

Juha Pihlaja

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 9
No. 4 1976 s. 1...16

YHTEENVETO: Artikkelissa tarkastellaan metallien jännitys-venymäominaisuuksia ja kykyä sitoa liike-energiaa nopeissa kuormituksissa. Näitä tietoja tarvitaan ydinvoimaloissa mahdollisesti tapahtuvista onnettomuuksista aiheutuvien vaurioiden torjumisen suunnittelussa. Vertailevaan tarkasteluun on otettu kupari, alumiini, tavallinen rakenneteräs ja ruostumaton teräs. Lähdeaineistona on käytetty suurimmaksi osaksi Yhdysvalloissa tehdyistä kokeista julkaistua kirjallisuutta.

JOHDANTO

Ydinvoimala asettaa rakenteiden suunnittelulle monessa suhteessa toisenlaisia vaatimuksia kuin mihin tavallisten teollisuusrakennusten yhteydessä on totuttu. Monissa oletetuissa onnettomuustapauksissa syntyvät kuormat ja kuormitusnopeudet ovat sitä luokkaa, että niitä ei pystytä vastaanottamaan rakenteilla, joissa jännitykset pysyvät myötörajan alapuolella. Suurista massoista ja nopeuksista syntyvät liike-energiat on eliminointava tuki- ja suojarakenteisiin tulevilla plastisilla siirtymillä. Onnettomuuden tapahtuttua vaurioitunut rakenne poistetaan ja korvataan uudella. Mitoitus suoritetaan siis vain yhtä kuormituskertaa varten.

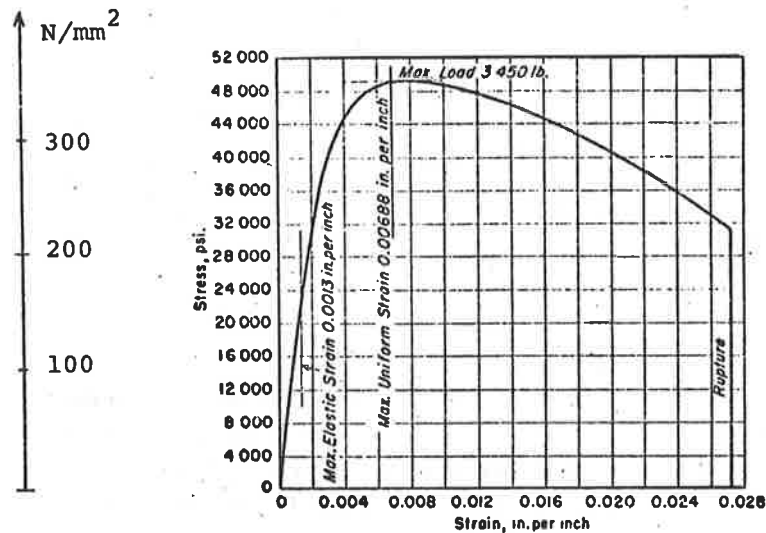
Tällaisen kertakuormitetun rakenteen tärkeimmäksi suunnitteluperusteeksi tulee näin ollen kyky sitoa energiaa. Energiansitomiskyky on parhaimmillaan silloin, kun rakenteeseen saadaan ilman murtumaa syntymään suuri plastinen muodonmuutos, ja voima-siirtymäkäyrän sisälle jäävä pinta-ala on mahdollisimman suuri.

JÄNNITYS-VENYMÄSUHTEET JA KUORMITUSNOPEUS

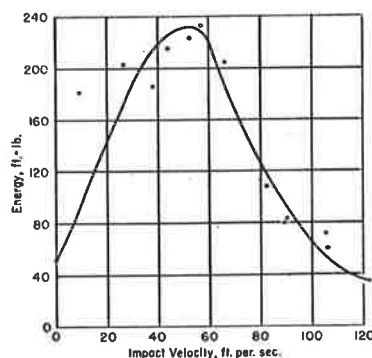
Kupari ja alumiini

Kuvassa 1 nähdään puhtaan kuparin jännitys-venymäkäyrä staattisessa vetokokeessa $1/1:n$ mukaan. Koekappaleen pituus on ollut 8 tuumaa (203,2 mm) ja halkaisija 0,3 tuumaa (7,6 mm). Käyrästä voidaan havaita jännityksen ja venymän kasvavan alussa tasaisesti, kunnes alkaa tapahtua myötäämistä, joka

jännityksen noustessa lisääntyy. Määrätyllä kuormalla jännitys ei enää kas-
va, vaan se alkaa laskea venymän kuitenkin jatkuessa. Maksimikuormaan asti
venymä on jakautunut tasaisesti sauvan koko pituudelle. Tämän jälkeen myö-
tölujittuminen loppuu ja kappaleeseen syntyy kuroutuma, joka aiheuttaa lo-
pullisen murtumisen. Suurin kimmoinen venymä on ollut 0,13 %, suurin tasai-
nen venymä 0,688 % ja kokonaisvenymä n. 2,7 %. Kulunut energia saadaan mää-
ritetyksi käyrän sisään jäävästä pinta-alasta.



Kuva 1. Kuparin staattinen jännitys-venymäkäyrä /1/.



Kuva 2. Sitoutuneen energian riippuvuus iskunopeudesta kuparilla /1/.

Edellä oleva koski staattista kuormitusta, ts. kuormitusnopeus on ollut
lähellä nollaa. Jos kuormitusnopeutta nostetaan, materiaali käyttäytyy eri
tavalla. Kuvassa 2 on esitetty samanlaisten kuparikappaleiden sitoma ener-
gia kuormitusnopeuden funktiona. Kokonaisvenymän vaihtelu samoilla nopeuk-
silla on nähtävissä kuvasta 3. Sekä energia että venymä kasvavat staatti-
sesta arvosta moninkertaiseksi nopeuteen 50 jalkaa sekunnissa (15 m/s) saak-

ka, jonka jälkeen molemmat alkavat jälleen pienentyä. Tämä nopeus on kuparin kriittinen nopeus (critical velocity). Kunkin aineen kriittinen nopeus voidaan teoreettisesti määrittää esim. von Karmanin menetelmällä /2/, mutta käytännössä se ilmenee materiaalien nopeiden kuormituskokeiden yhteydessä sinä nopeutena, jonka jälkeen energiansitomiskyky ja kokonaisvenymä alkavat pienentyä jyrkästi.

Kuvassa 4 on piirretty alumiinille jännitys-venymäkäyrät kolmella erilaisella kuormitusnopeudella /3/. Käyrät osoittavat, että myös alumiinilla energiansitomiskyky ja kokonaisvenymä kasvavat huomattavasti kuormitusnopeuden noustessa. Samasta kuvasta käy ilmi nopealle kuormitukselle hyvin tyypillinen seikka, viivästynyt myötö. Kimmoinen jännitys kohoaa ensin suhteellisen korkealle ennenkuin aine plastisoituu. Myöddön jälkeen jännitys alenee, mutta nousee uudelleen plastisen venymän kasvaessa. Esim. nopeudella 45,7 m/s myötöraja on paljon korkeampi kuin varsinainen murtoraja. Alumiinin kriittinen nopeus artikkelin /4/ mukaan on yleensä suurempi kuin 60 m/s.

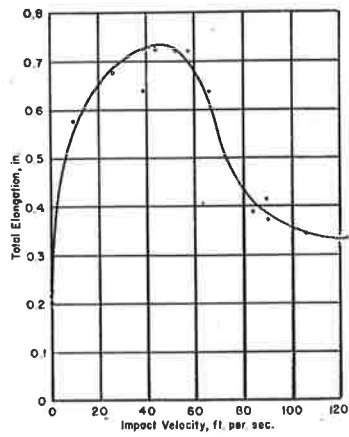
Tavallinen rakenneteräs

Tavallisen rakenneteräksen jännitys-venymäkäyrästä kuvassa 5 ilmenee nopeammilla kuormituksilla viivästynyt myötö hyvin selvästi. Nopeudella 45,7 m/s nousee myötöraja yli kolminkertaiseksi verrattuna staattiseen kuormitukseen. Murtolujuuden kasvu on lähes 50 %, mutta kokonaisvenymä pysyy suurin piirtein vakiona.

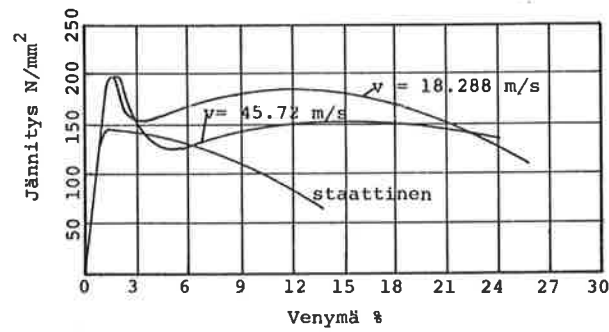
Tavallisen teräksen myötörajan kasvua kuormitusnopeuden noustessa on selvitetty julkaisussa /5/. Siinä on todettu myötölujuuden nousevan kuvan 6 mukaisesti.

Kimmo- ja murtorajalle on artikkelissa /6/ esitetty kuvan 7 mukainen riippuvuus nopeudesta. Jos nopeus on suurempi kuin 60 tuumaa sekunnissa (1,5 m/s), kohottaa viivästynyt myötö teräksen kimmorajan lopullista murtorajaa korkeammalle.

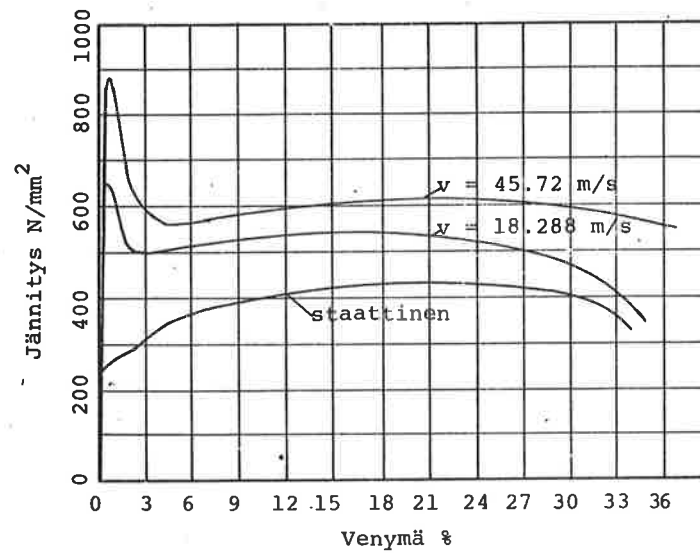
Myös valmistustavalla on merkittävä vaikutus teräksen lujuus- ja venymäarvoihin. Kuva 8 selvittää lämpökäsittelyn vaikutusta /4/. Kylmävalssatulla teräksellä venymä ja energiansitomiskyky kasvavat kriittiseen nopeuteen saakka tasaisesti ja kääntyvät sen jälkeen laskuun (kuva 8.a). Lämpökäsittellyllä teräksellä (kuva 8.b) nämä arvot kasvavat ensin vain vähän ja pysyvät kriittiseen nopeuteen asti vakiona, jonka jälkeen ne suuremmilla nopeuksilla pienenevät. Lämpökäsittellyllä teräksellä venymä- ja energiansitomiskyky ovat myös huomattavasti suuremmat. Kuvasta 9 nähdään lämpökäsittelyn, kylmävalssauksen ja karkaisun vaikutus teräksen murtolujuuteen, venymään ja energiansitomiskykyyn staattisessa ja dynaamisessa kuormituksessa /4/. Karkaisulla on lämpökäsittelyyn verrattuna päinvastainen vaikutus, sillä venymä on tällöin hyvin vähäinen.



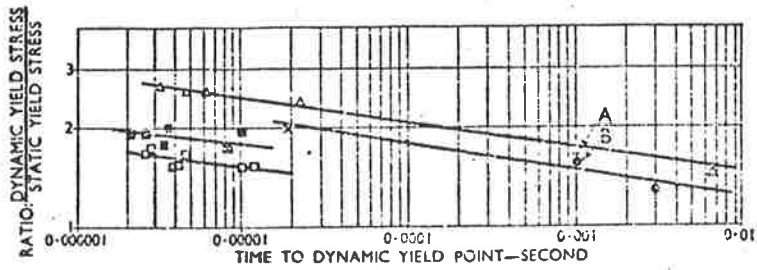
Kuva 3. Kokonaisvenymän riippuvuus iskunopeudesta kuparilla /1/.



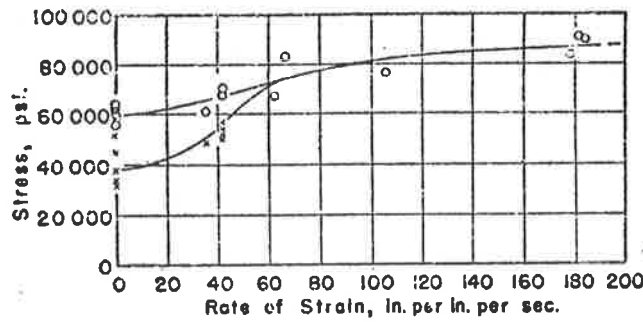
Kuva 4. Alumiinin jännitys-venymäkäyriä eri kuormitusnopeuksilla /3/.



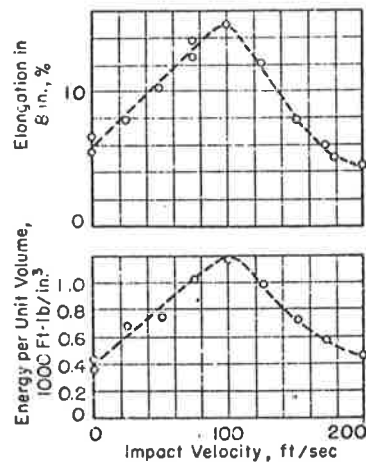
Kuva 5. Tavallisen teräksen jännitys-venymäkäyriä eri kuormitusnopeuksilla /3/.



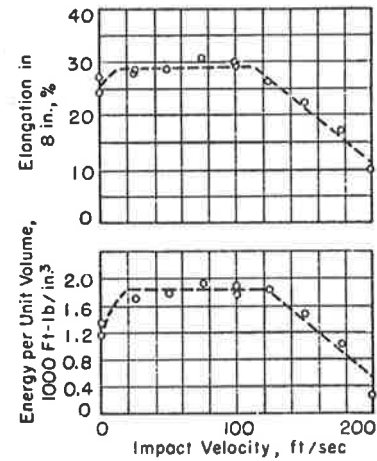
Kuva 6. Tavallisen teräksen myötörajan kasvu nopeissa kuormituksissa /5/.



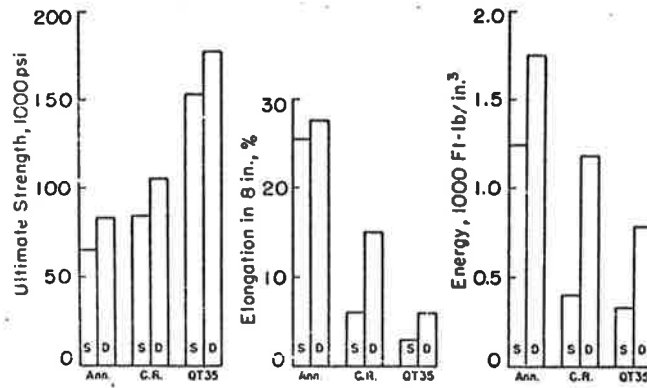
Kuva 7. Tavallisen teräksen kimmo- ja murtoraja kuormitusnopeuden muuttuessa /6/.



Kuva 8.a Kokonaisvenymän ja sitoutuneen energian riippuvuus kuormitusnopeudesta kylmävalssatulla teräksellä /4/.

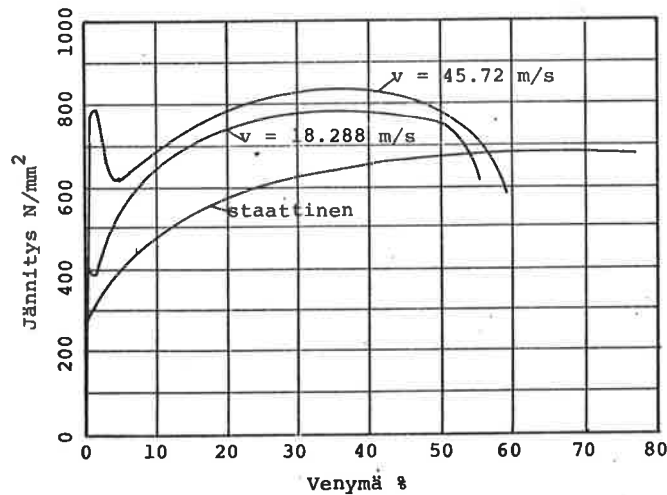


Kuva 8.b Kokonaisvenymän ja sitoutuneen energian riippuvuus kuormitusnopeudesta lämpökäsitellyllä teräksellä /4/.



—Comparison of the Static and Dynamic Tensile Properties of SAE 1022 Annealed, Cold-Rolled, and Quenched and Tempered.

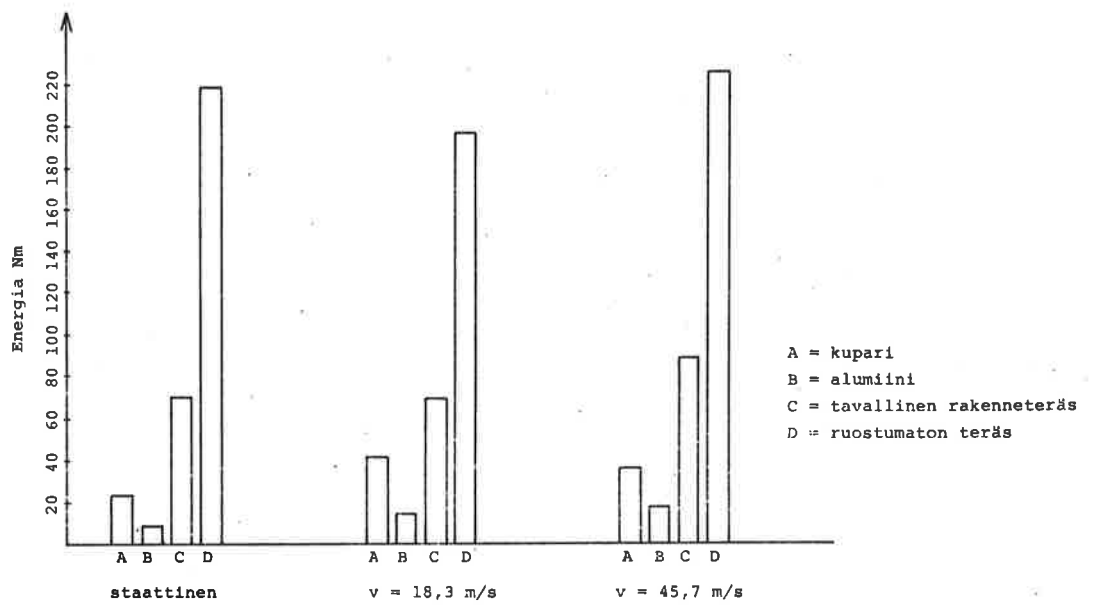
Kuva 9. Teräksen staattisten ja dynaamisten ominaisuuksien vertailua /4/.



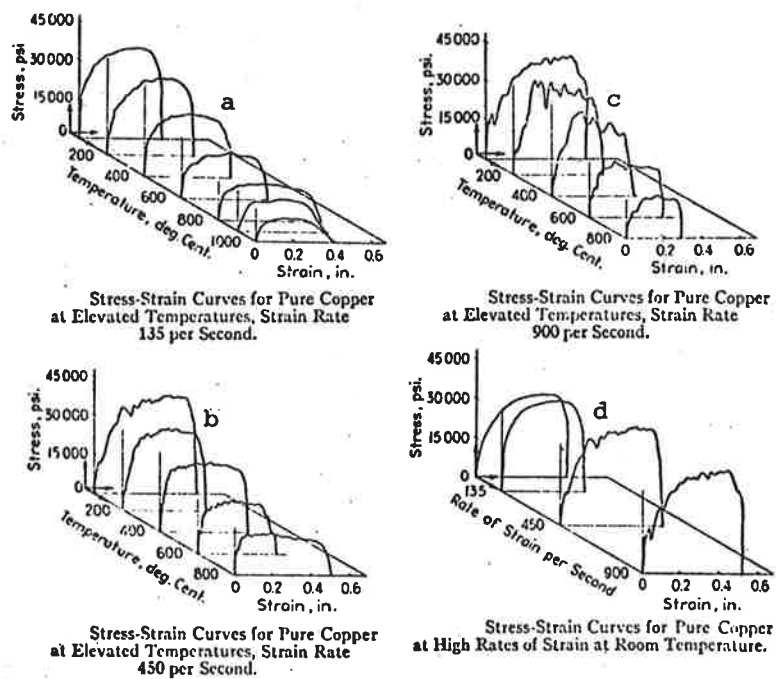
Kuva 10. Ruostumattoman teräksen 302 jännitys-venymäkäyriä eri kuormitusnopeuksilla /3/.

Ruostumaton teräs

Ruostumattoman teräksen jännitys-venymäkäyristä, jotka on esitetty kuvassa 10, voidaan todeta aineen suuri energiansitomiskyky. Kokonaisvenymä on staattisessa kuormituksessa ollut 75 % ja nopeammissa kuormituksissa 50-60%. Myötöraja ei staattisessa käyrässä tule esille yhtä selvästi kuin tavallisella teräksellä, sillä ruostumattoman teräksen plastisoituminen tapahtuu vähitellen. Suuremmilla nopeuksilla on kuitenkin viivästynyt myötö selvästi nähtävissä. Staattisessa kuormituksessa sekä nopeudella 45,7 m/s on sitoutunut energiamäärä suurinpiirtein sama, mutta nopeudella 18,3 m/s hiukan pienempi. Tämän takia voidaan olettaa, että ruostumattoman teräksen energiansitomiskyky ei kuormitusnopeuden nousun mukana kasva, vaan se voi jäädä staattisia arvoja pienemmäksi.



Kuva 11. Kuparin, alumiinin, tavallisen rakenneteräksen ja ruostumattoman teräksen sitoma energia erilaisilla kuormitusnopeuksilla. Koekappaleen pituus 25,4 mm, halkaisija 5,1 mm /3/.



Kuva 12. Kuparin jännitys-venymäkäyriä eri nopeuksilla eri lämpötiloissa /7/.

Eri materiaalien vertailua

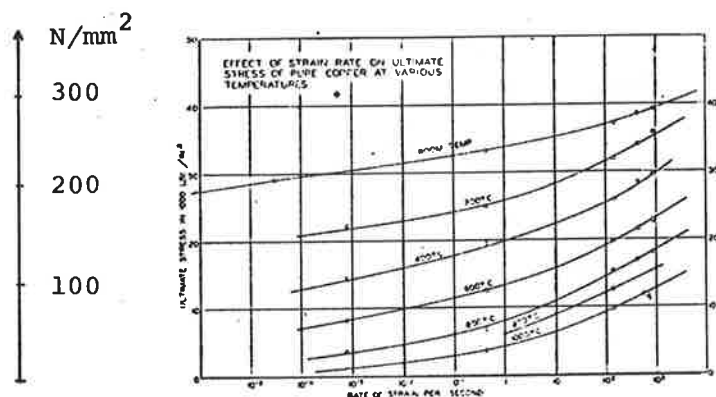
Kuvassa 11 on esitetty kuparin, alumiinin, tavallisen rakenneteräksen ja ruostumattoman teräksen sitoma energia kolmella erilaisella kuormitusnopeudella /3/:n mukaan. Koekappaleina on käytetty 25,4 mm pitkää vetosauvaa, jonka halkaisija on 5,1 mm. Ruostumaton teräs osoittautuu selvästi parhaimmaksi energiaa sitovaksi materiaaliksi. Nopeudesta riippumatta energian sitomiskyky pysyy tasaisena.

LÄMPÖTILAN VAIKUTUS

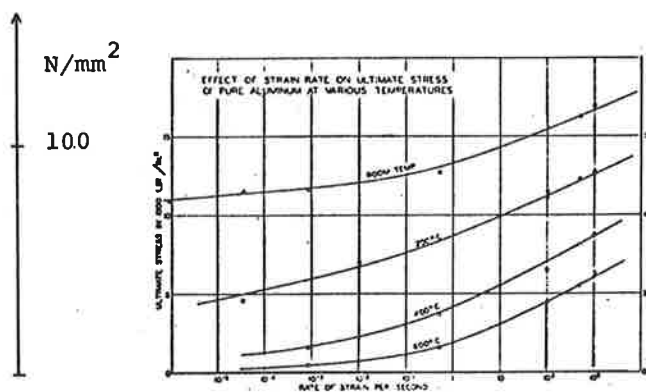
Kupari ja alumiini

Kuva 12 selvittää lämpötilan vaikutusta kuparin jännitys-venymäsuhteisiin erilaisilla kuormitusnopeuksilla /7/. Vedetyn koekappaleen pituus on ollut 28,6 mm. Kuvassa 12.a nähdään jännitys-venymäkäyrät huoneenlämpötilassa, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 900°C sekä 1000°C lämpötilassa nopeudella 135 s⁻¹. Lujuus heikkenee tasaisesti lämpötilan noustessa venymän kuitenkin pysyessä melko suurena. Nopeuksilla 450 s⁻¹ ja 900 s⁻¹ saatuja käyriä esittävät vastaavasti kuvat 12.b ja c, joista ilmenee samoja asioita kuin kuvasta 12.a. Kuva 12.d ilmaisee lopuksi huoneenlämpötilassa mitattuja käyriä nopeuksilla 0, 135 s⁻¹, 450 s⁻¹ ja 900 s⁻¹.

Kuvasta 13 nähdään kuparin murtolujuuden riippuvuus lämpötilasta ja kuormitusnopeudesta /8/. Tämä osoittaa, että kupari menettää lämpötilan noustessa lujuutensa hyvin nopeasti, jos kuormitus tapahtuu hitaasti. Nopeudella 10⁻³s⁻¹ murtolujuus putoaa jo lämpötilassa 200°C huomattavasti alle huoneenlämpötilassa mitatun vastaavan arvon. Suuremmilla nopeuksilla lujuuden heikkeneminen on sen sijaan paljon vähäisempää, sillä esim. nopeudella 10³s⁻¹ lujuus on vielä 400°C:ssa korkeampi kuin huoneenlämpötilassa nopeudella 10⁻⁴s⁻¹.



Kuva 13. Kuparin murtolujuuden riippuvuus kuormitusnopeudesta ja lämpötilasta /8/.



Kuva 14. Alumiinin murtolujuuden riippuvuus kuormitusnopeudesta ja lämpötilasta /8/.

Lämpötilan ja kuormitusnopeuden vaikutus alumiinin murtolujuuteen on esitetty kuvassa 14 /8/. Se ilmaisee, että alumiini käyttäytyy lämpötilan noustessa samalla tavoin kuin kupari. Hitailta kuormituksilla lämpötilan vaikutus lujuuteen on huomattavasti suurempi kuin nopeilla. On myös todettava niin alumiinin kuin kuparinkin osalta, että vielä suhteellisen lähellä sulamispistettä lujuus on suurille kuormitusnopeuksille melko korkea.

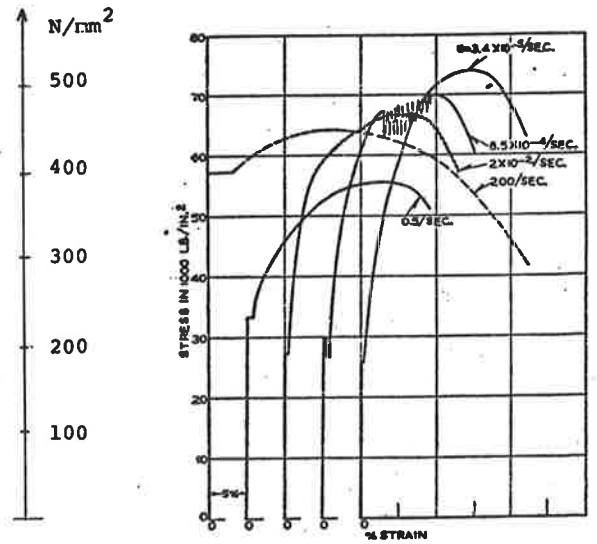
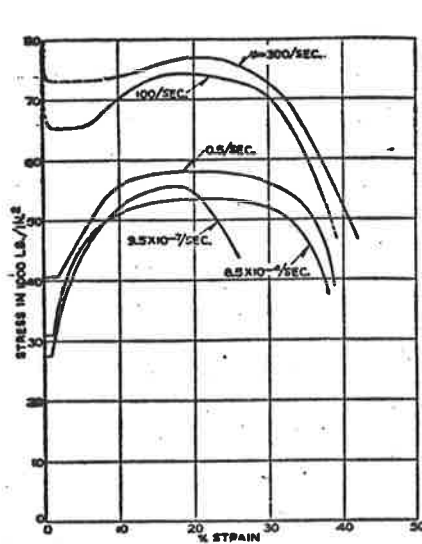
Tavallinen rakenneteräs

Kuvat 15, 16, 17 ja 18 esittävät tavallisen rakenneteräksen jännitys-venymäkäyriä erilaisilla nopeuksilla neljässä eri lämpötilassa /9/. Kuvassa 15 on aluksi viisi huoneenlämpötilassa mitattua käyrää. Myötöraja nousee kuormitusnopeuden kasvaessa, mutta murtolujuus on nopeudella $9,5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ korkeampi kuin nopeudella $8,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Nopeudella $9,5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ saatu kokonaisvenymä on huomattavasti muita pienempi.

Kuvassa 16, jonka arvot on saatu lämpötilassa 200°C , käyrät on selvyiden vuoksi piirretty 5 % toisistaan erilleen. Myötöraja kasvaa nopeuden mukana kuten huoneenlämpötilassakin, mutta murtoraja sitävastoin alenee lukuunottamatta käyrää nopeudella 200 s^{-1} . Murtoraja on tässä lämpötilassa hitaassa kuormituksessa jonkin verran huoneenlämpötilassa mitattuja arvoja korkeampi. Myös kokonaisvenymässä esiintyy vaihtelua.

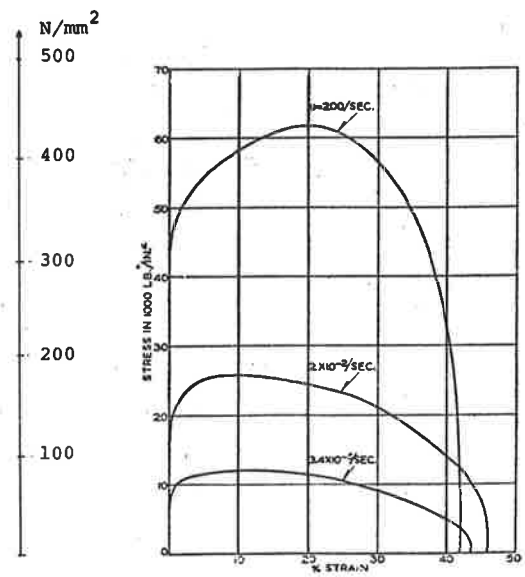
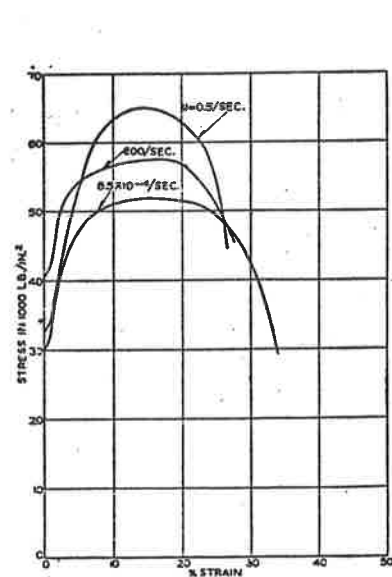
Lämpötilassa 400°C (kuva 17) myötöraja kasvaa nopeuden noustessa, mutta murtoraja on suurin nopeudella $0,5 \text{ s}^{-1}$. Kokonaisvenymä on 30 %:n kummallakin puolella.

Kuvassa 18, jossa kuormituslämpötila on ollut 600°C , tulee esiin sama ilmiö, joka havaittiin jo kuparilla ja alumiinilla: lujuus hitaassa kuormituksessa on hyvin alhainen, mutta nopeassa kuormituksessa vielä melko korkea. Käyrissä on jo selvästi nähtävissä korkean lämpötilan mukanaan tuoma materiaalin pehmeneminen.



Kuva 15. Teräksen jännitys-venymäkäyriä eri nopeuksilla huoneenlämpötilassa /9/.

Kuva 16. Teräksen jännitys-venymäkäyriä eri nopeuksilla lämpötilassa $200^{\circ}C$ /9/.



Kuva 17. Teräksen jännitys-venymäkäyriä eri nopeuksilla lämpötilassa $400^{\circ}C$ /9/.

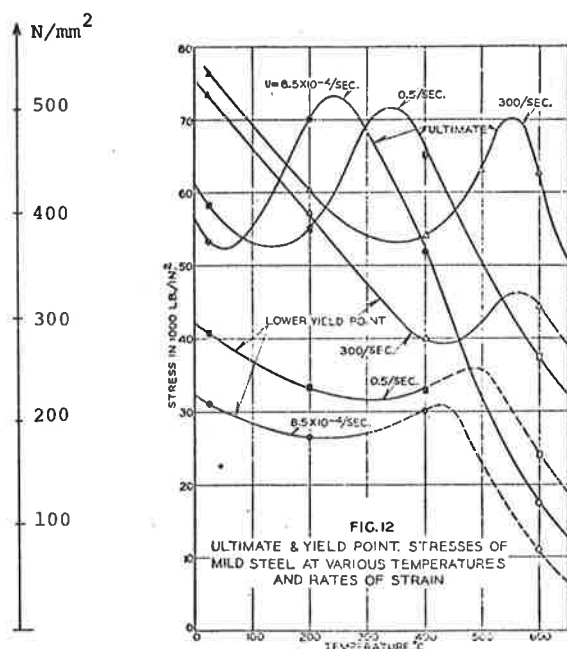
Kuva 18. Teräksen jännitys-venymäkäyriä eri nopeuksilla lämpötilassa $600^{\circ}C$ /9/.

Kuva 19 selvittää tavallisen teräksen murto- ja myötörajan muuttumista lämpötilan mukana kuormitusnopeuksilla $8,5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $0,5 \text{ s}^{-1}$ ja $300 \text{ s}^{-1}/9/$. Murtoraja ei alene suoraan lämpötilan noustessa, vaan siinä tapahtuu välillä hyvin huomattava kohoaminen. Hitaassa kuormituksessa murtolujuus on korkeimmillaan lämpötilojen 200°C ja 300°C välillä ja nopeudella $0,5 \text{ s}^{-1}$ lämpötilojen $300^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C}$ välillä. Nopeilla kuormituksilla lujuuden kohoaminen osuu lämpötiloihin $500^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$, joskaan ei enää saavuteta niin suuria arvoja kuin huoneenlämpötilassa. Vastaavanlainen uudelleen kohoaminen on havaittavissa myös teräksen alemmalla myötörajalla. Tämä myöhempi huippuarvo niin murto- kuin myötörajallakin esiintyy sitä korkeammissa lämpötiloissa mitä nopeampi kuormitus on.

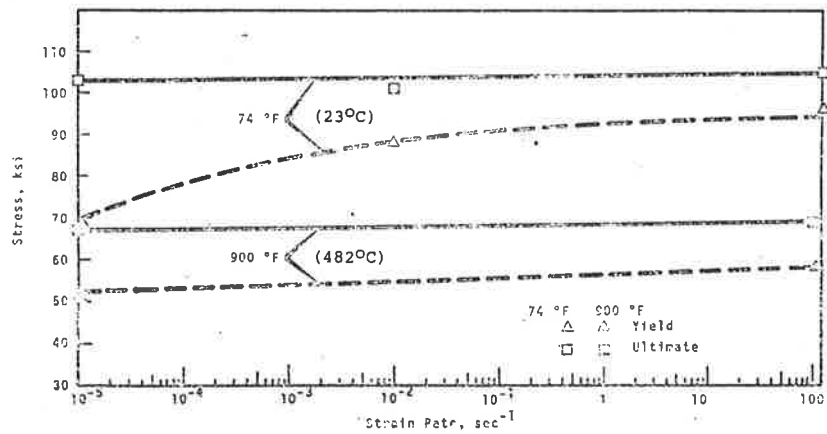
Ruostumaton teräs

Kuvassa 20 nähdään ruostumattoman teräksen 304 myötö- ja murtorajat kuormitusnopeuden funktiona lämpötiloissa 23°C ja $483^\circ\text{C} /10/$. Murtolujuus on nopeudesta riippumaton kummassakin lämpötilassa. Myötölujuus sensijaan kasvaa hiukan nopeuden mukana molemmissa tapauksissa. Huoneenlämpötilassa on nopeuden vaikutus myötölujuuteen kuitenkin selvästi suurempi.

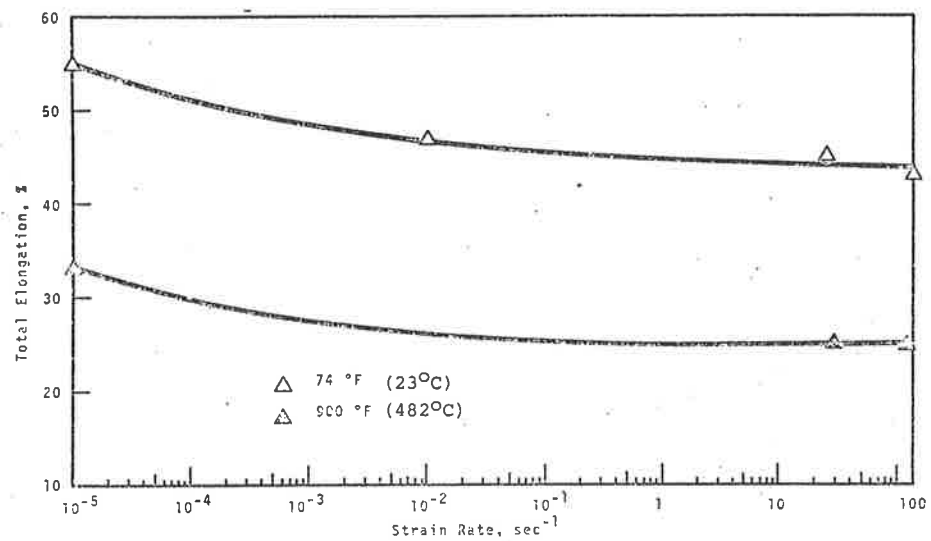
Ruostumattoman teräksen 304 kokonaisvenymän muutoksen kuormitusnopeuden kasvaessa esittää kuva 21 edellä mainituissa kahdessa lämpötilassa $/10/$. Nopeuden noustessa venymä pienenee hiukan, mutta pysyy suuremmilla nopeuksilla vakiona molemmissa lämpötiloissa.



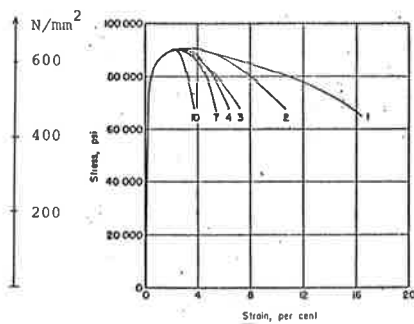
Kuva 19. Teräksen murto- ja myötöraja lämpötilan funktiona erilaisilla kuormitusnopeuksilla $/9/$.



Kuva 20. Ruostumattoman teräksen 304 murto- ja myötöraja kuormitusnopeuden funktiona lämpötiloissa 23 °C ja 482 °C.



Kuva 21. Ruostumattoman teräksen 304 kokonaisvenymä kuormitusnopeuden funktiona lämpötiloissa 23 °C ja 482 °C.



Kuva 22. Eri pituisten terässauvojen staattisia jännitys-venymäkäyriä. Kaikilla sauvoilla halkaisija 0,3".

RAKENTEEN KESKINÄISTEN MITTASUHTEIDEN VAIKUTUS

Hoikkuus

Vedetyn sauvan halkaisijan ja pituuden suhteen merkitystä aineen lujuusominaisuuksiin on selvitetty julkaisussa /11/. Kuva 22 esittää staattisessa kokeessa saatuja jännitys-venymäkäyriä tavallisesta teräksestä tehdyille eri pituisille koekappaleille, joiden halkaisija on ollut 0,3 tuumaa (7,6 mm). Pituus tuumina on merkitty kunkin käyrän jälkeen. Venymä prosenteissa on ollut sitä pienempi, mitä hoikempi sauva on ollut. Murtolujuus on ollut kaikissa tapauksissa kuitenkin sama.

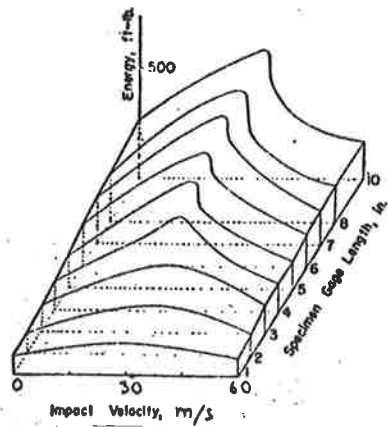
Samanlaisten koekappaleiden käyttäytymistä on tutkittu myös nopeammissa kuormituksissa /11/. Näissä kokeissa on hoikkuuden vaikutus osoittautunut samaksi kuin staattisissakin. Prosentuaalinen venymä pienenee pituuden kasvaessa. Sitoituneen energian riippuvuus iskunopeudesta ja sauvan pituudesta on nähtävissä kuvasta 23. Lyhyillä sauvoilla ei iskunopeus sanottavasti vaikuta energiamäärään, mutta jo esim. neljän tuuman pituudella on selvä huippunopeuden 30 m/s kohdalla. Tämä huippukohta vahvistuu koeksuovan pitenemisen mukana. Materiaalin kriittinen nopeus osoittautuu olevan juuri n. 30 m/s. Kriittisen nopeuden vaikutus tulee näkyviin aina selvemmin, mitä hoikempi sauva on kyseessä. Pitempien kappaleiden kohdalla tapahtuu hyvin jyrkkä energiamäärän väheneminen kriittisen nopeuden jälkeen.

Sauvan hoikkuuden merkitys nopeissa vetokuormituksissa ilmenee myös kuvista 24 ja 25 /12/. Mikäli iskunopeus on sama, mutta iskun kesto vaihtelee, syntyy 2 metriä pitkän ja 1,8 mm paksun sauvan päähän tasainen venymä, jonka pituus on suoraan verrannollinen kesto aikaan (kuva 24). Jos taas iskunopeus muuttuu, kasvaa venymän suuruus prosenteissa nopeuden mukana, ja venymä on yhtä poikkeusta lukuunottamatta jakautunut sitä lyhyemmälle alueelle, mitä suurempi nopeus on ollut (kuva 25).

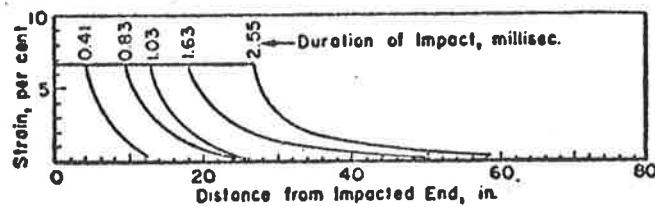
Poikkileikkauksen geometria

Artikkelissa /11/ tarkastellaan myös poikkileikkauksen muodon vaikutusta vetokokeissa saatuihin lujuus- ja venymäarvoihin. Materiaalina on käytetty lämpökäsiteltyä kuparia, ja koeksuovien pituus on ollut 20" cm. Poikkileikkauksen muoto muuttuu, mutta pinta-ala pysyy samana. Hitaissa ja nopeissa kokeissa on saatu taulukoiden 1 ja 2 mukaiset tulokset. Staattisissa kokeissa vetolujuudet ovat kaikille lähes samat, mutta venymässä esiintyy jonkin verran vaihtelua. Tämä ei kuitenkaan erota mitään poikkileikkausta muita edullisemmaksi, sillä kahdesta venymäarvosta suuremmat ovat hyvin lähellä toisiaan. Dynaamisissakaan koetuloksissa ei ole mainittavia eroja minkään poikkileikkauksen hyväksi. Lujuus ja venymä ovat suuremmat kuin staattisissa kokeissa, mutta kasvu on kaikilla poikkileikkauksilla samaa

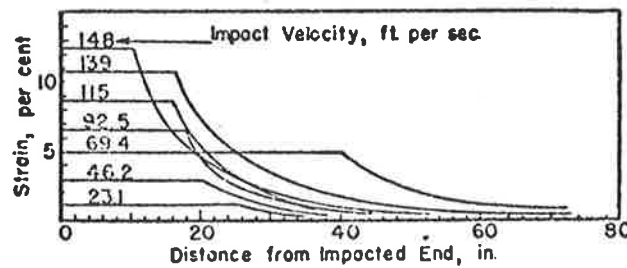
luokkaa. On tosin todettava, että levymäisen kappaleen ohuus saattaa vaikuttaa energiansitomiskykyyn jossain määrin heikentävästi.



Kuva 23. Teräksen sitoman energian riippuvuus koesauvan pituudesta ja kuormitusnopeudesta. Kaikilla sauvoilla halkaisija 0,3".



Kuva 24. Venymän jakautuminen kuparisauvassa. Iskunopeus 28 m/s.



Kuva 25. Venymän jakautuminen kuparisauvassa erilaisilla iskunopeuksilla.

Koekappale	Vetolujuus N/mm ²	Venymä %	Energia Nm/cm ³
Ø 0,3"	210	29,0	45,1
Ø 0,3"	209	36,5	59,4
0,26"x0,26"	210	33,2	52,6
0,26"x0,26"	207	35,0	55,8
0,186"x0,387"	206	37,0	55,6
0,186"x0,387"	203	32,0	48,8
0,112"x0,633"	209	37,4	60,4
0,112"x0,633"	211	38,0	61,2

Taulukko 1. Staattisia vetokokeita erilaisilla poikkileikkauksilla. Sauvojen pituus 8".

Koekappale	Iskunopeus m/s	Murtolujuus N/mm ²	Venymä %	Energia Nm/cm ³
Ø 0,3"	7,8	245	34,9	63,0
	15,4	257	42,3	85,2
	22,9	272	45,8	88,5
	30,5	260	46,0	91,0
	38,3	248	50,2	95,1
	46,3	248	49,0	89,4
	53,7	259	43,5	82,1
	61,6	266	37,7	64,0
0,266"x0,266"	7,8	253	41,0	94,3
	15,4	265	41,5	103,4
	22,7	255	44,2	108,0
	30,8	259	45,5	97,6
	38,0	249	41,6	97,6
	45,9	252	41,8	95,1
	53,6	259	45,0	101,3
	61,6	273	42,0	100,1
0,188"x0,376"	7,5	266	36,8	85,6
	15,1	269	36,1	93,9
	22,7	280	45,3	115,8
	30,5	266	40,0	98,5
	38,0	270	41,8	103,0
	45,8	262	44,4	105,1
	52,9	263	49,0	114,2
	61,3	266	45,5	101,8
0,122"x0,633"	7,7	288	39,6	85,2
	15,5	283	42,0	95,1
	22,9	287	40,7	85,2
	30,8	280	34,2	75,3
	38,3	270	41,4	88,5
	45,9	274	34,8	74,5

Taulukko 2. Nopeita vetokokeita erilaisilla poikkileikkauksilla. Sauvojen pituus 8".

LÄHDELUETTELO

- /1/ Hoppmann, W.H., The Velocity Aspect on Tension-Impact Testing. 1947
- /2/ Von Karman, T., On the Propagation of Plastic Deformation in Solids, National Defense Research Committee Report A-29. February 2, 1942
- /3/ Clark, D.S., The Influence of Impact Velocity on the Tensile Characteristics of some Aircraft Metals and Alloys. National Advisory Committee for Aeronautics, Tech. Note No. 868, 1942
- /4/ Clark, D.S. and Wood, D.S., The Tensile Impact Properties of some Metals and Alloys, Trans. Amer. Soc. Testing Metals, 42, 1950, 45
- /5/ Warnock, F.V., and Brennan, J.B., The Tensile Yield Strength of Certain Steels under Suddenly Applied Loads, Proc. Inst. Mech. Engrs, 159, 1948, 1
- /6/ Clark, D.S. and Duwez, P.E., The Influence of Strain Rate on some Tensile Properties of Steel, Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 50, 1950, 560
- /7/ Manjoine, M.J. and Nadai, A., High Speed Tension Tests at Elevated Temperatures, Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 40, 1940, 822
- /8/ Manjoine, M.J. and Nadai, A., High Speed Tension Tests at Elevated Temperatures, Parts II and III, Proc. Amer. Soc. Mech. Engrs 63, 1941, A-77
- /9/ Manjoine, M.J., The Influence of Rate of Strain and Temperature on Yield Stresses of Mild Steel Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. 66, 1944, A-211
- /10/ Hoagland, R.G., The Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels, HEDL-TME 71-56, May, 1971
- /11/ Clark, D.S. and Wood, D.S., The Influence of Specimen Dimension and Shape on the Results in Tension Impact Testing, Proc. Amer. Soc. Testing Materials. 50, 1950, 577
- /12/ Duwez, P.E. and Clark, D.S. An Experimental Study of Propagation of Plastic Deformation under Conditions of Longitudinal Impact, Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 47, 1947, 502