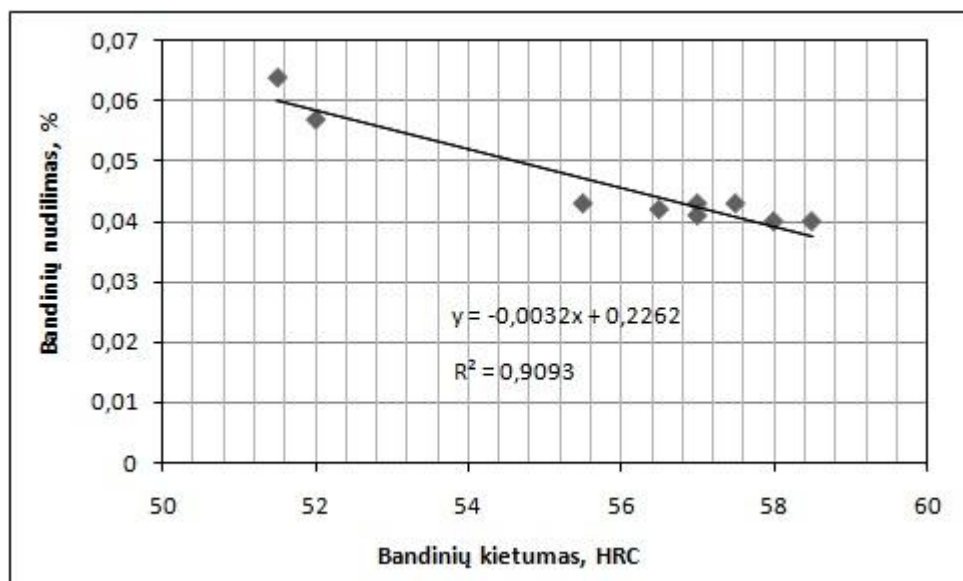
$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (16)$$

Tada:

$$a = \frac{0,413 \cdot 28219,5 - 22,94 \cdot 503,5}{9 \cdot 28219,25 - 253512,3} = 0,2262;$$

$$b = \frac{9 \cdot 22,94 - 503,5 \cdot 0,413}{9 \cdot 28219,25 - 253512,3} = -0,0032.$$

Tuomet tiesinė priklausomybė tarp bandinių kietumo ir jų nudilimo esant pasirinktomis bandymų sąlygomis (28 pav.) yra: $y = -0,0032x + 0,2262$.



28 pav. Bandinio nudilimo priklausomybė nuo bandinio kietumo

Išvados. Laboratorinių bandymų metu nustatyta vidutinė pjūklo įtempimo jėga – 2,2 N. Nustatytas optimalus terminis apdirbimas: grūdinimas 20 min 1000°C, žemas atleidimas atliekamas iki 200 °C temperatūros. Esant šioms temperatūroms pasiekiamas geresnis atsparumas dilimui. Tokio terminio apdirbimo medžiagos galimas pasiekiamas kietumas – 58 HRC.

VI. DILIMO BANDYMAI NATŪRINĖSE SĄLYGOSE

Vykstant dilimo procesui realiose trinties porose sunku identifikuoti kurį nors dilimo tipą. Dažniausiai realiose konstrukcijose pasireiškia kombinuotas kelių dilimo tipų mišinys. Todėl laboratorinėmis sąlygomis dažnai atkartojamas tik dominuojantis dilimo tipas. Kompleksinis dilimo vertinimas įmanomas tik užtikrinant realias eksploataavimo sąlygas. Pjūklų – kreipiančiųjų dilimo pora pavaizduota 29 pav.



29 pav. Pjūklų ir kreipiančiųjų dilimo pora

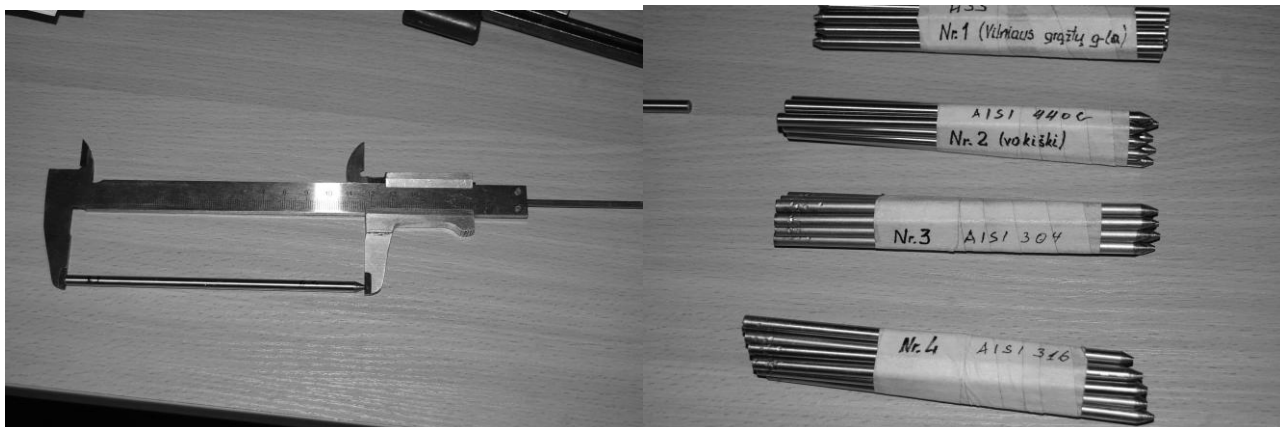
Kaip matyti iš paveikslo, naudojant laboratorinį stendą, yra sudėtinga sukurti tokias pat bandymo sąlygas (pjūklų prispaudimo jėgą, pjūklų pasukimo kampą).

Dėl šių priežasčių, atlikus pjūklų kreipiančiųjų bandymus laboratorinėse sąlygose aprašytus skyriuje (V skyrius), buvo nuspręsta palyginti gautus rezultatus su natūraliomis sąlygomis atliekamų bandymų rezultatais.

Natūriniuose bandymuose tirti AISI 304, AISI 316, AISI M2 ir AISI 440 C nerūdijantys plienai. AISI 440 C atliktas terminis apdirbimas: grūdinimas 20 min 1000°C, aušinimas alyvoje, žemas atleidimas atliekamas iki 200 °C temperatūros. Kiekvienos nerūdijančio plieno markės tirta po 12 bandinių.

Bandinių mechaninis apdirbimas. Bandymuose naudojamos smeigės (bandomosios medžiagos) skersmuo 5 mm, ilgis 95 mm (30 pav.). Visų smeigės paviršių paviršiaus šiurkštumas 0,2 Ra. Toks paviršiaus šiurkštumas gaunamas mechaniškai apdorojant paviršių. Atliekamas šlifavimas naudojant SiC šlifavimo popierių su 400, 800, 1000, 1200, 1500 ir 2000 (Kanchanomi, et al., 2009) dydžio granulėmis. Po šlifavimo paviršius poliruojamas naudojant aliuminio miltelius

(galima naudoti ir pastas) kas užtikrina 0,2 Ra šiurkštumą. Paviršius po apdirbimo nuvalomas acetonu ir nupučiamas suspaustu oru, kad neliktų po apdirbimo mikrodrožlių, kurios gali iškraipyti dilimo kiekio parametrus. Bandiniai apdirbti tenkinant cilindriškumo nuokrypius, kurie yra 0,0012 mm, bei statmenumo nuokrypius, kurie yra 0,0016 mm. Bandinių geometrija pateikta 3 priede.



30 pav. Bandiniai

6. 1. Medžiagų kietumo nustatymas

6. 1. 1. Kietumo nustatymo atlikimo metodika

Kietumo nustatymui naudotas Zwick/Roell universalus kietmatis Zhu 250 (31 pav.). Universalus kietmatis leidžia atlikti matavimus naudojant Brinelio, Vikerso, Rokvelo ir rutuliuko įspaudimo, kietumo nustatymo metodus. Bendros kietmačio charakteristikos pateiktos 19 lentelėje.

Paruošiamajame etape bandiniai sunumeruojami. Pirmas skaičius parodo bandinio medžiagą, antru skaičiumi nurodomas bandinio numeris. Po to matuojamas bandinio skersmuo. Skersmuo nustatomas matuojant bandinio pradžioje, viduryje ir gale. Tuomet nustatomas vidutinis bandinio skersmuo.

Medžiagų kietumas nustatytas naudojant Rokvelo metodą. Bandymo atlikimą Lietuvoje reglamentuoja šie standartai:

LST EN ISO 6508-1:2006 Metalai. Rokvelo kiekio nustatymas. 1 dalis. Bandymo metodas (A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T skalės) (ISO 6508-1:2005);

LST EN ISO 6508-2:2006 Metalai. Rokvelo kiekio nustatymas. 2 dalis. Bandymo mašinų patikra ir kalibravimas (A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T skalės) (ISO 6508-2:2005);

LST EN ISO 6508-3:2006 Metalai. Rokvelo kiekio nustatymas. 3 dalis. Pamatinių plokštelių kalibravimas (A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T skalės) (ISO 6508-3:2005).



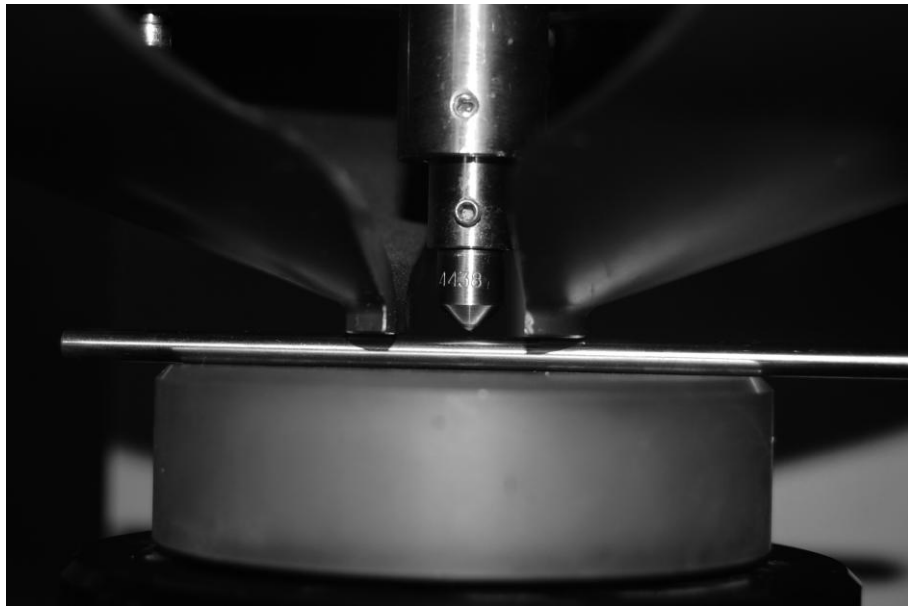
31 pav. Universalus kietmatis Zhu 250

19 lentelė. Universalaus kietmačio Zhu 250 charakteristikos

Bandymo metodai	Skalės
Vickersas	HV1, HV2, HV3, HV5, HV10, HV20, HV30, HV50, HV60, HV100 ir HVT
Knopo	HK1
Brinelis	HBW 1/1 ... 1/30 – HBW 2,5/6,25 ... 2,5/187,5 – HBW 5/25 ... 5/250 – HBW 10/100 ... 10/250 ir HBT
Rokvelis	HR – skalė A, B, C, D, E, F, G, H, K, 15N, 30N, 45N, 15T, 30T, 45T
Rutulio įraižos	H – 49,03 N / 132,39 N / 357,9 N / 961,0 N
Masė	apie 320 kg
Gabaritai (L×B×H)	1200×270×870 mm

Matavimai atlikti C skalėje, tai yra naudojant deimantinį antgalį (32 pav.) esant 1470 N (33 pav.) jėgai.

Kiekvienas bandinys matuotas 3 kartus skirtingose paviršiaus taškuose, po to gauti rezultatai apdorojami statistiniais skaičiavimais.



32 pav. Bandinio kietumo matavimas Zhu 250 kietmačiu



33 pav. Bandyuose naudota apkrova matoma skaitmeniniame Zhu 250 ekrane

6. 1. 2. Rezultatų analizė

Atliktas eksperimento rezultatų statistinis įvertinimas naudojantis (7) – (10) formulėmis. Gauti eksperimentų rezultatai pateikiami 20 – 24 lentelėse.

20 lentelė. Bandinių iš plieno AISI M2 kietumo matavimo rezultatų statistinis įvertinimas

Nr.	Kietumas, HRC					
	1 matavimas	2 matavimas	3 matavimas	Vidurkis	Standartas	Var. koef.
1.1	59,5	59,7	59,5	59,57	0,12	0,19
1.2	59,8	59,8	59,1	59,57	0,40	0,68
1.3	60,6	60,7	60,8	60,70	0,10	0,16
1.4	57,2	59,1	58,7	58,33	1,00	1,72
1.5	59,6	59,1	60	59,57	0,45	0,76
1.6	60,1	59,8	59,9	59,93	0,15	0,25
1.7	60,3	59,3	60,2	59,93	0,55	0,92
1.8	61	61	61,1	61,03	0,06	0,09
1.9	60,8	61,4	60,8	61,00	0,35	0,57
1.10	61,5	60,9	61,4	61,27	0,32	0,52
1.11	60,5	60,8	60,2	60,50	0,30	0,50
1.12	59	58,6	58,9	58,83	0,21	0,35
Bendras				60,02	0,26	0,43

21 lentelė. Bandinių iš plieno AISI 440 C kietumo matavimo rezultatų statistinis įvertinimas

Nr.	Kietumas, HRC					
	1 matavimas	2 matavimas	3 matavimas	Vidurkis	Standartas	Var. koef.
2.1	50,9	51,5	51,5	51,30	0,35	0,68
2.2	55,5	55,5	55,5	55,50	0,00	0,00
2.3	53,3	53,3	53,3	53,30	0,00	0,00
2.4	51,4	51,4	51,4	51,40	0,00	0,00
2.5	55,7	55,7	55,7	55,70	0,00	0,00
2.6	52,9	54	55,9	54,27	1,52	2,80
2.7	55,8	56,5	56,2	56,17	0,35	0,63
2.8	56,2	55	56,5	55,90	0,79	1,42
2.9	55,2	55,6	55,4	55,40	0,20	0,36
2.10	55,6	56,4	56,2	56,07	0,42	0,74
2.11	55,5	55,3	55,3	55,37	0,12	0,21
2.12	55,9	55,7	55,9	55,83	0,12	0,21
Bendras				54,68	0,44	0,81

22 lentelė. Bandinių iš plieno AISI 304 kietumo matavimo rezultatų statistinis įvertinimas

Nr.	Kietumas, HRC					
	1 matavimas	2 matavimas	3 matavimas	Vidurkis	Standartas	Var. koef.
3.1	20,5	20	19,4	19,97	0,55	2,76
3.2	24,1	22,7	23,1	23,30	0,72	3,09
3.3	22,4	22,1	20,2	21,57	1,19	5,53
3.4	21,3	19,5	19,2	20,00	1,14	5,68
3.5	21,8	18,9	19,6	20,10	1,51	7,53

Nr.	Kietumas, HRC					
	1 matavimas	2 matavimas	3 matavimas	Vidurkis	Standartas	Var. koef.
3.6	21,2	17,8	21,2	20,07	1,96	9,78
3.7	24,1	21	22,5	22,53	1,55	6,88
3.8	21,9	22,1	19,2	21,07	1,62	7,69
3.9	22,5	22,5	22,7	22,57	0,12	0,51
3.10	21,5	20	21,4	20,97	0,84	4,00
3.11	21,4	19,7	22,4	21,17	1,37	6,45
3.12	21,8	20,1	19,4	20,43	1,23	6,04
Bendras				21,14	0,52	2,44

23 lentelė. Bandinių iš plieno AISI 316 kietumo matavimo rezultatų statistinis įvertinimas

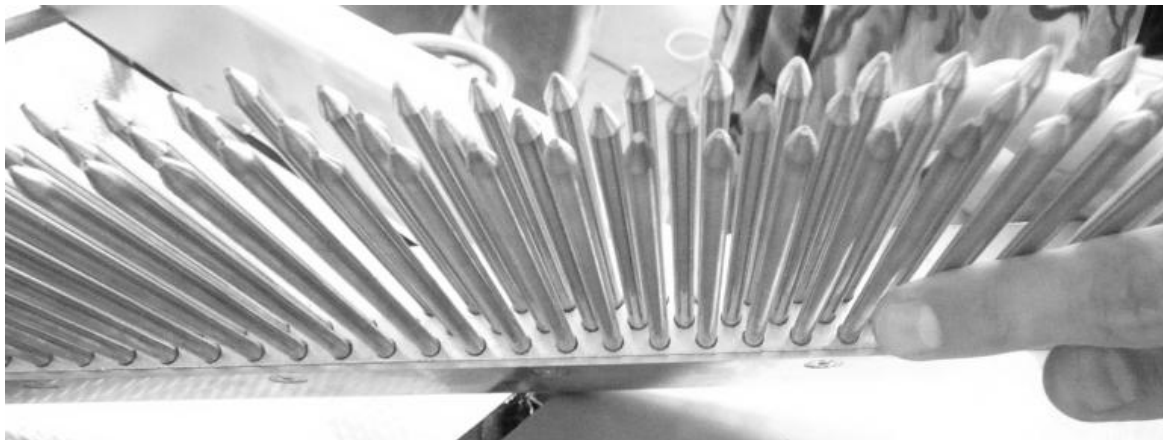
Nr.	Kietumas, HRC					
	1 matavimas	2 matavimas	3 matavimas	Vidurkis	Standartas	Var. koef.
4.1	23,9	19,3	22,4	21,87	2,35	10,73
4.2	23,4	23,8	23,8	23,67	0,23	0,98
4.3	24,9	20,1	24,4	23,13	2,64	11,41
4.4	26,1	25,3	24,4	25,27	0,85	3,37
4.5	25,2	22,2	25,7	24,37	1,89	7,77
4.6	22,4	20,6	19,2	20,73	1,60	7,74
4.7	24	20,5	24	22,83	2,02	8,85
4.8	24	23,3	23,7	23,67	0,35	1,48
4.9	24,8	24,7	22,4	23,97	1,36	5,66
4.10	24,3	23,8	24,5	24,20	0,36	1,49
4.11	25,4	24,4	24,5	24,77	0,55	2,22
4.12	23,4	24,5	24,2	24,03	0,57	2,37
Bendras				23,54	0,85	3,63

Kaip parodo AISI M2 ir AISI 440 C rezultatai, kietumas gan tolygus visoje medžiagoje, nes variacijos koeficientas yra mažesnis nei 5 %. AISI 304 ir AISI 316 variacijos koeficientas kinta iki 10,7 %. Kiečiausias yra plienas iš AISI M2 – 60,02 HRC. Sekantis plienas iš AISI 440 C, kurio kietumas panašus – 54,68 HRC. Ženkliai skiriasi plienų AISI 316 (23,54 HRC) ir AISI 304 (21,14 HRC) kietumas nuo AISI M2 plieno.

6. 2. Natūrinėmis sąlygomis atlikto dilimo bandymo metodika

Natūrinių bandymų metu, bandiniai (kreipiančiosios) sumontuoti į realų įrenginį (juostinę pjaustyklę) ir įrenginys paleistas tuščia eiga 5 valandas. Tokiu būdu nustatomas dilimo

poveikis natūraliomis eksploatacijos sąlygomis. Visų keturių tipų plienų kreipiančiosios sumontuotos į vieną laikiklį (34 pav.).



34 pav. Sumontuoti bandiniai kreipiančiųjų lizde

Pjūklų slydimo greitis kreipiančiųjų paviršiumi ir slydimo kelias apskaičiuojamas pagal formules:

$$v_s = \frac{\pi n R}{30}, \quad (17)$$

$$s = v_s t, \quad (18)$$

čia n – būgno sukimosi greitis, aps/min;

R – varančio būgno spindulys, m;

t – bandymų trukmė; s

v_s – slydimo greitis, m/s;

s – slydimo kelias, m.

Tada:

$$v_s = \frac{3,14 \cdot 165 \cdot 0,135}{30} = 2,33 \left(\frac{m}{s} \right);$$

$$s = 2,33 \cdot 3600 \cdot 5 = 41940 (m).$$

Masės pokytis nustatomas bandinius sveriant prieš ir po dilimo eksperimentų. Bandiniai pasverti elektroninėmis svarstyklėmis KERN (35 pav.)



35 pav. Elektroninės KERN ABS 120-4 svarstyklės

Svarstyklių techniniai parametrai pateikti 24 lentelėje (KERN, ABS 120 – 4).

24 lentelė. KERN ABS 120-4 svarstyklių techniniai parametrai

Skalė	0,1 mg
Didžiausias galimas svoris	120 g
Paklaida	±0,2 mg
Atsako laikas	3 s.
Darbinė temperatūra	+10 °C ... +30 °C
Elektrinis maitinimas	12 V
Svėrimo lėkštės skersmuo	Ø80 mm
Kamera (L × B × H) mm	225 × 315 × 330
Masė	7 kg

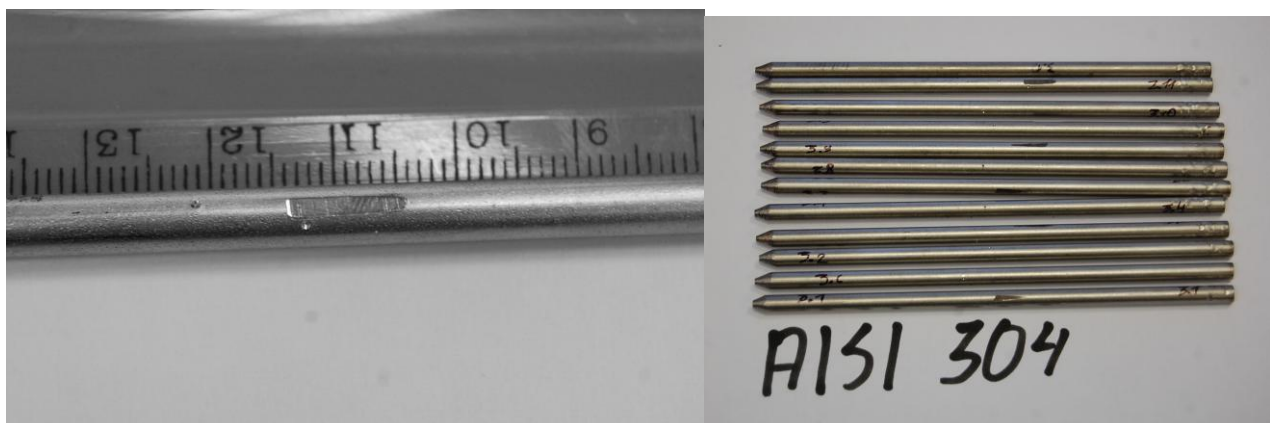
Prieš sveriant, svarstyklės įjungtos ir palaikytos tuščios apie 1h, jog nusistovėtų temperatūra kameros viduje ir neįtakotų matavimo rezultatų. Bandiniai sverti uždaroje aplinkoje, t.y. uždarius kameros dureles (36 pav.), kad išorės veiksniai (temperatūra ir pan.) neiškreiptų matavimo rezultatų.



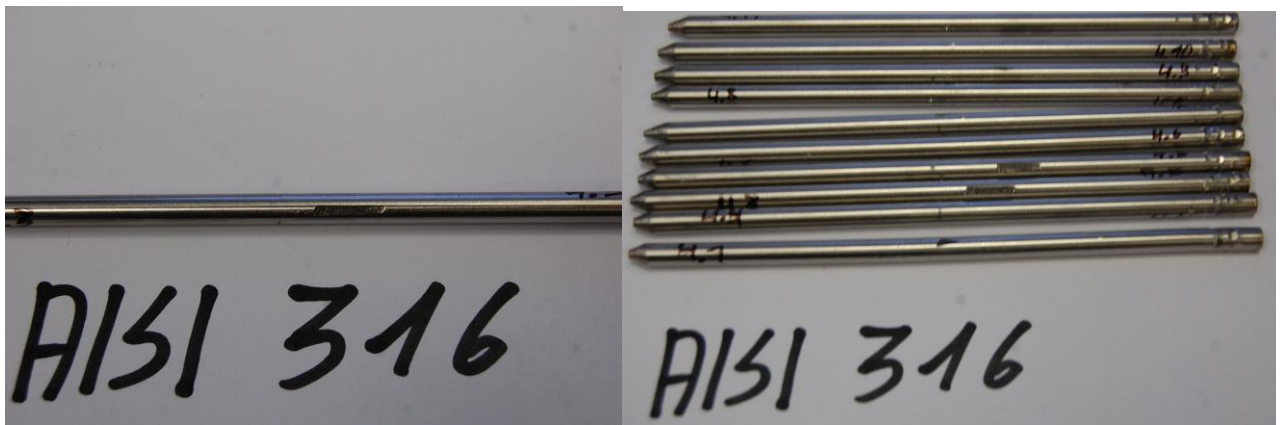
36 pav. Bandinių svėrimas KERN ABS 120 – 4 elektroninėmis svarstyklėmis

6. 3. Natūrinių eksperimentų rezultatų analizė

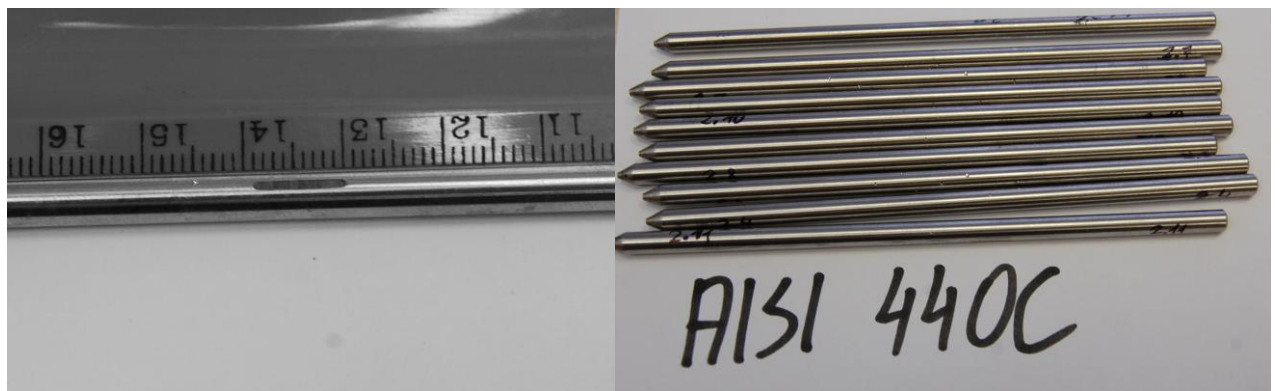
Bandiniai pasverti prieš dilimo bandymą ir po jo (37 - 40 pav.). Po dilimo bandymo bandiniai nuvalyti acetonu, bei po to išdžiovinti, tokiu būdu pašalinant likusias po dilimo mikrodrožles, kurios gali iškraipyti matavimo rezultatus. Gauti rezultatai apdoroti naudojantis (7) - (10) formulėmis. Skaičiavimuose acetonu nevalyti bandiniai nevertinti. Masės pokyčio rezultatai pateikti 24-27 lentelėse.



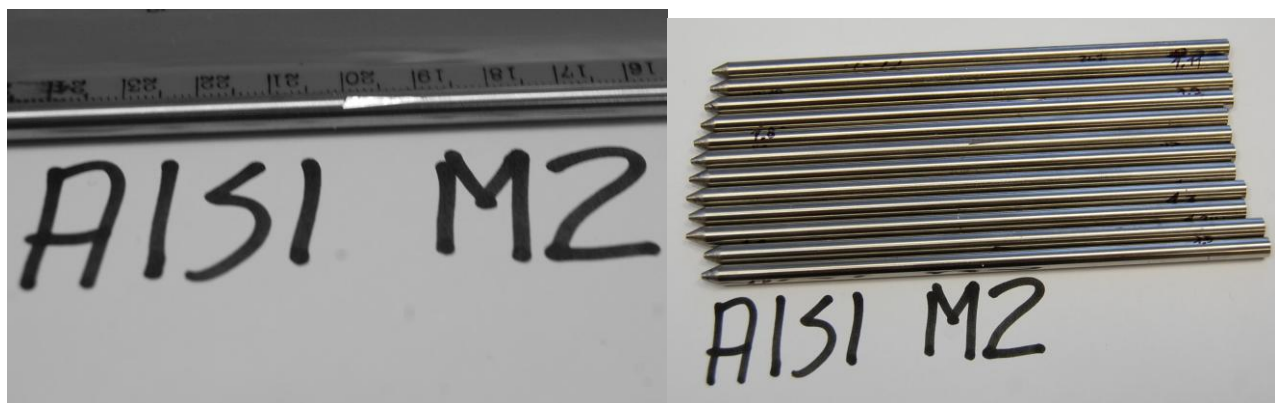
37 pav. Plienas AISI 304 po dilimo eksperimento



38 pav. Plienas AISI 316 po dilimo eksperimento



39 pav. Plienas AISI 440C po dilimo eksperimento



40 pav. Plienas AISI M2 po dilimo eksperimento

Natūrinėmis sąlygomis atlikto eksperimento bandymo rezultatai pateikti grafike (41 pav.).

24 lentelė. Bandinių iš medžiagos AISI M2 masės pokyčio rezultatai

Bandinio Nr.	Masė prieš dilimo bandymą, g	Masė po dilimo bandymo, g	Nudilimas, g	Procentinis masės pokytis, %
1.1	20,1902	20,1884	0,0018	0,0089
1.2	21,0801	21,0787	0,0014	0,0066
1.3	21,2271	21,2256	0,0015	0,0071
1.4	20,9365	20,9357	0,0008	0,0038
1.5	20,2257	20,2237	0,002	0,0099
1.6	20,0193	20,0179	0,0014	0,007
1.7	21,0125	21,0081	0,0044	0,0209
1.8	22,2399	22,2384	0,0015	0,0067
1.9	21,1634	21,1586	0,0048	0,0227
1.10	20,3351	20,3343	0,0008	0,0039
1.11	20,1412	20,1381	0,0031	0,0154
Vidurkis	20,7792	20,7770	0,0021	0,0103
Standartas	0,6698	0,6697	0,0014	0,0065
Var. koef.	3,22	3,22	64,09	63,42

25 lentelė. Bandinių iš medžiagos AISI 440 C masės pokyčio rezultatai

Bandinio Nr.	Masė prieš dilimo bandymą, g	Masė po dilimo bandymo, g	Nudilimas, g	Procentinis masės pokytis, %
2.1	19,7165	19,7144	0,0021	0,0107
2.2	19,7508	19,75	0,0008	0,0041
2.3	19,783	19,7818	0,0012	0,0061
2.4	19,7333	19,733	0,0003	0,0015
2.5	19,79	19,7882	0,0018	0,0091
2.6	19,7783	19,7768	0,0015	0,0076
2.7	19,7178	19,7171	0,0007	0,0036
2.8	19,7325	19,7324	0,0001	0,0005
2.9	19,834	19,8334	0,0006	0,003
2.10	19,7876	19,7872	0,0004	0,002
2.11	19,7104	19,7084	0,002	0,0101

25 lentelės tęsinys

Bandinio Nr.	Masė prieš dilimo bandymą, g	Masė po dilimo bandymo, g	Nudilimas, g	Procentinis masės pokytis, %
Vidurkis	19,7577	19,7566	0,0010	0,0053
Standartas	0,0395	0,0397	0,0007	0,0036
Var. koef.	0,20	0,20	68,09	68,17

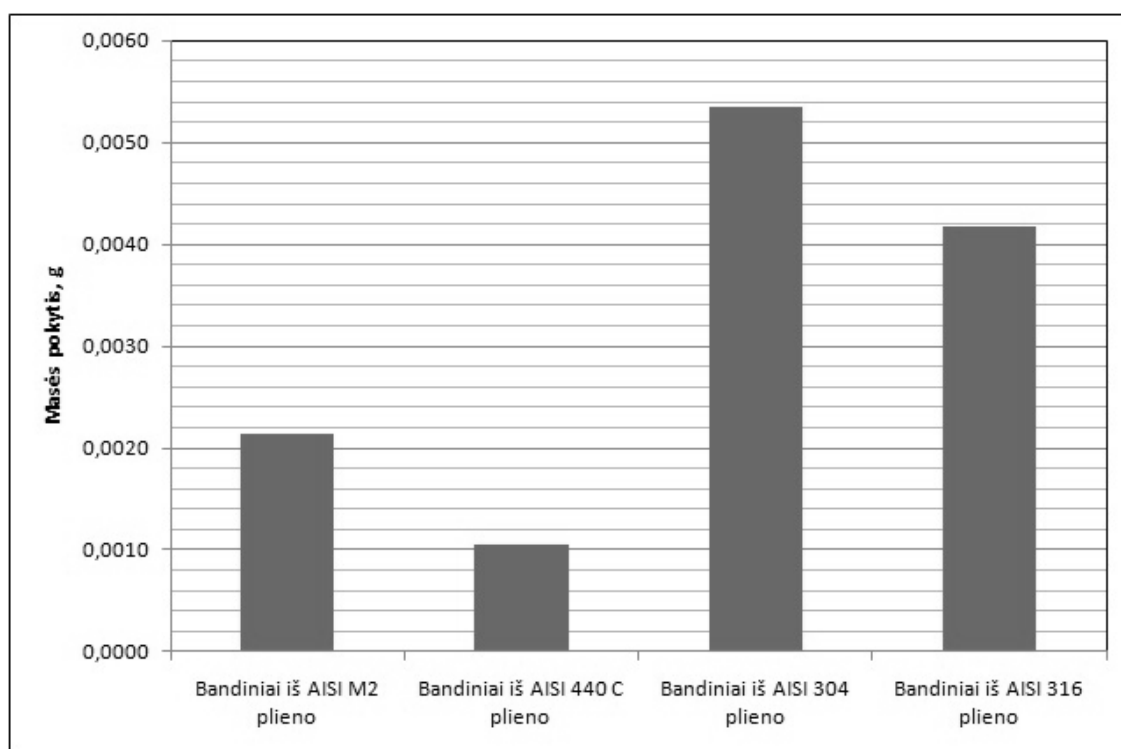
26 lentelė. Bandinių iš medžiagos AISI 304 masės pokyčio rezultatai

Bandinio Nr.	Masė prieš dilimo bandymą, g	Masė po dilimo bandymo, g	Nudilimas, g	Procentinis masės pokytis, %
3.1	20,5787	20,5719	0,0068	0,0331
3.2	20,4273	20,4255	0,0018	0,0088
3.3	20,4223	20,4181	0,0042	0,0206
3.4	20,4818	20,48	0,0018	0,0088
3.5	20,4375	20,428	0,0095	0,0465
3.6	20,504	20,5024	0,0016	0,0078
3.7	20,495	20,4886	0,0064	0,0312
3.8	20,4918	20,4906	0,0012	0,0059
3.9	20,4167	20,4126	0,0041	0,0201
3.10	20,399	20,3976	0,0014	0,0069
3.11	20,4658	20,4457	0,0201	0,0983
Vidurkis	20,4654	20,4601	0,0054	0,0262
Standartas	0,0520	0,0518	0,0056	0,0274
Var. koef.	0,25	0,25	104,48	104,54

27 lentelė. Bandinių iš medžiagos AISI 316 masės pokyčio rezultatai

Bandinio Nr.	Masė prieš dilimo bandymą, g	Masė po dilimo bandymo, g	Nudilimas, g	Procentinis masės pokytis, %
4.1	20,5855	20,5815	0,0040	0,0194
4.2	20,6198	20,618	0,0018	0,0087
4.3	20,5672	20,5562	0,0110	0,0535
4.4	20,5355	20,5341	0,0014	0,0068
4.5	20,595	20,582	0,0130	0,0632
4.6	20,5494	20,548	0,0014	0,0068

Bandinio Nr.	Masė prieš dilimo bandymą, g	Masė po dilimo bandymo, g	Nudilimas, g	Procentinis masės pokytis, %
4.7	20,4471	20,4439	0,0032	0,0157
4.8	20,5609	20,5595	0,0014	0,0068
4.9	20,5588	20,5568	0,0020	0,0097
4.10	20,6133	20,6113	0,0020	0,0097
4.11	20,5685	20,5637	0,0048	0,0233
Vidurkis	20,5637	20,5595	0,0042	0,0203
Standartas	0,0466	0,0461	0,0041	0,0197
Var. koef.	0,23	0,22	96,85	96,80



41 pav. Bandinių iš plienų AISI M2, AISI 440 C, AISI 316, AISI 304 nudilimas

Kaip matyti iš gautų rezultatų, mažiausiai nudilo AISI 440 C ir AISI M2. Mažiausiai atsparus dilimui AISI 304.

Sudaroma bendra medžiagų kietumo ir nudilimo priklausomybė (28 lent.).

Pagal gautus eksperimentinių tyrimų rezultatus, nustatoma tiesinė priklausomybė tarp bandinių dilimo ir medžiagos kietumo naudojantis (12) – (16) formulėmis:

$$a = \frac{0,0621 \cdot 7593,334 - 1,9397 \cdot 159,38}{4 \cdot 7593,334 - 25401,98} = -0,0004;$$

$$b = \frac{4 \cdot 1,9397 - 159,38 \cdot 0,0621}{4 \cdot 7593,334 - 25401,98} = 0,0327.$$

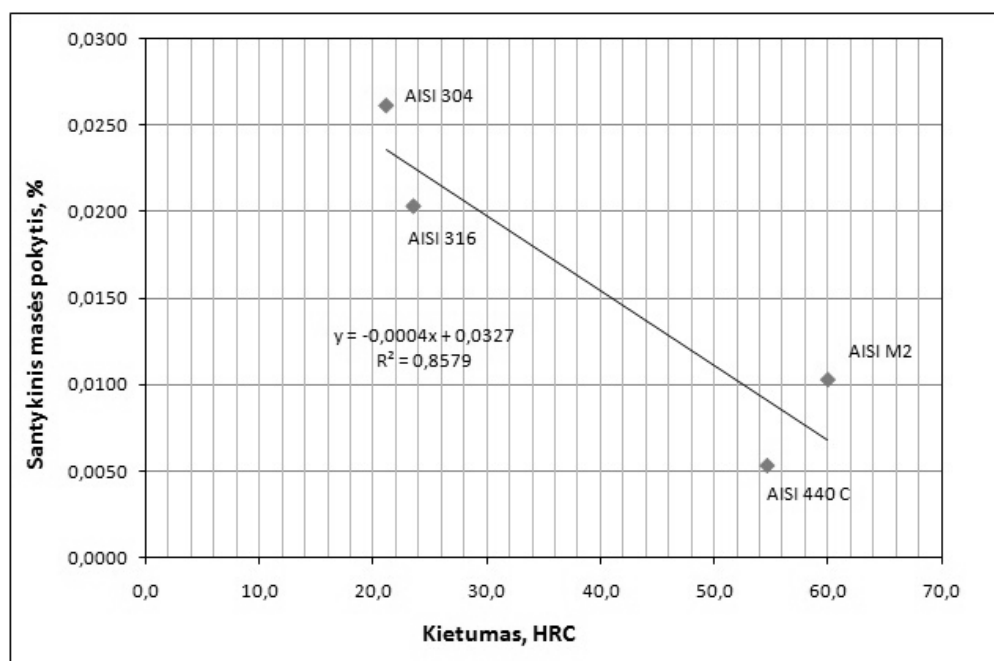
28 lentelė. Plienų AISI M2, AISI 440 C, AISI 304, AISI 316 nustatytas bendras kietumas ir nudilimas

Plieno markė	Kietumas, HRC	Bendras nudilimas, g	Procentinis vidutinis masės pokytis, %
AISI M2	60,02	0,0235	0,0103
AISI 440 C	54,68	0,0115	0,0053
AISI 304	21,14	0,0589	0,0262
AISI 316	23,54	0,046	0,0203

Gaunama tiesinė priklausomybė tarp bandinių nudilimo ir kietumo (42 pav.):

$$y = -0,0004x + 0,0327.$$

Kaip matyti iš grafiko (42 pav.), tarp medžiagos kietumo ir nudilimo yra tiesioginė priklausomybė: didėjant medžiagos kietumui – mažėja medžiagos nudilimas.

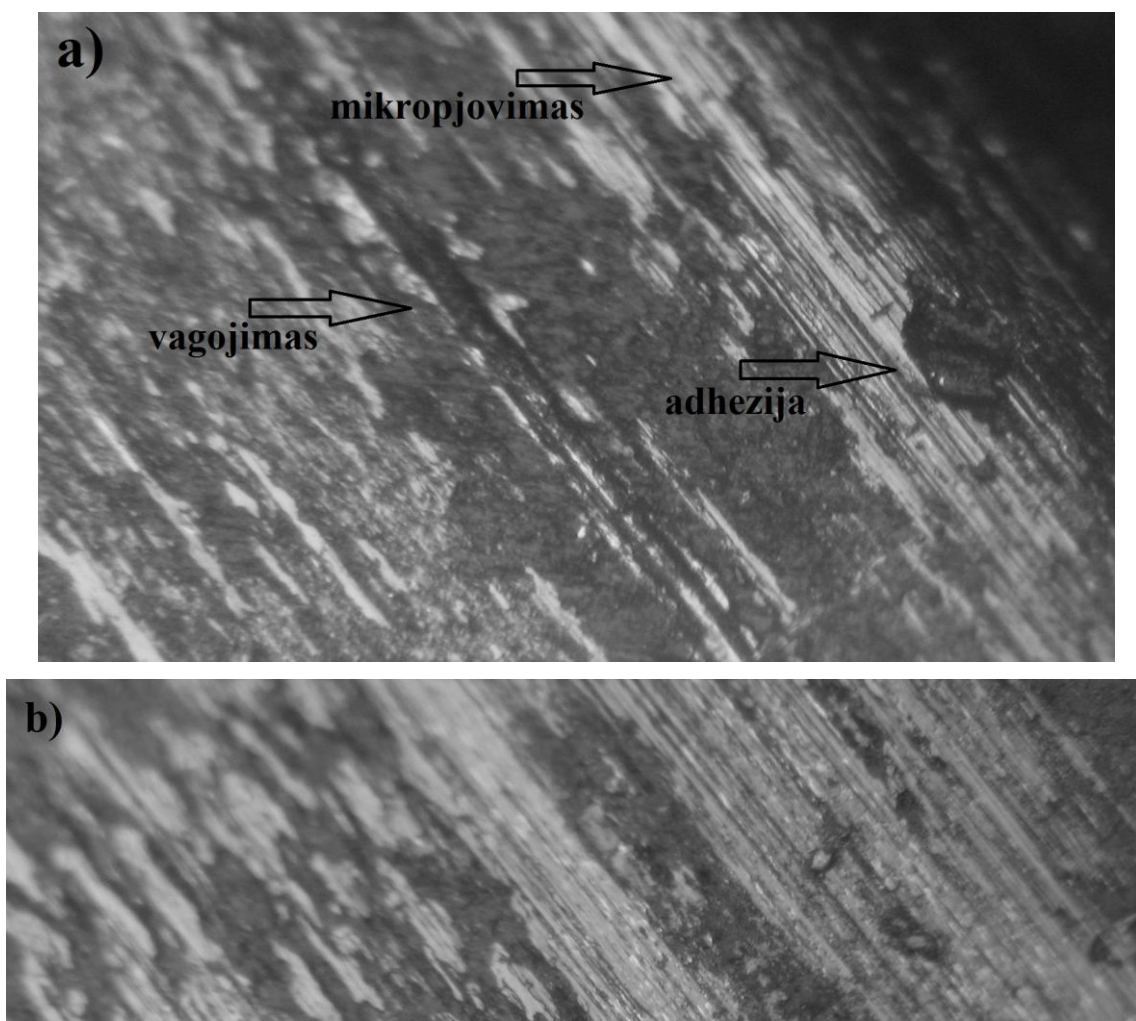


42 pav. Bandinių nudilimo priklausomybė nuo medžiagos kietumo

Atlikus natūrinius bandymus nustatyta, kad atspariausias dilimui yra plienas AISI 440 C. Nors plieno AISI M2 kietumas (60,02 HRC) didesnis nei plieno AISI 440 C (54,68 HRC), bet tai nėra vienintelis faktorius įtakojantis medžiagos atsparumą dilimui. Atliktas terminis apdirbimas, ypač žemasis atleidimas dalį anglies išskiria iš martensito ir sudaro karbidus. Tokia struktūra vadinama atleistuotu martensitu (Speičys ir kt., 2006). Martensitinė struktūra didina medžiagos atsparumą dilimui, kaip teigia autorių (Bahrami A., 2005.) tyrimas.

Žemojo atleidimo tikslas - sumažinti grūdinant atsiradusius vidinius įtempimus taip, kad kuo mažiau suminkštėtų plienas (Speičys ir kt., 2006). Sumažinus vidinius įtempimus mažėja metalo trapumas, t.y., didėja medžiagos tšumas. Medžiagos tšumas kartu su medžiagos kietumu, autorių (Fu et al., 2005) teigimu, didina medžiagos atsparumą dilimui.

Martensitinės struktūros susidarymas ir tšumo padidėjimas lėmė didesnę plieno AISI 440 C atsparumą dilimui, nei plieno AISI M2.



43 pav. Bandinių dilimo proceso paveikti paviršiai: a) minkšto austenitinio plieno, b) kieto martensitinio plieno

Gautiems rezultatams pritaikyti Archard'o matematinio modelio pritaikyti negalimą, nes yra didelė rezultatų sklaida. Ši sklaida parodo, jog atliekant eksperimentą, kreipiančiąsias veikė nevienoda apkrova, todėl tos pačios markės vieni bandiniai nudilo daugiau nei kiti. Netolygiai veikiančią apkrovą, taip pat įrodo bandinių nudilusio paviršiaus nuotraukos (43 pav.). Paviršiuje matyti 3 skirtingos dilimo zonos (43a pav.): abrazyvinis mikropjovimas, abrazyvinis vagojimas (Bhushan et al., 2001, 275 p.) ir adhezijos procesas. Vagojimo procesas parodo dilimo proceso sąlygų pakitimą – pjūklo prispaudimo jėgos pokytį. To priežastis – duonos pjaustymo įrenginio detalių ir surinkimo proceso netikslumai.

Austenitiniuose plienuose (AISI 304 ir AISI 316) pastebimas ryškesnis adhezijos procesas, kurio metu išplėstas medžiagos tūris galimai aštrina abrazyvinio dilimo procesą (Hua et al. 2008). Adhezijos procesas austenitiniuose plienuose yra dažnas reiškinys ir dominuojantis dilimo procesas esant metaliniam kontrakūnui (Hashemi et al. 2011).

Kietesniuose plienuose (AISI M2 ir AISI 440 C) matomas dominuojantis abrazyvinis dilimo procesas (43b pav.). Adhezijos procesas nežymus.

Kaip ir minėta II skyriuje, dėl aplinkos kintamumo, dilimo rezultatai skiriasi visais tirtais atvejais, kaip ir matyti lyginant natūrinius su laboratorinėmis sąlygomis atliktais bandymais. Todėl dilimo intensyvumo koeficiento skaičiavimas nesuteiktų tikslios informacijos apie dilimo procesą. Dėl šios priežasties patikimiausia dilimo bandymus atlikinėti natūrinėmis sąlygomis. Lyginant natūrinėmis ir laboratorinėmis sąlygomis atliktus eksperimentus, matomas bendras dėsningumas – AISI 440 C ir AISI M2 plienų atsparumas dilimui panašus, tačiau natūrinėmis sąlygomis AISI 440 C nerūdijantis plienas atsparesnis dilimo procesui, priešingai nei parodė laboratorinėmis sąlygomis atlikti eksperimentai.

IŠVADOS

1. Mokslinių tyrimų apžvalgos ir analizės metu nustatyta, jog indentifikuojamas didesnis atsparumas dilimui esant porėtai medžiagai prisotintai tepimo agentu (be tepimo agento, porėtumas turi neigiamą poveikį dilimo atsparumui). Terminis apdirbimas padidina plieno atsparumą dilimui, kuomet atleidimo temperatūra yra iki 350 °C, nes gaunamas tuo pat metu aukštas medžiagos tūsumas ir kietumas, vienam iš jų mažėjant mažėja ir atsparumas dilimui. Nustatyta, jog atlikta homogenizacija taip pat padidina atsparumą dilimui. Legiruojantys elementai niobis ir titanas neturi ryškios įtakos dilimo atsparumui. Didesnis atsparumas pasiekiamas naudojant legiruotus elementus tokius kaip molibdenas, vanadis ir boras.

2. Atlikus norminių dokumentų apžvalgą, nustatyta, kad eksploatuojamos medžiagos maisto pramonės įrenginiuose turi neprieštarauti LR higienos normai HN 16. Plieno šiurkštumas turi neviršyti LST EN 13954:2006 standarto reikalavimų - ≤54 Rz. Todėl remiantis atlikta medžiagų apžvalga bei reikalavimais maisto pramonėje, tyrimams parinkti AISI 304, AISI 316, AISI 440C nerūdijantys plienai. AISI M2 plienas pasirinktas kaip ribinė medžiaga, nusakanti tinkamą atsparumą dilimui.

3. Eksperimentiniu būdu išmatuota pjūklų kreipiančiąsias veikianti pjūklų kontaktinė-prispaudimo jėga, rekomenduojama išlaikyti pastovią 2,2 N jėgą. Laboratorinėmis sąlygomis atliktų dilimo eksperimentų metu nustatytas AISI 440C optimalus terminis apdirbimas: grūdinimas atliekamas 20 min. 1000 °C, žemas atleidimas atliekamas iki 200 °C temperatūros. Mažiausių kvadratų metodu nustatyta tiesinė priklausomybė tarp bandinių nudilimo ir medžiagos kietumo:

$$y = -0,0032x + 0,2262.$$

4. Atlikus kietumo nustatymo bandymus, nustatyta, jog kiečiausias yra plienas AISI M2 (60,02 HRC). Plieno AISI 440 C kietumas 54,68 HRC. AISI 316 plieno kietumas 23,54 HRC ir plieno AISI 304 kietumas 21,14 HRC. Atlikus natūrinius bandymus nustatyta, jog kreipiančiosios nevienodai liečiasi su besisukančiais peiliais, todėl nudilusio masės kiekio variacijos koeficientas yra apie 60 proc. Labiausiai atsparūs dilimui bandymo metu buvo bandiniai iš grūdinto nerūdijančio AISI 440 C (santykinis masės netekimas 0,0053 %) plieno. Plieno AISI 440 C didesnę atsparumą dilimui, negu kietesniam plienui AISI M2, lemia terminis apdirbimas (žemasis atleidimas), kurio metu dalis anglies išsiskiria iš martensito ir sudaro karbidus. Šį struktūrą pasižymi didesniu medžiagos atsparumu dilimui.

5. Atlikus duonos pjaustymo įrenginio (DPPL) dilimo tyrimą nustatyta pjūklų kreipiančiųjų medžiagos nudilimo priklausomybė nuo kreipiančiųjų medžiagos kietumo. Gauti rezultatai apibendrinti mažiausių kvadratų metodu: $y = -0,0004x + 0,0327$. Optiškai padidinus

nudilusias bandiniuose zonas pastebėta, kad minkštuose (AISI 304 ir AISI 316) austenitiniuose nerūdijančiuose plienuose vyrauja abrazyvinis ir adhezijos dilimo procesai. Tai patvirtina ir kituose moksliniuose tyrimuose atlikti panašūs eksperimentai. Kietuose plienuose (AISI M2 ir AISI 440 C) pastebimas dominuojantis abrazyvinis dilimo procesas. Plienas AISI 440 C rekomenduojamas pjūklų kreipiančiųjų gamybai.

LITERATŪRA

1. Aksoy M., Kuzucu V., Korkut M. H., et al. 1999. The effect of niobium and homogenization on the wear resistance and some mechanical properties of ferritic stainless steel containing 17 – 18 wt.% chromium. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 91, p. 172–177.
2. Aksoy M., Yilmaz O., Korkut M. H. 2001. The effect of strong carbide-forming elements on the adhesive wear resistance of ferritic stainless steel. *Wear*, vol. 249, p. 639–646.
3. Archard J. F. 1953. Contact and rubbing of flat surfaces. *Applied physics*, vol. 24, p. 981–988.
4. ASTM G 99 – 04. Standart Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 2004.
5. ASTM G 132 – 96. Standart Test Method for Pin Abrasion Testing. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials International, 2001.
6. Babakhani A., Haerian A., Ghambri M. 2008. Effect of heat treatment, lubricant and sintering temperature on dry sliding wear behavior of medium alloyed chromium PM steels. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 204, p. 192–198.
7. Bahrami A., Mousavi Anijdan S. H., et. al. 2005. Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel. *Wear*, vol. 258, p. 846-851.
8. Bateni M. R., Szpunar J. A., Wang X., et. al. 2006. Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel. *Wear*, vol. 260, p. 116–122.
9. Bermúdez M. D., Iglesias P., Jiménez A. E., et al. 2009. Influence of sliding frequency on reciprocating wear of mold steel with different microstructures. *Wear*, vol. 267, p. 1784–1790.
10. Bhushan B., Gupta B. K. 1991. *Handbook of tribology: materials, coatings and surface treatments*. New York: McGraw-Hill.
11. Bhushan B. 2001. *Modern tribology handbook*. Boca Raton: CRC Press.
12. Bradley M. S. A., Bingley M. S., Pittman A. N. 2000. Abrasive wear of steels in handling of bulk particulates: an appraisal of wall friction measurement as an indicator of wear rate. *Wear*, vol. 243, p. 25–30.
13. Bressan J. D., Daros D. P., Sokolowski A., et. al. 2008. Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 205, p. 353–359.

14. Büscher R., Fischer A. 2003. Sliding wear behaviour of an electrochemically modified austenitic high-nitrogen steel surface. *Wear*, vol. 254, p. 1318–1325.
15. Dahlke M. G., Dąbrowski J. R., Dąbrowski B. 2007. Characteristic of the porous 316 stainless steel for the friction element of prosthetic joint. *Wear*, vol. 263, p. 1023–1029.
16. Farias M. C. M., Souza R. M., Sinatora D. K., et al. 2007. The influence of applied load, sliding velocity and martensitic transformation on unlubricated sliding wear of austenitic stainless steels. *Wear*, vol. 263, p. 773–781.
17. Fu H., Xiao Q., Fu H. 2005. Heat treatment of multi-element low alloy wear-resistant steel. *Materials Science and Engineering A*, vol. 396, p. 206–212.
18. Glaeser W. 1992. *Materials for tribology*. Amsterdam: Elsevier.
19. Godet M. 1988. Modeling of friction and wear phenomena. *Approaches to modeling wear*, p. 12–36.
20. Hashemi B., Yazdi M. R., Azar V. 2011. The wear and corrosion resistance of shot peened-nitrided 316L austenitic stainless steel. *Materials and design*, vol. 32, p. 3287–3292.
21. Grzesik W., Zalisz Z., Krol S., et al. 2006. Investigations on friction and wear mechanisms of the PVD-TiAlN coated carbide in dry sliding against steels and cast iron. *Wear*, vol. 261, p. 1191–1200.
22. Hegadekatte V., Kurzenhäuse S., Huber N., et al. 2008. A predictive modeling scheme for wear in tribometers. *Tribology International*, vol. 41, p. 1020–1031.
23. Hua M., Wei X., Li J. 2008. Friction and wear behavior of SUS 304 austenitic stainless steel against Al₂O₃ ceramic ball under relative high load. *Wear*, vol. 265, p. 799–810.
24. Iliuc I. 2006. Wear and micropitting of steel ball sliding against TiN coated steel plate in dry lubricated conditions. *Tribology International*, vol. 39, p. 607–615.
25. Janutienė R. K. 2005. *Medžiagų markių žymėjimas*. Kaunas: Technologija.
26. Kanchanomi C., Saengwichian B., Manonukul A. 2009. Delamination wear of metal injection moulded 316L stainless steel. *Wear*, vol. 267, p. 1665–1672.
27. Karger-Kocsis J., Mousa A., Major Z., et al. 2008. Dry friction and sliding wear of EPDM rubbers against steel as a function of carbon black content. *Wear*, vol. 264, p. 359–367.
28. Kim J. H., Lee K. Y., Ko K. H., et al. 2009. The effects of nickel and carbon concentrations on the wear resistance of Fe-Ni-C austenitic alloys. *Wear*, vol. 266, p. 1137–1140.
29. LST EN 13954:2006. *Maisto perdirbimo mašinos. Duonos pjaustytuvai. Saugos ir higienos reikalavimai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
30. Narmontas D. 2008. *Techninių sistemų patikimumas*. Klaipėda: Klaipėdos universitetas.
31. Pavaras A., Žvinys J. 1995. *Plienai*. Kaunas: Technologija.

32. Puškorius S. 2001. Matematiniai metodai vadyboje. Vilnius: TEV.
33. Rabinowicz E. 1965. Friction and wear of materials. Wiley.
34. Riviere J. P., Meheust P., Villain J. P. 2002. Wear resistance after low-energy high-flux nitrogen implantation of AISI 304L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, vol. 158–159, p. 647–652.
35. Serapinas V. 1999. Tribologiniai procesai kinematinėse porose. Kaunas: Technologija.
36. Speičys V., Pipevičius A. 2006 Mokymo modulis. Terminio apdorojimo technologijos. Vilnius: Profesinio mokymo metodikos centras.
37. Šniuolis R. 2004. Inžinerinės medžiagos. Šiauliai: Lucilijus.
38. Uzunsoy D. 2010. Investigations of dry sliding wear properties of boron doped powder metallurgy 316L stainless steel. *Materials and Design*, vol. 31, 3896–3900.
39. Valstybės žinios. 2010 06 17. Dėl Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2006 m. gegužės 5 d. įsakymo Nr. V-371 "Dėl Lietuvos higienos normos HN 16:2006 "Medžiagų ir gaminių, skirtų liestis su maistu, specialieji sveikatos saugos reikalavimai" patvirtinimo" pakeitimo. V-557, Nr.72-3667.
40. Viáfara C. C., Castro M. I., Vélez J. M., et al. 2005. Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels. *Wear*, vol. 259, p. 405–411.
41. Williams J. A. 1999. Wear modeling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. *Wear*, vol. 225–229, p. 1–17.
42. Yang L. J. 2005. A test methodology for the determination of wear coefficient. *Wear*, vol. 259, p. 1453–1461.
43. Zandrahimi M., Reza bateni M., Poladi A., et al. 2007. The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel. *Wear*, vol. 263, p. 674–678.
44. Гелин Ф. Д. 1987. Металлические материалы. Минск: Вышэйшая школа.
- Godet M. 1988. Modeling of friction and wear phenomena. *Approaches to modeling wear*, p. 12–36.

PRIEDAI

14 lentelė. Atsparūs dilimui plienai ir ketus

Markė pagal GOST standartą	Stiprumo riba, MPa	Kietumas, HB	Savybės, panaudojimas
Legiruoti konstrukciniai plienai			
15Г	412	163	Cementuojamos ir cianuojamos detalės, kurios turi būti atsparios dilimui, bet jų šerdies mechaninės savybės gali būti nelabai tinkamos: mažo galingumo variklių stūmoklių pirštai, lingių pirštai, trinties diskai, kumštelinčiai velenai, nesvarbūs krumpliaračiai ir sliekračiai. Šių plienų įgrūdinimas didesnis, negu anglinių, bet jie jautresni perkaitinimui. Iš jų taip pat gaminamos nesvarbios kniedės. Jos naudojamos po grūdinimo ir aukštojo atleidimo.
20Г	451	179	
45X	1030	229	Detalės su slydimo paviršiumi, kurių neveikia didelės smūginės apkrovos: velenai, ašys, stambūs krumpliaračiai, pirštai, įvorės.
50X	1079	229	
50Г	647	229	Detalės su slydimo paviršiumi: trinties diskai, alkūniniai velenai, švaistikliai, paskirstymo velenėliai, nesvarbūs krumpliaračiai
30XГФ			Didelių apkrovų veikiamos atsakingos detalės su slydimo paviršiais: ašys, svirtys, pusašiai.
40XГГР			
38X2MЮA	981	229	Svarbios įzotintamos trinčiai atsparios detalės: vidaus degimo variklių cilindrai, velenai, paskirstymo velenėliai, lrumpliaračiai, pirštai, prietaisų detalės
Įrankiniai plienai			
Y12		212	Kieti, atsparūs dilimui, bet neatsparūs smūgiams
Y13		217	
X12		255	Labai atsparūs dilimui šalto deformavimosi šampai (dažniausiai su apskrita darbine dalimi), kurie neveikiami stiprių smūginių apkrovų;
X12BМФ		255	
X12MФ		255	Tas pats, kaip ir X12 markės plieno, bet tada, kai reikia didesnio tūsumo
X12Ф1		255	
Greitapjūviai plienai			
P6M5Ф3		269	
P12Ф3		269	
P18K5Ф2		285	
P9K5		269	
P6M5K5		269	
P9M4K8		285	
P2AM9K5		285	
Šalto lakštinio šampavimo šampams plienai			
X6BФ			Atsparūs dilimui lakštinio šampavimo šampai gaminami iš šampinių plienų, turinčių apie 6% chromo. Šie plienai stipresni ir atsparesni dilimui, palyginti su legiruotais įrankiniais plienais. Jų struktūroje yra apie 10-15% kietų,
8X6HФГ			
9X5BФ			

Markė pagal GOST standartą	Stiprumo riba, MPa	Kietumas, HB	Savybės, panaudojimas
			atsparių dilimui karbidų, didinančių štampos atsparumą dilimui. Iš paminėtų plienų Lietuvoje naudojamas tik X6BΦ – dažniausiai sriegių valcavimo žiaunoms gaminti
Šalto tūrinio deformavimo šlampams plienai			
X12			Atspariausi dilimui yra šie ledeburitinės klasės šampiniai plienai, turintys 12% Cr. Juose perteklinių karbidų yra 12-24%. Tačiau daugėjant karbidų, blogėja jų pasiskirstymo tolygumas, mažėja plieno stiprumas ir smūginis tūsumas. Tokie šampai greičiau ištrupa
X12M			
X12BM			
X12Φ1			
X12MΦ			
Nerūdijantys plienai			
95X18			Labai kietiems rutuliniams guoliams naftos įrenginiams, geros kokybės peiliams, įvorėms ir kitoms greitai dylančioms detalėms
20X17H2			Rekomenduojamas kaip labai stiprus plienas smarkiai apkrautoms detalėms, kurios turi būti atsparios dilimui ir smūgiams nelabai agresyviose terpėse
KETUS			
Liejiniai iš atsparaus karščiui ketaus			
ЖЧХ		207-286	Padidintas korozinis atsparumas dujinėje, atmosferinėje, šarminėje aplinkoje esant trinties ir dilimo sąlygoms. Atsparus karščiui ore iki 500°C
ЖЧХ2		207-286	Tas pats tik atsparus karščiui ore iki 600°C.
ЖЧХ3		228-364	Tas pats tik atsparus karščiui ore iki 650°C.
ЖЧХ16		400-450	Atsparus karščiui ore iki 900oC, atsparus dilimui esant normalioms ir padidintoms temperatūroms, atsparus didelės koncentracijos neorganinių rūgščių poveikiui
ЖЧХ30		364-550	Atsparus rūgščiai, temperatūrai ore iki 1100°C. Atsparumas sieruotose aplinkose prieš abrazyvinį dilimą. Didelis kietumas esant normalioms ir aukštomis temperatūroms.
Kalusis ketus			
KЧ80-1,5	784	270-320	Detalės eksploatuojamos esant sunkioms statinėms ir dinaminėms apkrovoms bei dilimui: alkūniniai ir paskirstymo velenai, korpusai, kronšteinai
Stiprusis ketus			
BЧ80	800	248-351	Geležinkelio, krovinio transporto, žemės ūkio, kalnakasybos mašinų krumpliaračiai, atsparios dilimui ir labai apkrautos detalės
Antifrikinis ketus			
AЧC-1		220	Žemas trinties koeficientas, mažas slystančių paviršių dilimas. Antifrikinis ketus yra pigus, pakankamai stiprus, tačiau jautrus smūgiams. Ketuje esantis grafitas atlieka kietojo tepalo funkcija. Ištrupėjęs grafito intarpams iš darbinio paviršiaus, atsiradusiose tuštumose gerai laikosi tepalas. Antifrikinis
AЧC-2		190	
AЧC-3		170	
AЧC-5		240	

Markė pagal GOST standartą	Stiprumo riba, MPa	Kietumas, HB	Savybės, panaudojimas
AЧC-6			ketus turi būti minkštesnis už poroje dirbančią detalę, todėl tepamojoje trinties poroje su atkaitintu arba termiškai neapdirbtu plienų geriausias antifrikcines savybes turi perlitinis feritinis kalusis ketus (187...197 HB) su 60-70% perlito. Poroje su grūdintu plienų mažiausiai dyla perlitinis kalusis ketus (220...260 HB) su 90-100% perlito. Kai sausa trintis patenkinamai dirba perlitinis feritinis kalusis ketus.
Atsparus dilimui ketus			
ЧН4Х2			Atsparios dilimui mašinų detalės; malūnų iškloja; valcai
ЧХ9Н5			Anglies ir metalų rūdos malūnų detalės; abrazyvinių srautų veikiamos detalės
ЧХ28Д2			

2 priedas

15 lentelė. Plieno ir ketaus markių palyginimas

GOST	Vok. DIN	Pranc	Ang BS	Ital. UNI	Šved. MNC	JAV ASTM, AISI	Jpn. JIS	EURO ir EN	ISO
Plienas									
38X2M ЮА	41 CrAlMo 7	40 CAD 6*12	905 M 39	$\frac{41\text{CrAlMo } 7}{38\text{CrAlMo } 7}$ 3kat.	2940 ⁻⁰⁴ ₋₀₃ 1kat.	Class A 3		41 CrAlMo 7 1kat.	41 CrAlMo 7 1kat.
45X	45 Cr 2			45 Cr 2	2120 ⁻⁰⁴ ₋₀₃ 3kat.		SMn 443	45 Cr 2	Type 6 1kat.
Y12		Y2 120	BW1C				SK2		
Y13	C 125 W								
X12	X 210 Cr 12	Z200Cr1 2	BD3	X205Cr1 2KU					
X12BM Φ				X165CrM oW12KU					
X12BM	X210Cr V12								
X12MΦ		Z160CD V12	BD2, BD2A	X155CrM o121K		D4	SKD11		
P12Φ3	S 12-1-2								
P6M5K5	S 6-5-2-5								
95X18 1kat.	X 102 CrMo 17	Z 40 C 14		X 105 CrMo 17 1kat.		Type 440 C 3kat.	SUS 420 J2	X 100 CrMo 17 1kat.	
20X17H 2 1kat	X 20 CrNi 17 2	Z 100 CD 17	431 S 29 2kat	X 16 CrNi 16 1kat.	2321 2kat	Type 431 C 3kat	SUS 440 C	X 21 CrNi 17 2kat.	Type 9b
Ketus									
KЧ80- 1,5								EN- GJMB- 800-1	
BЧ80	GGG-80							EN-GJS- 800-2	
AЧC-1	GG- 220HB								
AЧC-2	GG- 190HB								
AЧC-3	GG- 170HB								
AЧC-5	GG- 240HB								
ЧН4Х2	G-X 260NiCr 4 2								
ЧХ9Н5	G-X 300CrNi Si9 5 2								
ЧХ28Д2	G-X 260Cr27								