

1. Az indirekt acélexport termékcsopontonkénti adataiból következtetni lehet arra, hogy mely szektorok exportjának nagy az acélintenzitása, azaz az exportált berendezések acéltartalma. Az acélipari vállalatoknak célszerű arra törekedni, hogy ezeknek a szektoroknak az igényeit elégítsék ki minél nagyobb mértékben.
2. Hazánk indirekt acélexportja nagyobb az indirekt acélimportnál. A legnagyobb indirekt exporttöbblet a gépjárművek termékcsoportjánál realizálódik. A nettó direkt és indirekt acélkereskedelem mérlege azonban a jelentős

3. Az összehasonlítás céljából vizsgált két ország, Ausztria és Szlovákia direkt és indirekt acélkereskedelmének mérlege pozitív (mindkettő nagy direkt acélexportőr).
4. A valódi acélfelhasználás hazánk esetében kisebb a látszólagos acélfelhasználásnál, ami annak a következménye, hogy az indirekt acélkereskedelemben az export meghaladja az importot. Ausztria és Szlovákia esetében a látszólagos és a valódi acélfelhasználás hasonló nagyságú.
5. Az indirekt acélkereskedelem

adatait elsősorban az exportált berendezések acélintenzitásának elemzésénél érdemes hasznosítani, amit a fejlesztési koncepciók kidolgozása során lehet figyelembe venni. Ebből a szempontból az országban gyártott járművek hazai acéltartalmának növelésében vannak a legnagyobb lehetőségek.

Irodalom

Indirect trade of steel. A World Steel Association publikációja; elérés a honlapon keresztül (<https://www.worldsteel.org>).

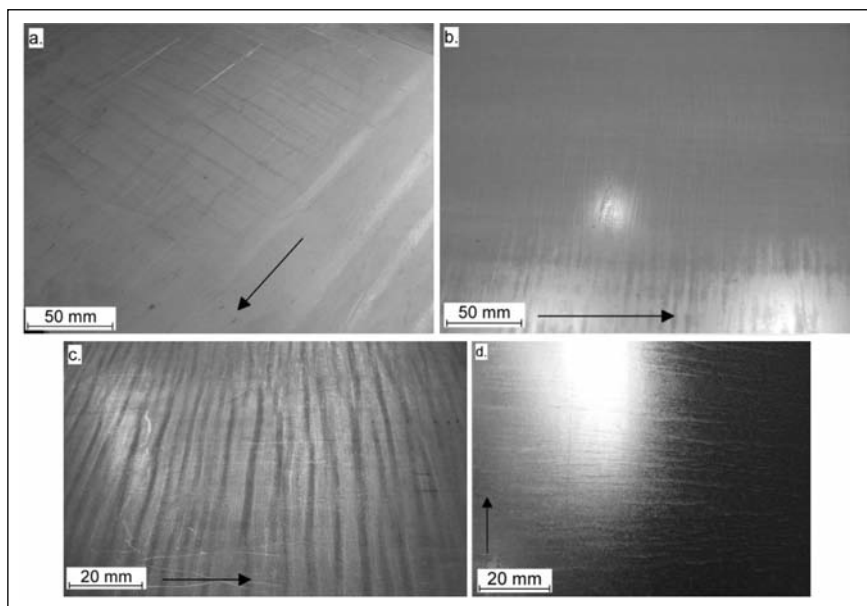
MUCSI ANDRÁS

A lágyacél szalagok feldolgozásakor jelentkező törésvonalasság jellegzetességei*

A cikk a lágyacél szalagokon megjelenő ún. törésvonalak képződési mechanizmusát, a mikro szerkezeti jellemzőit tárgyalja. A folyási- ill. törésvonalak olyan felületi hibák, melyek megjelenése a lágyacélok folyási jelenségéhez köthető. Az alakváltozási sávok vizsgálata nemcsak a felületi hiba tulajdonságainak szempontjából, hanem a rugalmas-képlékeny átmenet szempontjából is érdekes információkkal szolgálhat.

1. Bevezető

A törésvonalak lágyacél szalagokon megjelenő, szabálytalan alakú, periodikusan váltakozó fényes-matt felületi sávok. A sávok lokális alakváltozás eredményeként jönnek létre, az acéltekercek különböző gyártósorokon való feldolgozásakor. A leggyakrabban a melegen hengerelt, vagy lágyító hőkezelésen átesett tekercek lefejtésekor, a tekercs meneteinek „kiegyenesítésekor” keletkeznek, emiatt a sávok közel merőlegesek a hengerlési irányra [1–5]. A szalag alakí hibáiból adódóan (lencséség, ékesség,



■ 1. ábra. Törésvonalas szalagok fényképei: pácolt szalagon (a–c), valamint hidegen hengerelt és lágyított, majd horganyzott szalagon (d). A hengerlési irányt nyíl jelöli.

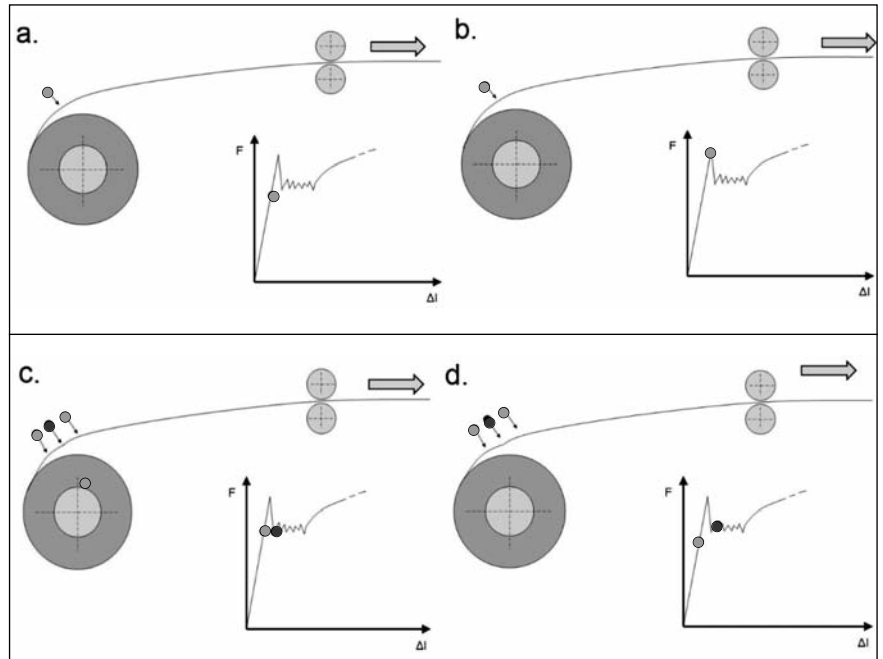
* A cikk első változata a XVI. Képlékenyalakító Konferencia (Miskolc, 2018. február 7-9.) kiadványában jelent meg.

Dr. Mucsi András okleveles gépészmérnök 2010-ben szerezte BSc-diplomáját az Óbudai Egyetemen. 2012-ben gépészmérnök MSc-, majd 2015-ben PhD-fokozatot szerzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. 2009 óta az Óbudai Egyetem munkatársa, 2016-tól adjunktusi beosztásban. 2017-től az ISD Dunaferr Zrt.-nél technológiafejlesztési szakértő.

keresztíveltség) szabálytalan alakúak és ritkán íves jellegűek. A törésvonalakat szokták alakváltozási sávoknak, illetve folyásvonalnak is nevezni. Minden olyan technológiánál megjelenhetnek, ahol az acélszalag rugalmas-képlékeny átmenete a folyási jelenséggel történik. Az 1. ábrán néhány törésvonalas szalagminta fotója látható.

A sávok a rugalmas-képlékeny átmenet instabilitásaként jönnek létre [6–8]. A tárgyalt felületi hiba csak olyan szalagon jelenik meg, melynek szakítódiagramját a felső-alsó folyáshatár és a folyási nyúlás jellemzi. Azoknál az anyagoknál, ahol nincs kifejezett folyási jelenség (pl. IF-acélok, vagy ferrit-martenzites duál fázisú acélok) a folyási vonalak sem jelennek meg. A melegen hengerelt, vagy lágyított szalag lefejtésekor, gyártósori hengereken való továbbításakor, húzva revetőrön való áthaladáskor a képlékeny alakváltozás megindításához a felső folyási feszültség szükséges, ugyanakkor a megfolyt térfogatrész alakváltozásának fenntartásához ennél kisebb feszültség is elegendő. Ez a viselkedés periodikus képlékeny-rugalmas alakváltozás sorozatához vezet. Példaként bemutatjuk a melegen hengerelt tekerics lefejtésekor képződő törésvonalak keletkezésének egyik mechanizmusát.

A szalag letekericselése során a soron következő menet lefejtésekor a szalag próbálja megtartani eredeti görbületét. Ennek hatására egy adott keresztmetszetben a feszültség eléri a felső folyási feszültséget. Amikor ez megtörtént, egy kis sávban az anyag megfolyik, azaz lokális alakváltozás történik. Ez a sáv ezután már az alsó folyási feszültség hatására is képes az alakváltozásra, amit pedig a környező térfogatrészek rugalmas alakváltozási energiája tart fenn. Az alakváltozott térfogatrész ún. képlékeny csuklóként viselkedik a továbbiak során, tehát az alakváltozás elindításához és fenntartásához szükséges feszültség kisebb, mint a környező térfogatrészekben. A szalag további lefejtésekor a képlékeny csukló eltávolodik a tekericsről, és egy újabb, rugalmas alakváltozás alatt lévő tekericsív fejlődik le, miáltal folytatódhat az instabil rugalmas-képlékeny átmenet (2. ábra) [7–9].



■ 2. ábra. A törésvonalassági hiba keletkezésének egyik mechanizmusa a tekerics lefejtése során [9]

Az itt leírt mechanizmustól eltérő módon is keletkeznek alakváltozási sávok az adott gyártósor és a szalag jellemzőitől függően.

2. A felületi hiba keletkezését befolyásoló tényezők

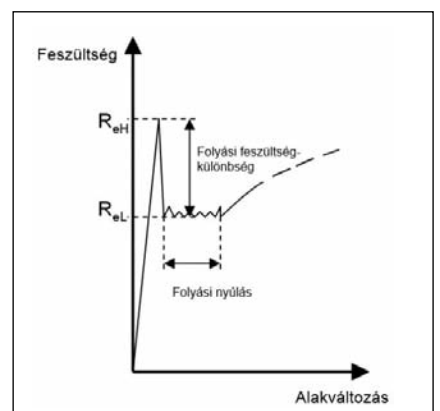
Meg kell jegyezni, hogy a felületi hiba nem minden esetben ugyanolyan formában és erősségben (intenzitásban) jelenik meg. Néha szabad szemmel alig-alig látható, halovány sávokként, néha egészen miniatűr jellegű, ún. mikrotörésvonalaként, néha pedig az egész szalagot beterítő fényes és fekete sávokként (pl. 1c ábra) vannak jelen. Az alábbiakban azokat a tényezőket gyűjtjük össze, melyek összefüggésben vannak a törésvonalak keletkezésével, azok vizuális intenzitásával.

A törésvonalak keletkezésének szükséges, de nem elégséges alapfeltétele, hogy az acél rendelkezzen folyási jelenséggel. A 3. ábrán bemutatott szakítódiagram kezdeti szakaszán a folyási jelenség két legfontosabb paraméterét, a felső-alsó folyáshatár közti különbséget, valamint a folyási nyúlást ábrázoljuk.

A 2. és 3. ábrán bemutatott értelmezés szerint tehát annál intenzívebb, markánsabb törésvonal képződésre lehet számítani, minél nagyobb a felső-alsó folyáshatár közti külön-

ség és minél nagyobb a folyási nyúlás mértéke. A két paraméter közül talán a felső-alsó folyáshatár közti különbség a meghatározó, ugyanis a képlékenyen megfolyt sáv alakváltozását a környező térfogatrészek rugalmas alakváltozási energiája biztosítja. Ez utóbbi viszont arányos a felső-alsó folyáshatár közti különbséggel. Kis felső-alsó folyáshatár közti különbségnél a rugalmas-képlékeny átmenet folytonosabb, egy-egy feszültség-esés után kismértékű képlékeny deformáció jön létre. A felső-alsó folyási feszültség közti különbséget az acél interstíciós ötvözőtartalma, szemcseszerkezete, szemcsemérete, valamint a szövetszerkezet inhomogenitása határozza meg.

Meg kell jegyezni, hogy a törésvo-



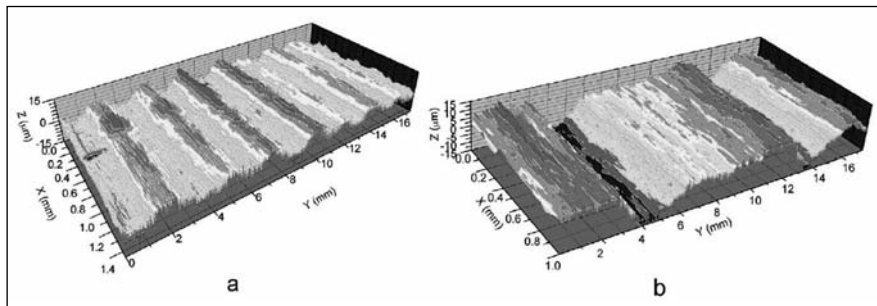
■ 3. ábra. A folyási jelenség paraméterei lágyacél szakítódiagramján értelmezve

nalassági szint és a folyási jelenség közti vizsgálódást nagyban nehezíti az a tény, hogy a szakítóvizsgálatból megállapítható felső folyási feszültség meglehetősen érzékeny a terhelésátadás centrikusságára [10–15].

A felsorolt fémtani jellemzőket (szemcseszerkezet inhomogenitása, szemcseméret, oldott intersztíciótartalom) a kémiai összetétel, meleg-hengerlési paraméterek (főként a hengerlési véghőmérséklet, szalaghűtési stratégia és csévélési hőmérséklet) befolyásolják. Jelentős szerepe van a tekercs lefejtési hőmérsékletének, hiszen ez erőteljesen befolyásolja a megfolyás mechanizmusát. A felsorolt jellemzők közül a szalag geometriai jellemzőinek is meghatározó szerepük van. Ezek közül a legfontosabb a szalagvastagság, hiszen ugyanakkora tekercsátmérő esetén a vastagság növekedtével a lefejtéskori alakváltozás nő. A lefejtéskori alakváltozás a vékony, 1,2–3 mm vastag szalagok esetén van a rugalmas-képlékeny alakváltozás határán, illetve valamivel afölött (a pillanatnyi tekercsátmérettől és a megelőző termomechanikus állapottól is függ). A szalag geometriai jellemzői közül meghatározó annak keresztívveltsége, meleghengerlés utáni maradófeszültségei, vékony lemezek esetén a lencsésességnek és a szalag ékességének is lehet szerepe, habár ez utóbbiakat szignifikánsan nem sikerült kimutatni melegen hengerelt szalagokra.

3. A törésvonalak topográfiai jellemzői

A törésvonalak topográfiája és felületi jellemzői meglehetősen érdekes és újszerű megfigyeléseket mutattak. A felületi hullámosságot és felületi érdességet Mitutoyo SurfTest PJ-301 típusú érdességmérővel, míg a mikroszkópi vizsgálatokat multifókusz-mikroszkóppal végeztük. A törésvonalas minták felülete érdekes alakot ölt: a fényes sávok a szalag „átlagsíkjából” kiemelkednek, míg a matt sávok anyagba irányulóak. A törésvonalak intenzitásának jellemzésére egy általában négyfokozatú skálát használnak, melyet vizuális megfigyelés és besorolás alapján állítanak fel. A fényes sávok legmagasabb pontja és a hullámvölgyek legmélyebb pontja kö-



■ 4. ábra. A 2-es (a) és 4-es (b) fokozatú törésvonalas minta 3D-s felületi felvétele [5]

zött 3–20 µm magasságkülönbség van a törésvonalak intenzitásától függően. A 4. ábra egy 2-es és egy 4-es fokozatú törésvonalas minta felületi topográfiáját mutatja.

A fényes és matt sávok közti távolság is változik a törésvonal fokozatszámának függvényében, értéke általában 0,5-7 mm között helyezkedik el. Tulajdonképpen a tárgyalt magasságbeli eltérés az oka annak, hogy bevonás (krómozás, festés stb.) során az emberi szem számára láthatóak maradnak, ezzel esztétikai hibát és reklamációt okoznak. Itt kell megemlíteni, hogy az esztétikai hibán kívül nem okozzák az acélszalag mechanikai tulajdonságainak megváltozását, a feldolgozás közbeni károsodását.

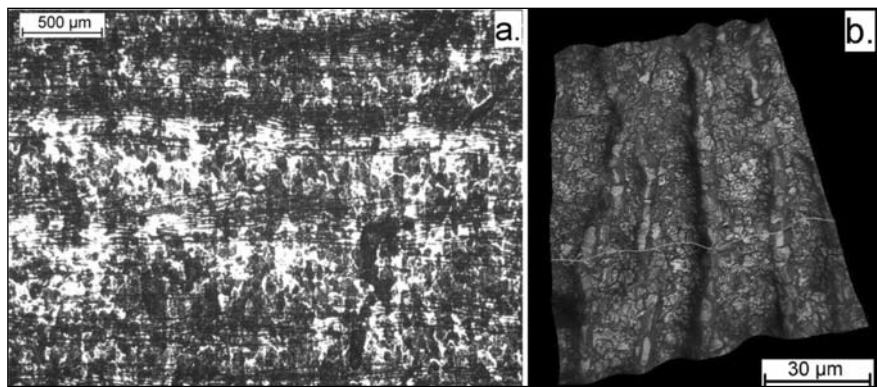
A törésvonalakat közelebbről, fémmikroszkópon megvizsgálva azt vehetjük észre, hogy a matt területeken a makroszkópiusan észlelhető alakváltozási sávokkal párhuzamos keskeny, néhány mikrométer szélességű mikroszkópius sávok is jelen vannak. Ezek a mikroszkópius sávok szabálytalanul haladnak végig a matt sávok területén, ugyanakkor sok helyütt egymáshoz viszonyított átlagos távolságuk lényegesen nem változik. A mikroszkópi felvételeket te-

kintve joggal feltételezhető, hogy ezek a lokális alakváltozás legkisebb érzékelhető jelei.

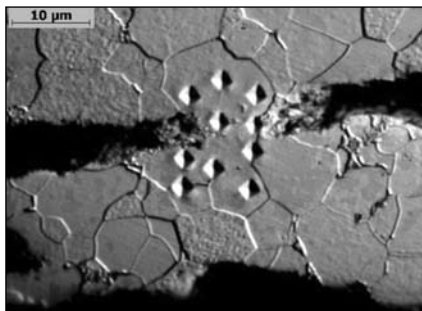
A mikroszkópius törésvonalak szélessége 5-8 µm, míg mélységük anyagba irányulóan 2-5 µm. A megjelenésüket figyelembe véve feltételezhető, hogy akkor alakulnak ki, amikor a szalag nyomófeszültséget kap. A bemutatott törésvonalasság ugyanakkor mindkét felületre jellemző, tehát a szalag továbbítóhengereken való hajlításakor az eredetileg húzott (belső, tekercs felőli oldal, lásd 2. ábra) oldal nyomóigénybevétel hatására az előzőekben tárgyaltakhoz hasonlóan viselkedik. A mikro-törésvonalak anyagszerkezeti vizsgálata mind technológiai, mind fémtani szempontból igen érdekes és fontos lépés lehet a rugalmas-képlékeny átmenet pillanatában lezajló folyamatok feltárásában.

4. A mikro-törésvonalak vizsgálatának eddigi eredményei

A mikro-törésvonalak behatóbb vizsgálatának céljából fémmikroszkópos és keménységmérésekre került sor. A vizsgálatok során az alábbi megfigyelések születtek. A mikro-törésvonalak



■ 5. ábra. A matt sávok területén jelen lévő mikro-törésvonalak fémmikroszkópos (a) és 3D-s optikai mikroszkópos (Hirox RH-2000) felvételei (b) [5]



■ 6. ábra. A mikrokeménység-mérés módja részlegesen felpolírozott törésvonalas mintán

rendszerint egy szemcsesoron haladnak keresztül, a szemcsék belsejében. A vonal irányára merőlegesen a szemcsék határát kiterjedten nem lépik át, a mikroszkóp fókuszát mozgatva azt lehet érzékelni, hogy a vonal mellett közvetlenül elhelyezkedő szemcse belseje felé mintegy 1-2 μm -es távolságban okoznak geometriailag érzékelhető deformációt. Tehát a szemcsehatárok akadályként szolgálhatnak a vonalak képződésekor, ez az eddigi elméletek alapján (pl. Hall-Petch [16–18]) talán érthető is. A mikro-törésvonalas mintát a felületén polírozva azt az állapotot is sikerült elérni, amikor néhány mikro-törésvonal mélyedése éppen felpolírozódott, viszont a sáv eredeti helye is látszik. Ebben az állapotban történtek a mikrokeménység-mérések, néhány a vonal eredeti pozíciójában, néhány pedig a vonalra merőlegesen, attól néhány mikrométerre a 6. ábra szerinti módon. 6-7 ilyen pozíciót kiválasztva és elemezve az tapasztalható, hogy a felpolírozódott vonalban a Vickers-lenyomatok ugyanazon terhelés (0,7, illetve 0,5 g) mellett kisebbnek bizonyultak, mint a vonal melletti szemcsékben. Kb. 80 ilyen mérést elvégezve megállapítható, hogy 30-50 HV keménységkülönbség tapasztalható a mikro-törésvonal és az őt körülvevő alakítatlan szemcsék között. Tekintettel arra, hogy a Cottrell-féle diszlokáció-leszakadási elmélettel nem magyarázható ekkora keménységnövekedés, joggal feltételezhető, hogy a mikro-folyásvonalak kialakulásakor intenzív diszlokációképződés is történik.

5. Összefoglalás

A cikkben bemutatottak a lágyacél szalagok feldolgozásakor jelentkező tö-

résvonalasság jelenségét. A felületi hiba képződésének fő feltétele, hogy az alapanyag rugalmas-képlékeny átmenete ne folytonosan történjék, hanem a felső-alsó folyási feszültség jelenlétében. A törésvonalak képződésének másik feltétele, hogy a rugalmas-képlékeny átmenet az egymás melletti szalagrészekben instabil módon, váltakozva, nem folytonosan menjen végbe. Ennek egy lehetséges mechanizmusát bemutattuk. A törésvonalak lokális alakváltozási sávok, melyek 3-20 μm közötti hullámmagassággal és mikroszkópikus, 5-8 μm széles mikroalakváltozási vonalakkal jellemezhetőek. A mikroalakváltozási vonalak elemzése és további vizsgálata a lágyacélok rugalmas-képlékeny átmenetekor történő alakváltozási mechanizmusokra (interszticiós atomok által rögzített diszlokációk leszakadása, illetve új diszlokációk keletkezése) és azok részarányára adhat magyarázatot.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-4-I. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A szerző ugyancsak hálás köszönettel tartozik az ISD Dunaferri Zrt.-nek a kísérleti anyagok biztosításáért.

Irodalom

- [1] H. Kobayashi: Origin of break marks produced in the processing of mild steel strip, Proceedings of the 41st Mechanical Working and Steel Processing Conference, Baltimore, 37 (1999), p. 743–752.
- [2] M. Sawada, H. Ibatá: The effect of deformation temperature on the formation of Lüders band in mild steel (from the viewpoint of “coil break”), SEASI Conference Proceedings, (1997), p. 1/1–1/7
- [3] H. McKenzie, P. E. Evans, P. Prickett: An investigation of coil break behaviour in hot rolled steel strip, AISE Annual Convention and Exposition, AISE, 2001PR-991-082.
- [4] A. H. Cottrell, B. A. Bilby: Dislocation theory of yielding and strain aging of iron. Proc. Phys. Soc. London Sect. A, 62, (1949), p.49–62.

- [5] A. Mucsi: Analysis of coil break defects, Engineering Failure Analysis, 83, (2018), p.109–116.
- [6] S. K. Thakur, B. Sarkar, B. Ghosh, R. Datta: Reduction in diversion due to coil break in CRNO grades of coils, case study, Engineering Failure Analysis, 2, (2014), p.76–83.
- [7] M. Dicky, M. H. Basri: Reducing coil break rejection at hot skin pass mill PT Krakatau steel, the Indonesian, Journal of Business Administration, 2, (2013), p.1131–1143.
- [8] L. Jun: Control technique of break marks in hot strip mill, Iron Steel, 44, (2009), p.68–71.
- [9] A. Mucsi, B. Verő, A. Portász: Coil break formation in low carbon steels, Proceedings of Rolling 2016 Conference, (2016), p.1042–1050.
- [10] J. R. Davis: Tensile Testing, second ed., ASM International, USA, 2004.
- [11] T. G. F. Gray, A. McCombe: Influence of specimen dimension and grip in tensile testing steel to EN 10 002., J Iron and Steel Making 19 (1992), p.405–409.
- [12] H.-B. Sun, Y. Kaneda, M. Ohmori, F. Yoshida: Effect of Stress Concentration on Upper Yield Point in Mild Steel, Materials Transactions 47 (1), (2006), p. 96–100.
- [13] J. G. Docherty, F. W. Thorne: The phenomenon of tensile yield in mild steel and iron, Engineering 132 (1931), p. 295–297.
- [14] M. M. Hutchinson: High upper yield point in mild steel, J. Iron Steel Inst., 186, (1957), p. 431–432.
- [15] A. Mucsi: Effect of gripping system on the measured upper yield strength estimated by tensile tests, Measurement 46, (2013), p. 1663–1670.
- [16] E. O. Hall: The deformation and aging of mild steel, II characteristic of the Lüders deformation, Proc. Phys. Soc. 46 (6) (1951), p. 747–753.
- [17] E. O. Hall: The deformation and aging of mild steel, III discussion and results, Proc. Phys. Soc. 46 (6) (1951), p. 747–753.
- [18] N. J. Petch: The cleavage strength of polycrystals, J. Iron Steel Inst. 5 (1953), p. 25–28.