

Vpliv strukture in dimenzij preizkušanca, napetosti in hitrosti preizkušanja na žilavostne vrednosti

UDK: 620.178.7
ASM/SLA: Q5, J1, J29

F. Uranc

Dejanske odpornosti snovi proti porušenju z udarci ne poznamo, dokler ne vemo, kakšne vrste udarcev delujejo na izdelek in kako se izdelek dane oblike, dimenzij in strukturne sestave obnaša proti danim vrstam udarcev.

Vemo, da z zvojnimi preizkusi lažje kot z upogibnimi razlikujemo krhke snovi, ni pa zagotovo znano, ali morda popuščanje ne spreminja upogibne žilavosti drugače kot zvojno.

O efektu hitrosti preizkušanja je veliko napisanega, toda ne vemo ničesar o odvisnosti odpornosti različnih struktur proti različno hitrim udarcem.

Ni znan vpliv debeline preizkušanca na občutljivost žilavostnega preizkušanja pri različnih strukturnih spremembah in pri različnih trdotah.

Zelo malo vemo o odpornosti proti zlomu kot energiji, ki še ne povzroči zloma.

Skušajmo zožiti to nevednost o lastnostih snovi!

1. EFEKT ZVEČEVANJA ODPORNOSTNEGA MOMENTA NA ODPORNOST PROTI UDARCEM

Pri enaki energiji nihala, udarjajočega na tenek ali debel preizkušane se za porušenje prvega porabi manj dela kot za zlom drugega. Delo pa je v najbolj preprosti obliki produkt

$$F \cdot s = F \cdot v \cdot t$$

kar pomeni, da je pri približno enakih časih za zlom tenkega in debelega preizkušanca razlika med produktoma $F \cdot v$ za oba precejšnja. Zadelj spreminjanja $F \cdot t$ in $m \cdot v$ po istem zakonu ter $m \cdot v$ in $m \cdot v^2/2$ tudi po skupnem zakonu, lahko sklepamo, da je razlika med silama F za zlom tenkega in za zlom debelega preizkušanca velika.

Preizkušane dvakrat večjega prereza terja pri sobni temperaturi od nihala manj kot dvakrat večjo energijo za zlom debelejšega kot za zlom tanjšega preizkušanca (1), če sta maksimalni napetosti (na površini preizkušanca) enaki, t. j.

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{m \cdot \Delta v_1^2}{2} \leq \frac{m \cdot \Delta v_2^2}{2}$$

$\Delta v_1 \dots$ zmanjšanje hitrosti nihala ob zlomu debelejšega preizkušanca,

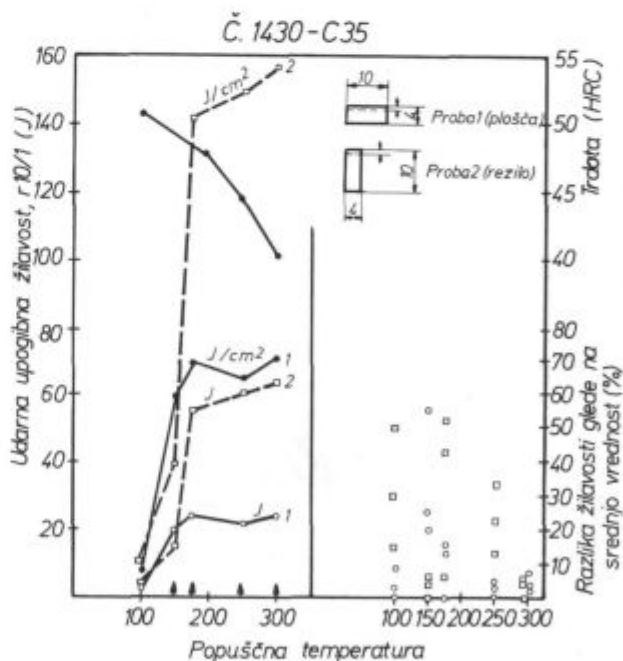
$\Delta v_2 \dots$ zmanjšanje hitrosti nihala ob zlomu pol tanjšega preizkušanca.

To velja, če je debelina preizkušancev v smeri udarca enaka, torej je v smeri pravokotno na smer udarca pri debelejših preizkušancih dvakrat večja kot pri tanjših.

To pomeni, da so tenki preizkušanci razmeroma bolj žilavi kot tolsti. To smo dokazali tudi s poskusi pri jeklu Č. 1840 (OC 80).

Čisto drugačne so razmere pri preizkušancih, ki nimajo enakih debelin v smeri udarca: debelejši preizk. vzamejo od nihala nesorazmerno veliko energije.

Slika 1: Žilavost dveh vrst tenkih preizkušancev iz Č. 1430 (C 35), preizkušanih v smeri večjega ali



Slika 1
Žilavost tenkih prob jekla Č. 1430 (C 35) kaljenih z 850°C v vodi

Fig. 1
Toughness of Č. 1430 (C 35) steel thin probes quenched in water from 850°C

manjšega odpornostnega momenta, je lahko zelo različna, predvsem pri bolj žilavem stanju (višje popuščanjem).

Relativnega minimuma žilavosti (pri popuščni temperaturi 250°C) ne opazimo v krivulji za rezilaste preizkušance (t. j. tiste z večjim odpornostnim momentom v smeri udarca, s prerezom v udarni ravnini $4 \times 9 \text{ mm}^2$).

Vzrok tega je vpliv večje ukrivljenosti tenkih preizkušancev, preizkušenih v tej smeri, kot je vpliv ukrivljenosti pri udarjanju na ploščato stran — to kaže desna stran diagrama z vrisanim razponom žilavostnih vrednosti. Samo preizkušanci, popuščeni na 150°C (popustitev napetosti) se obnašajo drugače kot drugi: ploščati preizkušanci so bolj žilavi od rezilastih in tudi variacija žilavosti je večja!

Žilavost na enoto prereza je pri rezilastih preizkušancih za 100 % večja kot pri ploščatih (70 J oz. 140). Torej je tudi sila za zlom pri rezilastih preizkušancih veliko večja kot pri ploščatih.

Slika 2 kaže udarno upogibno žilavost tenkih ploščatih in rezilastih preizkušancev jekla Č. 6441 (OW 3) ter navadnih preizkušancev (prerez $9 \times 10 \text{ mm}^2$) z zaokroženo zarezo, polmera 10 mm in globine 1 mm.

Ploščati preizkušanci s preizkusnim prerezom $3 \times 10 \text{ mm}^2$, popuščeni na 150, oz. na 180°C, so pokazali žilavost okoli 1,3 J, enako popuščeni re-

zilasti pa 3,3 J, t. j. za 150 % večjo (pri tem je ome-niti, da so bili rezilasti preizkušanci kaljeni v olju in zato malo manj žilavi).

Preizkušanci s preizkusnim prerezom $9 \times 10 \text{ mm}^2$ (spodnja krivulja) so pokazali pri enakem popuščanju žilavosti okoli 10 J, kar je malo manjša specifična žilavost kot pri rezilastih preizkušancih.

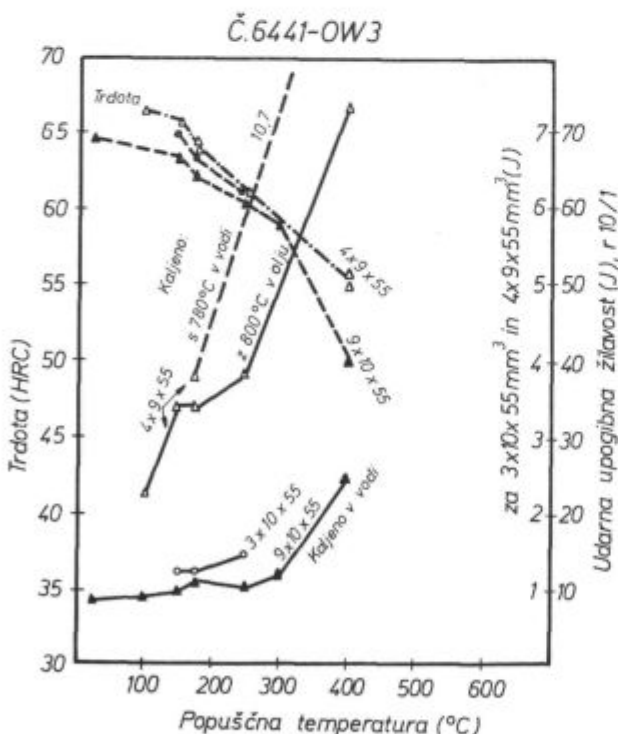
Trše jeklo (Č. 6441 (OW 3) zahteva v primerjavi z mehkejšim glede na trdoto nesorazmerno veliko energijo in silo za upogibni zlom, če pri obeh jeklih enako povečamo odpornostni moment. Zato so lahko orodja oblikovana s sorazmerno majhnim odpornostnim momentom, tudi če grozi nevarnost nasilnega zloma — gledano tako, kakor ocenjuje varnost proti zlomu uporabnik konstrukcijskih jekel.

2. ODPORNOST PROTI RAZLIČNIM RAZMERJEM STRIŽNE IN NORMALNE NAPETOSTI

Primerjajmo udarno upogibno žilavost z zvojno žilavostjo nelegiranega jekla!

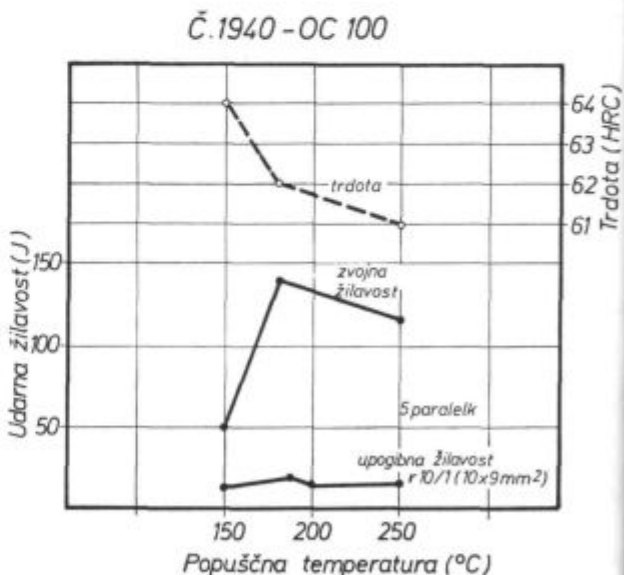
Slika 3 kaže podobnost krivulj zvojne in upogibne udarne žilavosti jekla Č. 1940 (OC 100). Zvojne žilavosti nismo določali pri preizkušancih, ki bi bili popuščeni na 200°C, odtod majhna razlika v obliki obeh krivulj.

Slika 4 kaže upogibno in zvojno žilavost jekla Č. 7680 (BRM 2). Primerjajmo krivuljo za preizkušance, kaljene s 1230°C na zraku ali v termalni kopeli (upogibni preizkušanci) s krivuljo za preizkušance, kaljene s 1240°C na zraku (zvojni preizkušanci). Minimum upogibne žilavosti nastopa



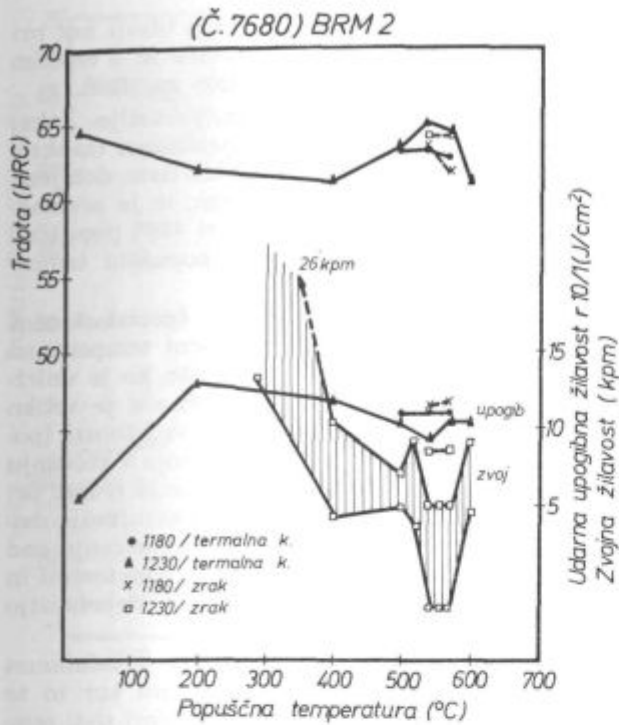
Slika 2
Žilavost jekla Č. 6441 (OW 3) kaljenega z 800°C v olju ali s 780°C v vodi

Fig. 2
Toughness of Č. 6441 (OW 3) steel quenched in oil from 800°C and water from 780°C



Slika 3
Zvojna in upogibna žilavost jekla Č. 1940 (OC 100), kaljenega s 780°C v vodi

Fig. 3
Torsional and bending toughness of Č. 1940 (OC 100) steel quenched in water from 780°C



Slika 4

Zvojni in upogibna žilavost jekla Č. 7680 (BRM 2)

Fig. 4

Torsional and bending toughness of Č. 7680 (BRM 2) steel

pri popuščanju na 540°C (če so bili preizkušanci kaljeni v termalni kopeli). Minimum upogibne žilavosti preizkušancev, kaljenih na zraku, pa je po popuščanju 540—580°C. Pri isti popuščni temperaturi nastopa tudi minimum preizkušancev, kaljenih enako in preizkušanih na zvoj.

Ni videti bistveno različnega obnašanja preizkušancev pri zvojni ali upogibni obremenitvi, zato lahko samo ovržemo dosedanja mnenja o različnem efektu popuščanj na zvojno in upogibno žilavost. Zvojni žilavost se s popuščanjem spreminja veliko intenzivneje kot upogibna.

3. OBNAŠANJE RAZLIČNIH STRUKTURNIH SESTAVIN OB ZLOMU PREIZKUŠANCA

Primerjajmo lastnosti nelegiranega orodnega jekla Č. 1940 (OC 100) z lastnostmi jekla Č. 4150 (OCR 12).

Slika 5 kaže zvojno in udarno upogibno žilavost (različnih tipov jekla Č. 1940 (OC 100) z odpornostjo proti sunkom.

Preizkusi na Izodovem stroju so dali v najboljšem primeru, t. j. z gladkimi preizkušanci, podobno krivuljo kot preizkusi tenkih preizkušancev (plošč s preizkusnim prerezom $3 \times 10 \text{ mm}^2$): razlika je le v tem, da so pri Izodovem stroju dobili krivuljo premaknjeno za 50°C k višjim popuščnim temperaturam.

Krivulja meje vzdržnosti pri večkratnem udarjanju teče paralelno krivulji udarne upogibne

žilavosti tenkih preizkušancev — pri popuščnih temperaturah nad 150°C. Krivulja meje loma pa je za 50°C premaknjena k nižjim popuščnim temperaturam.

Lahko pa rečemo tudi, da leži krivulji žilavosti tenkih ploščatih preizkušancev paralelno tudi krivulja meje loma, in sicer do popuščne temperature 180°C.

Tako vidimo, da kaže krivulja žilavosti tenkih preizkušancev v območju popuščnih temperatur 150 do 180°C istočasno potek krivulje vzdržnosti in krivulje loma.

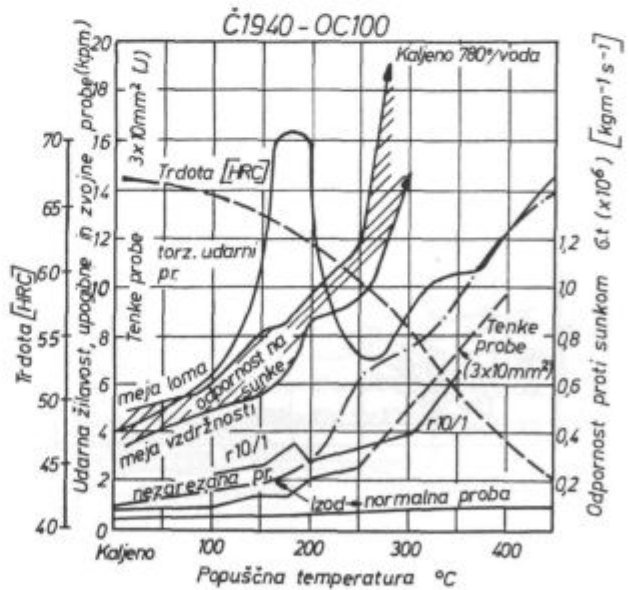
Kot je videti, občutimo z merjenjem dela za zlom predvsem spremembe (odpravljanje) napetosti v preizkušancih, z merjenjem vzdržnosti pa efekte izločanja (epsilon karbida) in pretvorb (avstenita v martenzit).

Žilavostni krivulji upogiba preizkušancev s prerezom $9 \times 10 \text{ mm}^2$ ali zvoja preizkušancev debeline $\varnothing 6 \text{ mm}$ občutita efekt odprave napetosti in efekt tvorbe epsilon karbida pri eni popuščni temperaturi, tj. pri popuščanju na 180°C.

Popuščni efekti delujejo torej na tenke in debele preizkušance različno; na prve ločeno, na druge združeno.

Največji razdalji med krivuljama vzdržnosti in loma sta pri popuščnih temperaturah najbolj strmega porasta ali malo nad padcem krivulje udarne zvojni (in upogibne s preizkušanci, zarez r10/1 mm) žilavosti.

Meja vzdržnosti (ali kratko vzdržnost) proti udarcem se znatno poveča šele s popuščanjem na 200°C in nato se nadalje poveča šele s popuščanjem na 250°C. Za zlom rabijo veliko energije že



Slika 5

Odpornost proti lomu in žilavost jekla Č. 1940 (OC 100), kaljenega s 780°C v vodi

Fig. 5

Fracture resistance and toughness of Č. 1940 (OC 100) steel quenched in water from 780°C

preizkušanci, ki so popuščeni na 150°C in imajo nizko mejo vzdržnosti.

Preizkus tenkih preizkušancev na Charpy klavivu je dal krivuljo vzdržnosti, preizkus debelih preizkušancev (9 × 10 mm² preizkusnega prereza) je dal krivuljo, ki je podobna meji loma.

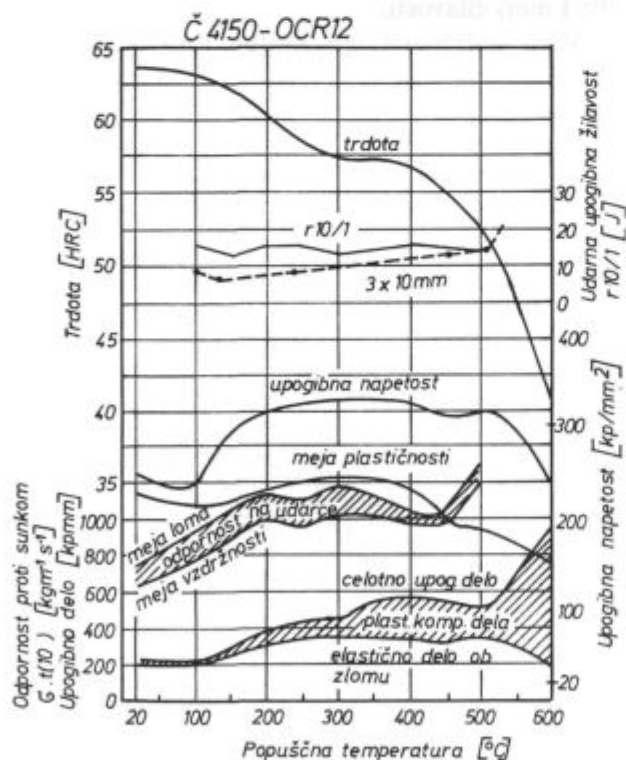
Sklepamo: preizkus tenkih preizkušancev daje bolj resnično podobo odpornosti proti udarcem kot preizkus normalno debelih preizkušancev. Vzrok tega je možnost prekaljenja tenkih preizkušancev (za preizkusne meje odpornosti in preizkuse tenkih preizkušancev na Charpy klavivu).

Preizkusi vzorcev, debeline 10 mm, so pokazali maksimum žilavosti že po popuščanju na 180°C — verjetno zavoljo ohranjene trdnosti nekajljene jadra.

Zato je prav preizkušati vzorce z enakimi strukturnimi sestavinami, kot so v orodju (ali drugačnem izdelku), katerega lastnosti bi radi spoznali. Za nelegirana orodna jekla so tenki preizkušanci, prereza 3 × 10 mm² primernejši od do zdaj uporabljenih žilavostnih preizkušancev s prerezom v zarezu 9 × 10 mm² (ali 7 × 10 mm²).

Slika 6 kaže za jeklo Č. 4150 (OCR 12) udarno in statično upogibno žilavost ter odpornost proti udarcem.

Meja loma in meja vzdržnosti (proti udarcem) tečeta paralelno, zato obravnavajmo za primerjavo samo eno. Paralelni sta verjetno zato, ker so efekti



Slika 6

Odpornost proti lomu, statična in udarna upogibna žilavost jekla Č. 4150 (OCR 12)

Fig. 6

Fracture resistance, static and impact bending toughness of Č. 4150 (OCR 12) steel

popuščanja napetosti pri tem jeklu blažji kot pri OC 100, ter se zato vzdržnost poveča že z enakim popuščanjem, ki poveča tudi delo za zlom.

Preizkušanci, debeline 10 mm, prekalijo. Zakaj je krivulja, dobljena s temi preizkušanci (zaokrožitev zarezu r10/1 mm) drugačna kot tista, dobljena z lomljenjem tenkih preizkušancev, to je premaknjena za 50° (pri 300°), oz. 100° (pri 400°) popuščne temperature (na desno) k višji popuščni temperaturi?

Minimum udarne žilavosti (preizkušancev 9 × 10 mm², r10/1 mm) pri popuščni temperaturi 300°C sovпада z dosego nizke trdote, ko je vzdržnost na maksimumu!. Vzrok vzdržnosti je veliko elastično delo za zlom. Minimum vzdržnosti (popuščanje na 250°C) je posledica zastoja v zvečanju elastičnega dela ob istočasnem padanju trdote pri zviševanju popuščne temperature. Zmanjšanje dviganja elastičnega dela za zlom pri popuščanju nad 250°C je v zvezi z že odpravljenimi napetostmi in s postopno povečujočo se zavorno dejavnostjo populstnih izločkov.

Za debele žilavostne preizkušance je minimum pri 300°C popuščne temperature, zato ker so se pri debelih preizkušancih šele tedaj (pri tisti temperaturi) prenehale intenzivno zmanjševati napetosti (torej se je ustavljal porast elastičnega dela za zlom).

Drugi minimum vzdržnosti se ujema s padcem elastičnega dela za zlom in je v zvezi z večanjem trdote ob izločanju posebnih karbidov.

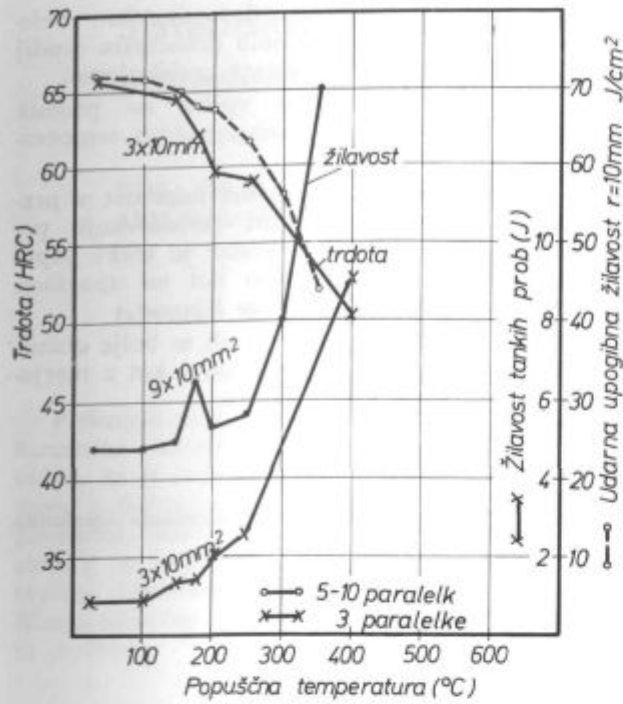
Sklep: Merjenje vzdržnosti proti lomu, oz. proti večkratnemu udarjanju, je veliko zanesljivejši kazalec strukturnih sprememb, ki nastopajo v nelegiranem ali v visokolegiranem jeklu, kot določanje dela za zlom. Preizkušanci naj bodo zadosti tenki, da dobimo po kaljenju strukture, kakršne resnično želimo preizkušati.

4. ODPORNOST PROTI OBREMENTIVAM RAZLIČNIH HITROSTI

Delovanje dveh stopenj hitrosti upogibanja na žilavostno obnašanje različnih preizkušancev smo ugotavljali s preizkusi jekla Č. 1940 (OC 100).

Slika 7 kaže udarno upogibno žilavost različno popuščenih preizkušancev (po tri enako popuščeni preizkušanci), izdelanih z blago zarezu (zaokrožitev 10 mm, globina 1 mm). Risba kaže žilavost in trdoto preizkušancev s preizkusnim prerezom 9 × 10 mm² ter lastnosti tenkih preizkušancev ploščate oblike, s prerezom 3 × 10 mm² na mestu, določenem za zlom.

Posebnosti prvih dveh krivulj (debelejšega preizkušanca) sta pojav maksimuma žilavosti za preizkušance, popuščene na 180°C, in strm padec krivulje trdote med popuščnima temperaturama 150°C in 180°C. V poprečju je padec krivulje trdote do popuščne temperature 200°C povsem enakomeren, s tem da je precej strmo dviganje žilavosti in padanje trdote pri popuščanju do



Slika 7

Žilavost tenkih in debelih prob jekla Č.1940 (OC 100), kaljenega s 780°C v vodi

Fig. 7

Toughness of thin and thick probes of Č.1940 (OC 100) steel quenched in water from 780°C

180°C. Popuščanje na 200°C skoraj ne spremeni trdote v primerjavi s popuščanjem na 180°C, pač pa zmanjša žilavost, kar je posledica razpada zaostalega avstenita v bainitu podoben produkt.

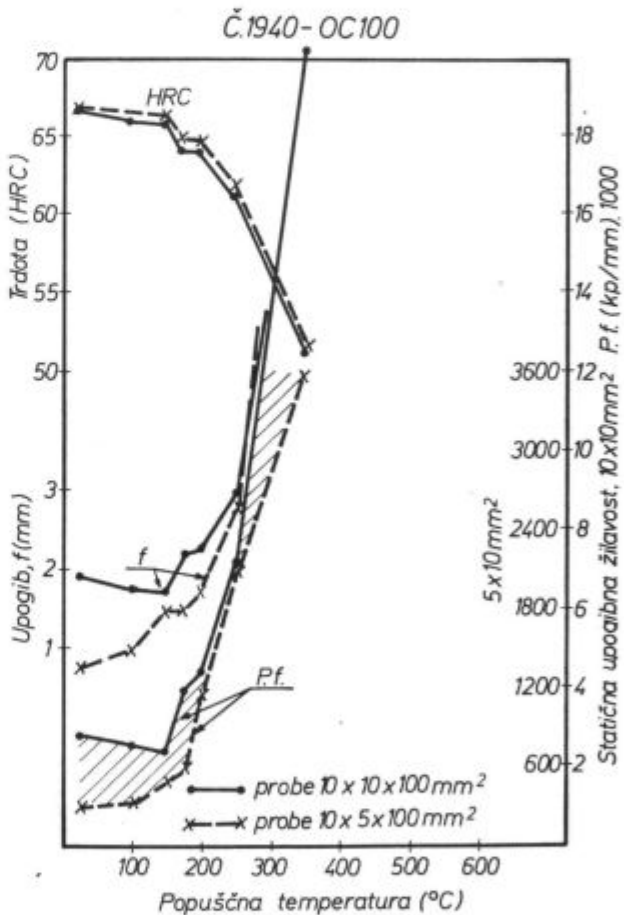
Drugi par krivulj (za tenke žilavostne preizkušance ima v zanimivem območju drugačen potek: krivulja trdot strmo pada od popuščne temperature 150°C do 200°C, krivulja žilavosti pa se strmo dvigne samo od popuščne temperature 180°C do 200°C, nato se zložno dviga. Pri tenkih preizkušancih je manj zadržanega avstenita, zato tudi ni zmanjšana strmina padca trdote po popuščanju med 150 in 180°C. Napetosti se pri tenkih preizkušancih odpravljajo pri popuščanju do 150°C, medtem ko pri debelih do 180°C. Pri debelih je efekt odpravljanja napetosti tudi večji kot pri tenkih prekaljenih preizkušancih.

Slika 8 kaže rezultate statičnih, t. j. počasnih upogibnih preizkusov vzorcev iz tega jekla. Trdoti tenkih in debelih preizkušancih se podobno spreminjata s spreminjanjem popuščne temperature. To kaže na možnost napake pri popuščanju tenkih preizkušancev za udarne žilavostne preizkuse. Žilavostna krivulja kot produkt porušne sile in upogiba kaže za tenke preizkušance spremembe pri nižjih popuščnih temperaturah kot za debele! Očitno v tanjših preizkušancih začne nekaj dvigati žilavost že pri nižji popuščni temperaturi kot v debelejših preizkušancih.

Tanjši preizkušanci se manj upognejo kot debelejši in porabijo za zlom komaj tretjino dela, ki gre za zlom debelejših preizkušancev. To pomeni v razmerju do prereza povečanje žilavosti za 150 %, če povečamo razdaljo prijemališča maksimalne napetosti od nevtralne osi za 100 %.

Razmerja žilavosti so podobna kot pri udarnem upogibnem preizkusu. Pa tudi premik žilavostnih krivulj tenkih preizkušancev k nižjim popuščnim temperaturam je navzoč tako pri udarnih kot pri statičnih preizkusih, tako pri nelegiranih kot pri legiranih jeklih.

Vidimo, da je obnašanje tenkih preizkušancev podobno obnašanju debelih pri počasnem preizkušanju v tem smislu, da krivulje žilavosti nimajo relativnega maksimuma po popuščanju na 150°C (oz. 180°C), temveč kažejo le zastoj dviga žilavosti s popuščanjem na malo višji temperaturi. Vidimo podobnost krivulj žilavost-popuščna temperatura preizkušancev, zlomljenih hitro ali počasi.



Slika 8

Počasi upogibanje prob jekla Č.1940 (OC 100), kaljenega s 780°C. Obremenjevanje v treh točkah, razdalja fiksnih podpor 80 mm, hitrost obremenjevanja 200 kp/min.

Fig. 8

Slow bending of probes of Č.1940 (OC 100) steel quenched from 780°C. Loading in three points, distance between fixed supports is 80 mm, loading rate 200 kp/min

Vidimo razliko med popuščajnima temperatura-
ma, ki povzročita zastoj žilavosti pri tankih ali
debelih preizkušancih.

SKLEPI

1. Poskusi z nelegiranim jeklom Č. 1430, Č. 1940
(C 35, OC 100) kažejo strm porast žilavosti plošča-
tih preizkušancev, ki jih popustimo na 150°C —
vzrok je odprava napetosti. Rezilasti preizkušanci
še ne čutijo te odprave, ker se med preizkušanjem
ustvarjajo v vzorcih jekla velike večosne napetosti.
Vpliv večanja odpornostnega momenta na žilavost
raste s trdnostjo.

2. Popuščajne efekte moremo s preizkusi tankih
preizkušancev posamezno zasledovati: pri debelih
preizkušancih sovpadata efekta odprave napetosti

in izločanja epsilon karbida. Zato moramo preiz-
kušati vzorce debelin, podobnih debelinam orodij
ali konstrukcijskih delov, katere raziskujemo.

3. Hitrost preizkusa ne vpliva na premik
maksimumov krivulje žilavost-popuščajna tempera-
tura.

4. Razmerje strižna-normalna napetost v pre-
izkušancih ni pomembno pri zasledovanju po-
puščajnih efektov na jeklu, vendar je efekt popu-
ščanja veliko večji na zvojno kot na upogibno
obremenjenih delih, kar zadeva žilavost.

5. Vpliv strukturnih sprememb se bolje občuti
z merjenjem odpornosti proti lomu kot z merje-
njem dela za zlom preizkušanca.

Vir:

1. Nicodemi W.: Metallovedenie i termičeskaja obrabotka
metallov, 1966, No. 10, str. 76—77.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Vergleich der Kerbschlagzähigkeitswerte erhalten
durch die dynamischen und statischen Biege und Verdreh-
versuche, die Schlagversuche und Biegeversuche der dünnen
und dicken Proben zeigt die Vorteile der einzelnen Unter-
suchungsmethoden für die an Sonderfällen vorgesehenen
oder erwünschten Beanspruchungen der Fertigerzeugnisse.

Der Einfluss des Widerstandmomentes auf die Kerb-
schlagzähigkeit wächst mit der Festigkeit.

Die Biegeversuche an dünnen Proben machen die

Unterscheidung der Wirkung der Verminderung der Eigen-
spannungen von den Ausscheidungs- bzw. Struktureffekten
möglich.

Die Verdrehzähigkeit verändert sich durch das Anlas-
sen verhältnismässig mehr, jedoch ähnlich wie die Biege-
zähigkeit.

Der Einfluss der Strukturänderungen ist bei der
Messung des Bruchwiderstandes besser zu spüren als bei
der Messung der zum Bruch der Probe benötigten Arbeit.

SUMMARY

Comparison of toughness values obtained by the
dynamic and static, bending and torsional tests, multiple
impact and bending tests of thin and thick probes gives
the advantages of single methods for special cases of
expected or desired loading of single products.

Influence of the moment of resistance on the tough-
ness gains importance with the strength. Bending tests of
thin probes enable to distinguish effects of reduced in-

ternal mechanical stresses from the structural or preci-
pitation effects.

Torsional toughness varies with tempering in a similar
way as the bending one but the changes are more pro-
nounced.

Influence of structural changes is better determined
by measuring the resistance to breaking than by measuring
the breaking energy.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнения значений вязкости тонких и толстых образцов
путем испытания при динамических и статических условиях на
изгиб и кручение показали определенные преимущества способов
на отдельные примеры примененных или желаемых нагрузок из-
делий. Влияние момента сопротивления увеличивается с повы-
шением твердости.

Испытание тонких образцов на изгиб дает возможность

различать эффекты уменьшения внутренних напряжений от
эффектов растворения, от структурных эффектов. Хотя по-
добна изгибу, но сравнительно больше изменяется крутильная
вязкость.

Влияние структурных изменений более выразительно с из-
мерением сопротивления разрыву, чем при измерении работы,
необходимой на разрушение образца.