

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav materiálového inženýrství



Korelace materiálových charakteristik oceli LC 200 N získaných zkouškou tahem a ohybem.

Correlation of material characteristics of steel LC 200 N obtained by tensile test and bending test.

Bakalářská práce

Studijní program: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: doc. Ing, Jiří Cejp, CSc.

Ivan Baďura

Praha 2015



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro:	Ivana B A Ď U R U
program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
obor:	Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
název česky:	Korelace materiálových charakteristik oceli L200 získaných zkouškou tahem a zkouškou ohybem.
název anglicky	Correlation of material characteristics of steel L200 obtained by tensile test and bending test.

Zásady pro vypracování:

Cíl:

Stanovit koeficienty korelace mezi charakteristikami mechanických vlastností, stanovených zkouškou tahem a zkouškou ohybem za teploty okolí, pro vysoce korozivzdornou ocel, legovanou dusíkem.

Postup:

1. Studijní a rešeršní činnost zaměřená korozivzdorné oceli a na podstatu zkoušení mechanických vlastností kovových materiálů a fyzikální podstatu materiálových charakteristik.
2. Seznámení se zkušebním zařízením ÚMI FS ČVUT.
3. Stanovení experimentálního programu a příprava vzorků ve firmě Bolzano.
4. Vlastní experimentální program - zkoušky základních mechanických vlastností.
5. Zhodnocení naměřených hodnot, diskuse a závěry.

Rozsah průvodní zprávy: 30 – 40 stran

Rozsah grafických prací: dle potřeby

SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:

- [1] XIAN, A.- ZHONGYANO,S.: Direct Comparison between Tensile Strength and Flexural Strength of Ceramic/Metal Brazing Joint.Chin.J.Met.Sci.Technol. Vol.8,1992
- [2] KLUG,T.-REICHERT,J.-BRUCKNER,R.: Contribution to the problem of tensile and bending-test method for SiC-fibre-reinforced glass. Journal of Materials Science 1993, Volume 28, Issue 23, p. 6303

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Jiří Cejp, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015

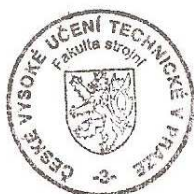
Datum odevzdání bakalářské práce: 19. června 2015

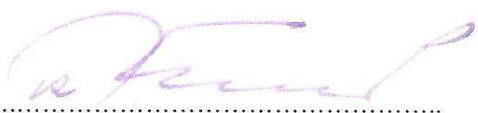
Neodevzdá-li student bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne: 30.4.2015 
student


Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
vedoucí ústavu




Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 28. dubna 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 25.06.2015



Ivan Baďura

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Cejpovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a především za jeho vstřícnost a čas. Dále děkuji firmě Bohdan Bolzano s. r. o. Ing. Luboši Procházkovi za poskytnutí vzorků, jeho čas a pomoc při konzultování.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením koeficientů korelace mezi charakteristikami mechanických vlastností vysoce korozivzdorné oceli LC 200 N legované dusíkem. V teoretické části je popsán přehled jednotlivých druhů koroze, korozivzdorných ocelí a použitých zkoušek oceli. Experimentální část obsahuje výsledky zkoušek tahem, ohybem a tvrdosti a na podkladě materiálových charakteristik je provedeno jejich srovnání.

This thesis deals with the determination of the correlation coefficients between the characteristics of high mechanical properties of stainless steel LC 200 N nitrogen alloyed. The theoretical part describes the overview of the various types of corrosion, stainless steels and steel tests used. The experimental part contains the results of tensile, bending and hardness tests and on the basis of material properties was made their comparisons.

Klíčová slova

Korozivzdorné oceli, korelace, zkouška tahem, zkouška ohybem

Keywords

Stainless steels, correlation, tensile test, bending test

BAĎURA, Ivan. 2015. *Korelace materiálových charakteristik oceli LC 200 N získaných zkouškou tahem a zkouškou ohybem.* Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce doc. Ing Jiří Cejp, CSc.

1	ÚVOD	9
2	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1	KOROZE.....	10
2.1.1	<i>Koroze chemická</i>	10
2.1.2	<i>Koroze elektrochemická</i>	10
2.1.3	<i>Druhy korozního napadení</i>	11
2.2	CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ	13
2.3	DRUHY KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ.....	15
2.3.1	<i>Chromové</i>	15
2.3.2	<i>Chrom-niklové</i>	15
2.3.3	<i>Chrom-manganové</i>	16
2.3.4	<i>Austenitické</i>	16
2.3.5	<i>Feritické</i>	17
2.3.6	<i>Martenzitické</i>	18
2.3.7	<i>Dvoufázové (duplexní) oceli</i>	18
2.3.8	<i>Precipitačně vytvrditelné</i>	19
2.4	OCEL LC 200 N	20
2.4.1	<i>Výroba oceli LC 200 N</i>	20
2.4.2	<i>Tepelné zpracování</i>	21
2.4.3	<i>Zmrazování</i>	22
2.4.4	<i>Přehled mechanických vlastností při rozdílném tepelném zpracování</i>	22
2.4.5	<i>Korozivzdornost</i>	23
2.5	MECHANICKÉ ZKOUŠKY APLIKOVANÉ NA OCELI LC 200 N	24
2.5.1	<i>Zkouška tahem</i>	24
2.5.2	<i>Zkouška ohybem</i>	29
2.5.3	<i>Zkouška tvrdosti podle Vickerse</i>	33
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
3.1	EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A PŘÍPRAVA VZORKŮ	34
3.2	EXPERIMENTÁLNÍ METODY	36
3.2.1	<i>Zkouška tahem</i>	36
3.2.2	<i>Zkouška ohybem</i>	37
3.2.3	<i>Měření tvrdosti</i>	37
3.2.4	<i>Měření drsnosti</i>	37
3.3	VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE	38
3.3.1	<i>Výsledky zkoušky tahem</i>	38
3.3.2	<i>Výsledky zkoušky ohybem</i>	41
3.3.3	<i>Výsledky zkoušky tvrdosti</i>	43
3.3.4	<i>Výsledky měření drsnosti</i>	44
3.4	DISKUZE	45
4	ZÁVĚR	47
5	LITERATURA	48
6	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	50
7	SEZNAM TABULEK	51
8	PŘÍLOHY	52

1 ÚVOD

Koroze kovů je nežádoucím procesem vznikajícím na základě fyzikálně-chemické interakce kovů a prostředí, vedoucí k jejich změnám vyvolávající významné zhoršení jejich vlastností a celkového technického stavu systému. Použití kovů je vázáno na užité vlastnosti, zejména mechanické, jako pevnost a houževnatost, ale často i tepelná a elektrická vodivost. Aby kov mohl sloužit své funkci, musí být i dostatečně korozně odolný, tak aby zajistil spolehlivou korozní odolnost po dobu životnosti výrobku a nedocházelo k jeho předčasnému znehodnocení.

To je v praxi často velmi náročným úkolem, a proto je korozně odolným materiálů věnována velká pozornost. Jedním z materiálů vykazujícím dobrou korozní odolnost v mnoha prostředích je korozivzdorná ocel. Její korozní odolnost závisí především na obsahu chrómu, který zajišťuje vznik pasivační vrstvy. Ale jen pouhá korozní odolnost nestačí. Cílem při vývoji je také zvyšování užitečných vlastností pro stále se zvyšující technické parametry strojů a průmyslových zařízení. Splnění těchto požadavků je možné zavedením progresivnějších technologií výroby a zpracování, které vede ke zvyšování jakosti i technických parametrů poměrně malou modifikací chemického složení stávajících druhů ocelí a slitin. Tento trend ve zvyšování korozní odolnosti je doprovázen také velkou snahou o zlepšení mechanických vlastností, zpracovatelnosti, žárovevnosti, svařitelnosti a pevnostních vlastností za nízkých teplot při zachování dobré tažnosti a houževnatosti. [1]

Tato práce byla vytvořena na základě spolupráce ústavu materiálového inženýrství fakulty strojní a firmy Bohdan Bolzano s. r. o. Předmětem spolupráce bylo stanovit charakteristiky mechanických vlastností vysoce korozivzdorné, dusíkem legované nástrojové oceli LC 200 N v tahu a ohybu a výsledky následně porovnat. V teoretické části jsou obecně popsány druhy korozního napadení, vlastnosti korozivzdorných ocelí, jejich základní rozdělení, zkouška tahem a zkouška ohybem, které byly vybrány k získání koeficientů korelace a zkoušky tvrdosti podle Vickerse. Podrobně jsou zde uvedeny informace o oceli LC 200 N. Experimentální část obsahuje výsledky mechanických vlastností výše uvedených zkoušek a na podkladě materiálových charakteristik bylo provedeno jejich porovnání.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Koroze

Koroze je samostatně probíhající nevratný proces. Dochází u něj k postupnému narušování a znehodnocování materiálů chemickými a fyzikálně-chemickými vlivy prostředí. Korozi podléhají téměř všechny materiály, nejen kovy a slitiny, ale i nekovové anorganické materiály. Při korozní ochraně je snaha ovlivnit tři základní faktory korozního systému: materiál, korozní prostředí a rychlost vzniku koroze. [2]

Při korozi kovů přechází kov do zoxidovaného stavu. Oxidace v obecném smyslu znamená, že kov ztrácí elektrony. Téměř všechny kovy jsou z termodynamického hlediska nestabilní. V přírodě se technické kovy nenalézají v ryzím stavu, ale ve formě stabilnějších sloučenin oxidů nebo siřičků. Kovy se tedy snaží navrátit do své původní podoby v případě, že jim v tom nezabráníme vhodnou korozní ochranou. [2]

2.1.1 Koroze chemická

Děj, při kterém dochází k chemické reakci prostředí s materiálem (tzn. atomy materiálu a prostředí v přímém kontaktu se vzájemně ovlivňují). Konkrétně u kovů se jedná o přestup elektronů kovu do korozní zplodiny (př. koroze kovů za zvýšené teploty). Jde částečně o chemické a částečně o fyzikálně-chemické reakce (např. rozpouštění, hydrolýza, vylouhování, výměna iontů atd.), které se vyskytují:

- a) U koroze elektricky nevodivých nebo velmi málo vodivých látek jako je sklo, organické materiály atd.
- b) U koroze kovů v plynných prostředích za zvýšených teplot, v redukčních plynných prostředích a nevodivých organických prostředích (organická rozpouštědla apod.). [2]

2.1.2 Koroze elektrochemická

Vyznačuje se tím, že pro její vznik je potřebná přítomnost elektrolytu (převážně kapalně prostředí), ve kterém je umožněn průchod proudu pohybujícími se ionty a elektrony. V kovu se tím pádem mohou pohybovat tyto části i na větší vzdálenost, než mají dva sousední atomy a vznikne tak korozní článok, který lze přirovnat ke galvanickému článku. Mezi elektrodou galvanického článku a elektrolytem vzniká elektrické napětí, tzv. elektrický

potenciál. Jeho velikost závisí na druhu kovu a elektrolytu a může určit náchylnost určitého kovu ke korozi. [2]

2.1.3 Druhy korozního napadení

Korozivzdorné oceli jsou používány právě pro aplikace ve vysoce agresivním prostředí je potřebné znát příčiny a průběh vzniku jednotlivých druhů korozního napadení a na základě těchto poznatků volit vhodné chemické složení korozivzdorné oceli.

Celková plošná koroze:

U korozivzdorných materiálů dochází k rovnoměrné plošné korozi pouze v kyselinách a silných loužích. Dobře odolné jsou proti tomuto druhu korozi austenitické oceli legované molybdenem. Ovšem záleží, jak moc jsou tyto kyseliny koncentrované. Za optimální oceli se považují materiály, které mají roční úbytek materiálu pod 0,1 mm. [3]

Bimetalická (galvanická) koroze:

Dochází k ní v případě styku dvou různých kovů (např. u šroubového spoje nebo jiném dotyku dvou součástí z různých druhů kovů. Pokud se dva různé kovy nacházejí v elektrolytu, může z méně ušlechtilého kovu proudit elektrický proud směrem k ušlechtilejšímu kovu (princip anoda → katoda). Méně ušlechtilý kov bude v takovém případě korodovat mnohem rychleji, než kdyby byly v přímém kontaktu. Korozivzdorné oceli bývají ve většině případů katodou. Rychlost koroze je závislá na velikosti plochy styku, teplotě a složení elektrolytu. Tato koroze často vzniká při použití ocelových a pozinkovaných šroubů, které by jinak vydržely bez poškození dlouhé roky. Dalším příkladem je použití hliníkových nýtů apod. Tato koroze může následně znečištěním přejít i korozivzdornou ocel. [3]

Důlková/bodová koroze:

K této korozi může docházet, pokud v určitém místě dojde k porušení pasivované vrstvy. V případě výskytu chloridových iontů, a to hlavně při zvýšených teplotách vznikají důlky často i velikosti vpichu jehly. Nebezpečí důlkové koroze u korozivzdorných ocelí zvyšují usazeniny, cizorodá rez, zbytky strusky a jiné cizorodé nečistoty. Odolnost proti důlkové korozi je možné vylepšit zvýšením obsahu Cr, převážně však Mo a ještě častěji N. [3]

Mezikrystalová koroze:

Mezikrystalová koroze vzniká za zvýšených provozních teplot. V takovém případě na hranicích zrn dochází k vylučování karbidu Cr. U austenitických ocelí se jedná o teploty v rozmezí 450 – 850 °C, u feritických ocelí se jedná o teploty nad 900 °C. Tyto teploty jsou časté např. při svařování v okolí svarového spoje. V praxi se mezikrystalické korozi předchází snížením obsahu C nebo vázáním C na Ti nebo Nb. Další možností je rozpouštěcí žíhání na teplotě 1000 – 1150 °C. [3]

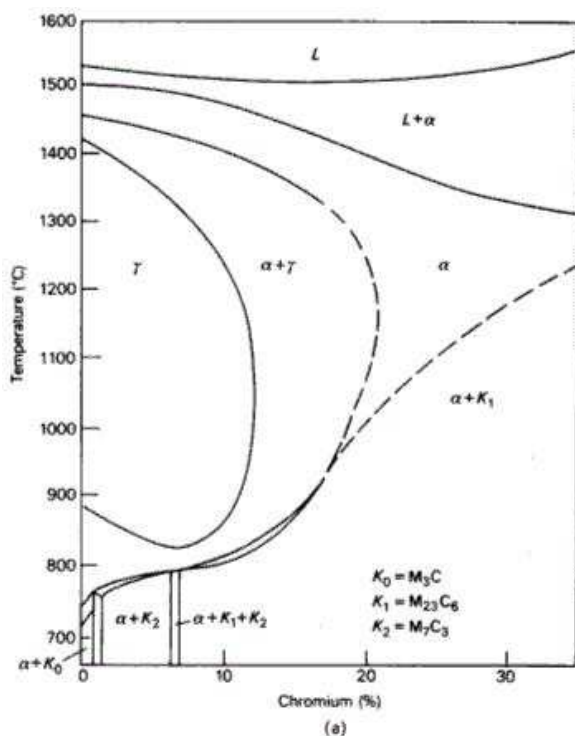
Štěrbínová koroze:

Je vázána na výskyt trhlin a spár v povrchu oceli. Ty většinou vznikají konstrukčně nebo provozem. Platí pro ni stejná pravidla jako u důlkové/bodové koroze včetně legur. [3]

Koroze při mechanickém napětí:

Vlivem mechanického namáhání materiálu vznikají trhliny a probíhá mezikrystalová koroze. Koroze při mechanickém namáhání vzniká pouze v případě, je-li konstrukční díl vystaven tahovému napětí v místech, kde působí korozní prostředí, které obsahuje chloridové ionty. Další podmínkou je, že namáhaná ocel jeví náchylnost ke korozi při mechanickém namáhání. Při tahových napětích není důležité, jestli se jedná o povrchové nebo vnitřní pnutí. U austenitických ocelí se dá vylepšit jejich odolnost zvýšením obsahu Ni. Běžné austenitické oceli CrNi a CrNiMo oceli jsou náchylnějšími k napěťové korozi, pokud jsou umístěny v chloridových lázních. [3]

2.2 Charakteristika korozivzdorných ocelí



Obrázek 1 Fe-Cr diagram [4]

Základním prvkem vysokolegovaných korozivzdorných ocelí je chróm. Tyto oceli jsou schopné pasivace, která jím dává odolnost proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Aby mohlo docházet k této pasivaci, musí být obsah chrómu v tuhém roztoku vyšší než 11,5 %. Korozivzdornost významně ovlivňuje i obsah uhlíku v oceli, který s chrómem vytváří karbidy. Korozní odolnost ovlivňuje i kvalita povrchu součásti. Pro tyto oceli, vyjma chromové austenitické oceli, je charakteristický nízký obsah uhlíku, který je většinou nižší než 0,08 %. Tvorbou karbidů se v tuhém roztoku snižuje obsah chrómu a tím se

snižuje korozní odolnost v těchto ochuzených místech. To je způsobeno tím, že C má vyšší difuzní rychlost než Cr. Ta se může vyskytovat v tepelně ovlivněné oblasti při svařování. Ochranu proti mezikrystalické korozi lze provést snížením obsahu uhlíku na množství, které je rovno nebo menší než rozpustnost C v matici při teplotách kdy ještě dochází k vylučování karbidů, nebo přidáním legujících prvků s vyšší afinitou k uhlíku než afinita chrómu. Nejčastěji používanými prvky jsou Nb, Ta a Ti. Jsou přidávány v takové koncentraci, aby odpovídala stechiometrickému složení karbidů NbC, TaC a TiC. Takové oceli nazýváme stabilizované. Druhým nejvýznamnějším prvkem vedle chrómu je u korozivzdorných ocelí Ni, který přispívá ke zvýšení korozivzdornosti. Jelikož Cr i Ni mají velký vliv na strukturu těchto ocelí, byl zaveden pro skupinu prvků uzavírajících oblast γ v diagramu na obrázku 1 pojem chromový ekvivalent Cr_{ek} , který udává ekvivalentní působení koncentrace na rozsah oblasti γ k působení 1 % obsahu Cr:

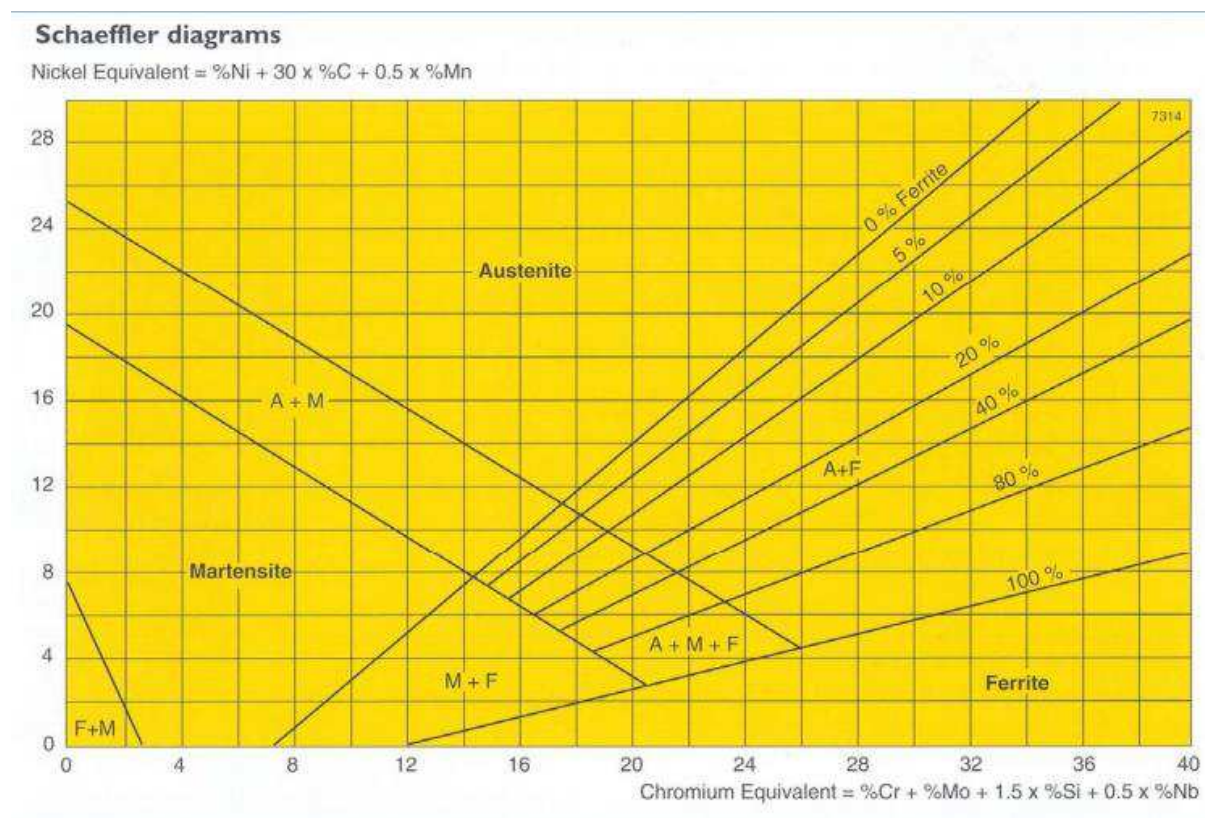
$$Cr_{ek} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb + 5 V + 3 Al \text{ [hm \%]} \quad (1)$$

Největší vliv z austenitotvorných prvků má na strukturu matrice Ni, proto byl podobně jako u Cr zaveden a pojem niklový ekvivalent Ni_{ek} vyjádřený

$$Ni_{ek} = Ni + 30 C + 0,74 Mn + 0,33 Cu + A (N - 0,045), \quad (2)$$

kde A je konstanta závislá na obsahu N. Při obsahu N do 0,2 % je konstanta A = 30, pro N = 0,21 – 0,25 % je A = 22, pro N = 0,26 – 0,35 % je A = 20.

Zavedením Cr_{ek} a Ni_{ek} lze pomocí Schaefflerova diagramu na obrázku 2 určit vliv chemického složení na strukturu korozivzdorné oceli. V tomto diagramu ovšem není zahrnut vliv V a A. [5][6]



Obrázek 2 Schaefflerův diagram [7]

2.3 Druhy korozivzdorných ocelí

Trh nabízí velké množství antikoročních ocelí, které jsou v závislosti na mikrostruktuře rozdělovány dle struktury do 4 základních skupin na oceli feritické, austenitické, martenzitické a dvoufázové neboli duplexní. Ty se dále dělí na austeniticko-feritické, martenziticko-austenitické a feriticko-martenzitické. [8] Jiné dělení těchto ocelí je podle chemického složení na chromové, chrom-manganové a chrom-niklové. [9]

2.3.1 Chromové

Hlavní legujícím prvkem je u těchto ocelí Cr. V oceli je obsažen v rozmezí 8 – 30 %. Velký vliv na korozní odolnost má jakost opracovaného povrchu. Pro to, aby byla dosažena stabilní pasivní vrstva je potřebné leštění povrchu součástí. Dle procentuálního zastoupení Cr dělíme korozivzdorné oceli na:

- Chromové oceli s 13 % Cr
- Chromové oceli s 18 % Cr
- Chromové oceli s 22 – 30 % Cr [9]

2.3.2 Chrom-niklové

Přidáním vhodného poměru Cr a Ni do oceli lze po tepelném zpracování získat nemagnetickou austenitickou matici, která je pro tento druh oceli charakteristická. Obsah těchto prvků se pohybuje v rozmezí 12 – 25 % Cr a 8 – 30 % Ni. Při vyšším obsahu se jedná o žáruvzdorné oceli. Obsah C je zpravidla mezi 0,01 – 0,15 %. Další vyskytující se varianty obsahují přísady N, Mo, Cu nebo Si. Další dělení je na základě struktury a případných dalších přísad na:

- Nestabilizované austenitické oceli
- Stabilizované austenitické oceli
- Austenitické oceli s velmi nízkým obsahem C
- Austenitické oceli s přísadou Mo
- Austenitické oceli s přísadou Mo a Cu [9]

2.3.3 Chrom-manganové

Z důvodu poměrně vysokých cen a vzhledem k velké spotřebě chrom-niklových ocelí byla potřeba nahradit Ni méně nákladným prvkem. Tomu nejvíce vyhovoval Mn, který je stejně jako Ni austenitotvorným prvkem a otevírá oblast γ (austenit), s přídavkem N a Cu. Vhodnou kombinací těchto legujících prvků je možné dosáhnout srovnatelných vlastností jako u chrom-niklových ocelí. Chrom-manganové oceli se dále dělí na:

- Austenitické oceli typu Cr – Mn – Ni – N
- Austenitické oceli typu Cr – Mn – N [9]

2.3.4 Austenitické

Austenitická struktura vzniká při vhodném obsahu austenitotvorných prvků, kterými jsou hlavně Ni, Mn a N. Obsahují přibližně 18 – 20 % Cr a 8 – 11 % Ni. Rozpustnost uhlíku je 0,03 %. Při vyšším obsahu uhlíku se austenitické Cr-Ni oceli tepelně zpracovávají rozpouštěcím žháním přibližně na teplotě 1050 °C a následně se z této teploty rychle ochlazují na teplotu okolí. Ochlazování se nejčastěji provádí ve vodním prostředí. Tím se potlačuje precipitace karbidů a získá se austenitická struktura. Po tepelném zpracování jsou měkké a houževnaté a při tváření za studena dochází k jejich rychlému zpevnění. Modul pružnosti mají cca 190 GPa. Mez kluzu při tažnosti 40 – 50 % je u těchto ocelí v rozmezí 175 - 250 MPa. Austenitické korozivzdorné oceli jsou nemagnetické. Níže jsou popsány základní a doprovodné prvky ovlivňující vlastnosti austenitických ocelí:

- Cr zajišťuje pasivaci ocelí a odolnost proti oxidaci.
- Ni stabilizuje austenit za pokojové teploty a napomáhá zvyšovat korozní odolnost v redukčních kyselinách.
- Si vyvolává praskavost, ale v koncentraci 3 – 4 % odstraňuje náchylnost na mezikrystalickou korozi a zvyšuje korozní odolnost ve vroucí kyselině dusičné.
- N zvyšuje pevnost a v kombinaci s Mo také odolnost proti bodové a štěrbinové korozi.
- C je silně austenitotvorný. Zvyšuje pevnost a stabilizuje austenit při tváření za studena. Vyvolává ovšem náchylnost k mezikrystalové korozi.
- Mn jako austenitotvorný prvek může nahradit nákladnější Ni. Nad 3 % snižuje sklon k praskání svarů, ale zhoršuje obrobiteľnosť.

- Mo zvyšuje odolnost proti korozi ve všech prostředích s výjimkou vroucích roztoků kyseliny dusičné, podporuje žárupevnost a vylučování intermediálních fází. Opačný negativní efekt má na žáruvzdornost oceli.
- Cu je slabě austenitotvorný. Zvyšuje odolnost proti korozi v kyselině sírové a zlepšuje obrobiteľnosť.
- Ti a Nb díky vysoké afinitě k C vytváří v ocelích karbidy a snižují tak obsah uhlíku v matici (stabilizace ocelí). Tyto prvky mají vysokou afinitu i k N.
- Al zvyšuje korozivzdornost. S niklem vytváří intermediální fázi a používá se k precipitačnímu vytvrzování.
- S, Se, P, O při vyšších obsazích zlepšují obrobiteľnosť, ale také snižují korozivzdornost.[6][10]

2.3.5 Feritické

Obsah Cr mají do 30 % a C do 0,008 %. Při tuhnutí se z taveniny vylučuje chromový ferit. Rozpustnost uhlíku v chromovém feritu je nižší než 0,01 %. Uhlík při vyšších koncentracích je vyloučen ve formě karbidů a určuje korozní odolnost. Tyto karbidy mohou způsobit křehnutí oceli. Převažující strukturní složkou za normální teploty je α ferit. Feritické oceli s vyšším obsahem uhlíku jsou při pokojové teplotě křehké a jsou používány jako žáruvzdorné oceli. Feritické korozivzdorné oceli se vyznačují tím, že nedochází k přeměně na austenitickou strukturu. Nelze je proto kalit. Vyznačují se tím, že jsou magnetické. Při chladnutí oceli dochází k transformaci austenitu na martenzit a výsledná struktura může být feriticko-martenzitická. Martenzit zvyšuje tvrdost a pevnost ocelí. Při obsahu uhlíku nižším než 0,1 % se pro dosažení feritické struktury leguje ocel nad 17 % Cr. Nevýhodou u feritických ocelí je, že při teplotách 350 - 550 °C dochází k jejich křehnutí. K maximálnímu křehnutí dochází při teplotě 475 °C.

Znalost křehnutí feritických ocelí v oblasti těchto teplot má praktický význam např. u svařování. Při nízkém obsahu uhlíku a dusíku pod 0,01 % lze získat za pokojové teploty ocel s dobrou houževnatostí. Feritické oceli s velmi nízkým obsahem C a N jsou oproti austenitickým ocelím méně nákladné a v mnoha případech je nahrazují. Např. ve feritických automatových ocelích je obsažená síra více než 0,15 %, která ovšem výrazně snižuje jejich korozivzdornost. [6][10]

2.3.6 Martenzitické

Z korozivzdorných ocelí obsahují nejvyšší obsah uhlíku. Koncentrace uhlíku je v těchto ocelích omezena rozmezím 0,08 – 1 %. Ferit může být obsažen pouze 20 %. V případě, že obsah uhlíku je nižší, než je povolená hranice 0,08 %, je nutné provést kompenzaci přísadou Ni. Při množství Cr větším než 5 % jsou martenzitické oceli samokalitelné. Korozní odolnost získávají až po tepelném zpracování v zakaleném stavu. Popouštěním na teplotu 450 – 550 °C se snižuje korozní odolnost a v případě obsahu C nad 2 % se při popouštění na 350 – 550 °C projevuje popouštěcí křehkost. Při popouštění na vyšší teploty nastává difuze Cr snižuje se korozivzdornost. Nejpoužívanějšími martenzitickými ocelmi jsou oceli s obsahem Cr 13 % a C do 0,25 %. Jsou svařitelné. Uplatnění nacházejí např. v potravinářském průmyslu, zdravotnické technice a při stavbě vodních strojů. Martenzitické korozivzdorné oceli můžeme dále rozdělit na oceli bez obsahu niklu a s obsahem niklu. [6][10]

2.3.7 Dvofázové (duplexní) oceli

Dvofázové neboli duplexní struktury jsou zastoupeny ocelmi austeniticko-feritickými, martenziticko-austenitickými a feriticko-martenzitickými. Nejrozšířenější skupinou dvofázových ocelí jsou oceli austeniticko-feritické. Jedná se o korozivzdorné oceli s obsahem feritu 40 – 60 %. Obsah křemíku je limitován do 1 %, obsah fosforu 0,035 % a obsah síry 0,015 %. Tepelné zpracování je obdobné jako u austenitických korozivzdorných ocelí. Po rozpouštěcím žháním a rychlém ochlazení se dosahuje meze kluzu 420 – 530 MPa a tažnost cca 20 %. Kvůli velkému množství legujících prvků vykazuje vysokou chemickou heterogenitu, a proto je vhodné volit žhací teplotu až na 1200 °C. Je legována molybdenem, mědí, popřípadě dusíkem. Jedná se o materiál odolný proti působení anorganických kyselin (kyseliny sírové a fosforečné). Je odolná vůči některým organickým kyselinám, mořské vodě a prostředí, které obsahují chloridové ionty. Jsou dobře tvářitelné a odolné proti korozi mezikrystalické, bodové a štěrbinové a hlavně odolává koroznímu praskání. Duplexní oceli jsou lépe obrobitelné než čistě austenitické korozivzdorné oceli, ale nelze je kalit. V prostředích, která obsahují anionty Cl, J, Br se snižuje jejich korozní odolnost. Rovnicí (3) je vyjádřen index odolnosti proti bodové korozi (tzv. Pitting Resistance Equivalent). $PRE > 40$ udává koncentraci prvků zvyšujících odolnost proti bodové korozi oceli.

$$PRE = \% Cr + 3,3 + Mo + 16 \text{ až } 30 \% Ni \quad (3)$$

S růstem hodnoty PRE roste lineárně i odolnost v prostředích obsahující chloridy. Pro jejich konečné použití se provádí tepelné zpracování rozpouštěcím žíháním. Jsou využívány u exponovaných součástí pro letecký a kosmický průmysl, výrobu strojů pro lisování plastů a gumy atd. [5][6][10]

2.3.8 Precipitačně vytvrditelné

Požadované mechanické vlastnosti se získávají tzv. vytvrzováním. Vytvrzování se provádí za relativně nízkých teplot a lze ho provádět i na již obrobenech součásti. To je výhoda oproti zbylým druhům korozivzdorných ocelí, jelikož u martenzitických ocelí je pro dosažení požadované pevnosti nutné součást kalit a popouštět a u austenitických ocelí lze mechanické vlastnosti ovlivnit pouze chemickým složením nebo tvářením za pokojové teploty. Dle strukturálních změn probíhajících při vytvrzování se tyto oceli dělí do dvou skupin:

Martenzitické precipitačně vytvrditelné oceli

Během tepelného zpracování dochází k martenzitické přeměně a následně k precipitaci v martenzitu. Vytvrzování probíhá na teplotě mezi 400 – 500 °C a z martenzitu se vylučují fáze typu Ni₃Ti a Ni₃Cu, které mají za následek růst pevnosti oceli na 1 300 až 1 500 MPa.

Austenitické precipitačně vytvrditelné oceli

Jedná se o austenitické oceli obsahující precipitačně vytvrzující prvky (Ti, Al, V). Přidávají se v takovém rozsahu, aby při teplotě 700 °C docházelo k vylučování karbidů, nitridů nebo intermetalických sloučenin typu Ni₃Ti a Ni₃Cu. Tím se výrazně zvyšuje pevnost. Korozní odolnost je srovnatelná s běžnými austenitickými oceli. Často jsou řazeny k žárupevným ocelím (př. X4NiCrTi25-15, WNr. 1.4944).[10]

Tyto oceli nacházení uplatnění např. pro součásti namáhané při vyšších provozních teplotách, v letectví, při stavbě turbín atd. [10]

2.4 Ocel LC 200 N

Tato část je podrobně zaměřená na informace o korozi odolné oceli pod značením LC 200 N vyráběná německou firmou Zapp GmbH. Vzhledem k ostatním často využívaným korozi odolným nástrojovým ocelím 1.2316, 1.4112 a 1.4151 nabízí LC 200 N výraznější korozi odolnost a houževnatost i odolnost proti popouštění při teplotách až 500 °C a tvrdostech 58 – 60 HRC. [21]

Nejvíce je využívána v oblastech pro výrobu řezacích rotorů, extrudérů, ve zbrojním a letecko-kosmickém průmyslu, na výrobu speciálních ložisek a kuličkových šroubů, hřídelí a jiných strojních součástí pro vysoce korozi prostředí, forem na plasty s vysokými nároky odolnosti proti korozi a dobrou houževnatost, plnicích potravinářských zařízení, chirurgickou a jinou techniku. [22]

Dle údajů firmy Bolzano odpovídá chemické složení tomuto standardu:

%	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
min.	0,25	-	-	14,00	-	0,85	0,30
max.	0,35	1,00	1,00	16,00	0,50	1,10	0,50

Tabulka 1 Chemické složení korozi odolné oceli LC 200 N [22]

2.4.1 Výroba oceli LC 200 N

LC 200 N se vyrábí elektrostruskovým přetavováním. Jedná se o proces sekundární metalurgie, kdy se dosahuje nejvyšší metalurgické čistoty až mikročistoty materiálu. Elektrodou je zde kokila odlitá pánevní technologií v ochranném proudu argonu. Princip spočívá v postupném tavení spodní části elektrody, která je ponořena do struskové lázně. Jako struska je používán fluorid vápenatý s přidávkou vápence, magnesia, oxidu hlinitého a dalších oxidů. Natavená struska je elektricky vodivá a při průchodu proudů mezi formou a elektrodou se chová jako odporový tepelný element. K odkapávání samotného kovu z elektrody dochází působením elektrického proudu procházejícího odtavovanou elektrodou a struskou. Kov protékající struskou je rafinován a jakékoliv nežádoucí přídavky v roztaveném kovu se rozpustí a stávají se součástí strusky. Dochází také k odsíření, dezoxidaci a snížení obsahu nekovových vměstků. K legování dusíkem dochází přímo při přetavování. Struska totiž obsahuje sloučeniny dusíku a v zařízení je navíc udržována přetlaková dusíková atmosféra. Díky relativně nízké hustotě plave struska na povrchu roztaveného kovu a kov je chráněn před oxidací. Kapky na závěr padají do krystalizátoru chlazeného vodou. Po

kontrolovaném tuhnutí se ve formě vytvoří čistý ingot. Charakteristickou elektrostruskového přetavování je, že tuhnou postupně malé objemy taveniny, a proto jsou ingoty hutné se stejnosměrnou strukturou bez pórů a vycezenin. [23] To pozitivně ovlivňuje mechanické vlastnosti oceli. Dalšími výhodami takto zpracované oceli je dobrá leštitelnost povrchu, snížená směrová anizotropie mechanických vlastností, lepší obrobiteľnosť i plastické vlastnosti a rozměrová stálost při tepelném zpracování.

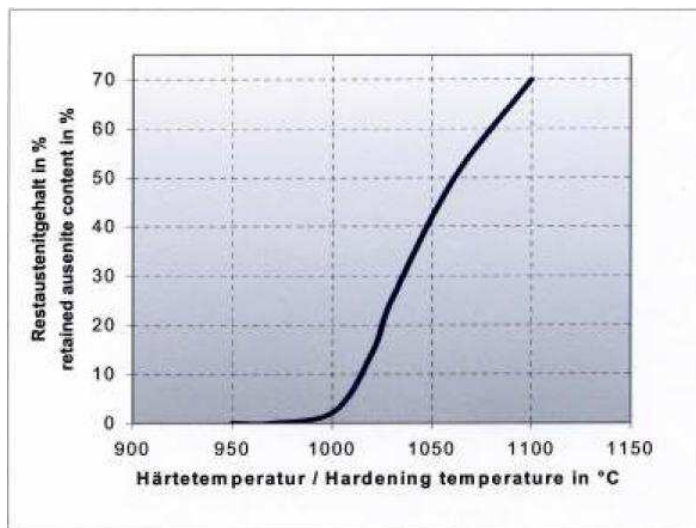
Navíc legováním dusíkem dochází ke zpevnění (intersticiálního) tuhého roztoku dusíku v železe. Dusík podstatně zvyšuje korozní odolnost a zároveň nezpůsobuje snížení houževnatosti a vzniklé chromkarbonitridy mají velmi jemnou strukturu. [22]

2.4.2 Tepelné zpracování

Ocel v dodávaném stavu je kalena na teplotu 1000 °C v oleji po dobu jedné hodiny. Popouštěcí teplota se liší v závislosti na požadovaných vlastnostech. Žihání naměkko se provádí při teplotách 780 °C až 820 °C po dobu 6 až 8 hodin. Ochladuje se v peci nebo na klidném vzduchu. Dosažitelná tvrdost po žihání naměkko je 200 -240 HB. [22]

2.4.3 Zmrazování

Provádí se za účelem odstranění zbytkového austenitu, je-li kalcí teplota 1010 °C a výše. Množství zbytkového austenitu v závislosti na teplotě kalení je na obrázku 8. Teplota zmrazování u této oceli je -80 až -196 °C a probíhá v kapalném dusíku.



Obrázek 3 Množství zbytkového austenitu v závislosti na kalcí teplotě [22]

2.4.4 Přehled mechanických vlastností při rozdílném tepelném zpracování

Z obrázku 4 je patrné, že mechanické vlastnosti výrazně ovlivňuje tepelné zpracování. U oceli tepelně zpracované na kalcí teplotu 1000 °C se dosahuje rozdílných vlastností především popouštění. Ocel popouštěná na teplotě 600 °C dosahuje nejnižších hodnot meze kluzu, tvrdosti podle Rockwella i lomové houževnatosti, pouze modul pružnosti je výrazně vyšší než v případě ostatních variant tepelného zpracování. Při popouštění na 200 °C je možné dosáhnout celkově nejvyšší lomové houževnatosti. Kalením na teplotě 1030 °C a následným zmrazování při teplotě -80 °C/1 hod. se už vlastnosti oceli vzájemně tolik neliší.

Mechanické hodnoty oceli LC 200N

Tepelné zpracování	Rp0,2**	Tvrdość	Kic	E-Modul
	[MPa]	[HRC]	[MPa√m]	[MPa]
TA=1000°C Ta = 2x200°C	2108	55-56	21,5	210888
TA=1030°C, TK Ta = 2x200°C	2486	58-59	17,5	214276
TA = 1030°C, TK Ta = 2x475°C	2357	60-61	16,7	213155
TA = 1000°C Ta = 2x600°C	1151	32-34	11,6	224289

TA = teplota austenitizace
Ta = popouštěcí teplota
TK = zmrazování (-80°C/1h)
* střední hodnoty
** ze čtyřbodové zkoušky ohybem

Obrázek 4 Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli LC 200 N [22]

Při kalicí teplotě 1000 °C a vysoce popouštěných stavech v rozmezí 580 – 640 °C je při rostoucí popouštěcí teplotě trendem klesající smluvní mez kluzu, mez pevnosti i tvrdost. Naopak tažnost i kontrakce se zvyšující se teplotou rostou. Tyto hodnoty jsou zahrnuty v obrázku 5.

Mechanické hodnoty LC 200N ve vysoce popuštěných stavech

Popouštěcí teplota	Rp0,2	Rm	A ₅	Z	Rázová práce	Tvrdość
[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[J]	[HRC]
580	930	1200	13,0	48	250	37-38
600	830	1100	14,5	49	260	34-35
620	770	1040	15,5	50	270	31-32
640	730	980	17,0	52	280	29-30

Kalení: 1000°C – 1 hod. / olej
Popuštění: 4 hod. / ochlazení na vzduchu
Rázová práce: Charpyho zkouška na tělese bez vrubu

Obrázek 5 Hodnoty mechanických vlastností LC 200 N ve vysoce popuštěném stavu [22]

2.4.5 Korozivzdornost

Ocel byla testována na korozní odolnost v několika agresivně působících prostředích a porovnána s jinými užívanými korozivzdornými ocelmi. Toto srovnání znázorňuje obrázek 6. Výbornou korozní odolnost vykazovala v 4% slané vodě; 0,1% kyselině chlorovodíkové; 5% kyselině dusičné; 10% kyselině fosforečné; 25% kyselině citronové (neboli slabá kyselina trikarboxylová); 0,1% kyselině siřičité. Pouze v kyselině sírové má nízkou odolnost proti korozi.

Korozní odolnost

Srovnání výsledků korozních testů v různých médiích

Brand Name Material-No.	100Cr6 1.3505	LC 200 N	X46Cr13 1.4043	X90Cr MoV18 1.4112	X102Cr Mo17 1.4125	440 c
Ability to Bearing Steel	++	++	-	+	+	+
Medium 20 °C	Conz. in %					
Saltwater	4.0	--	++	0	++	-
Hydrochloric Acid HCl	0.1	--	++	--	-	--
Sulfuric Acid H ₂ SO ₄	10.0	--	--	--	--	--
Nitric Acid HNO ₃	5.0	--	++	++	++	--
Phosphoric Acid H ₃ PO ₄	10.0	--	++	-	+	+
Citric Acid C ₆ H ₈ O ₇	25.0	--	++	-	+	--
Sulphurous Acid H ₂ SO ₃	1.0	--	++	--	-	--

++excellent resistance/ + good resistance/ - low resistance / -- unsuitable / 0 not tested

Obrázek 6 Korozní odolnost oceli LC 200 N v jednotlivých korozních prostředích [22]

2.5 Mechanické zkoušky aplikované na oceli LC 200 N

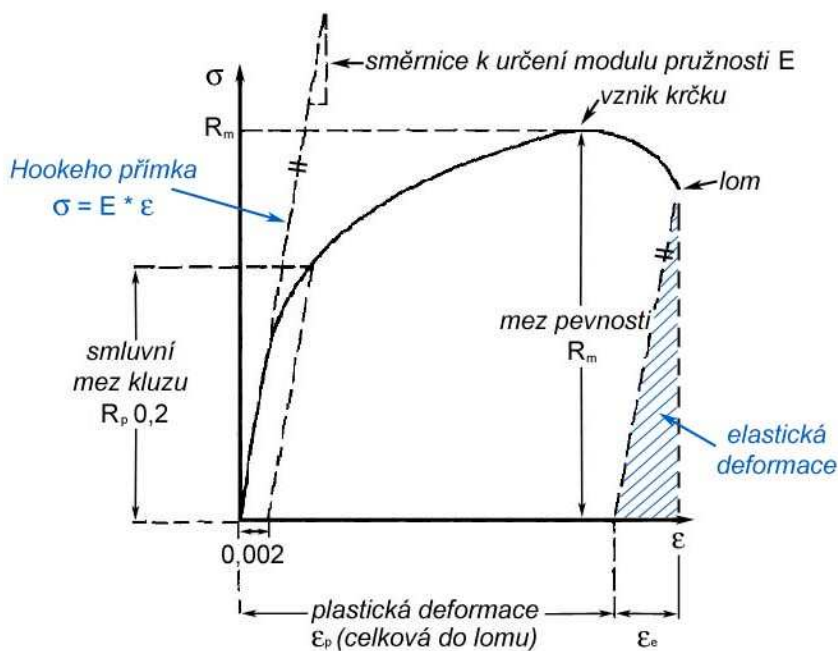
V této kapitole jsou popsány vybrané zkoušky pro zjištění mechanických vlastností oceli LC 200 N a jejich následnou korelaci. Jedná se o zkoušku tahem, tříbodovou zkoušku ohybem a tvrdost podle Vickerse dle ČSN EN ISO 6507-1.

2.5.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je nejstarší, nejrozšířenější a nejdůležitější mechanickou laboratorní zkouškou, neboť je jednoduchá, dobře se zpracovává a její výsledky podávají přímou informaci o základních mechanických vlastnostech zkoušeného materiálu. Zkušební tyče se dělí podle svého průřezu na kruhové a nekruhové (nejčastěji obdélníkového, čtvercového a šestihranného průřezu). Mohou být obrobena i neobrobena. Zkouška se provádí na univerzálních zkušebních strojích použitelných také pro zatěžování tlakem a ohybem. V případě měření modulu pružnosti se používá průtahoměr (tzv. extenzometr).

Při zkoušce je zkušební tyč se svislou osou namáhána tahovou silou působící v ose prutu kolmo k jeho příčnému průřezu. Účinkem působící síly, vyvozené zkušebním strojem se tyč prodlužuje a zároveň zužuje, až dojde k přetržení. Teoreticky se předpokládá ideální izotropní materiál a napětí průřezu tyče je tedy rozloženo rovnoměrně. Tento stav je předpokladem při stanovování výsledků zkoušky tahem. Ve skutečnosti tomu však nikdy

není. Jednotlivé krystaly jsou totiž uspořádány nerovnoměrně a jejich mechanické vlastnosti jsou anizotropní.



Obrázek 7 Diagram zkoušky tahem [24]

Napět'ové charakteristiky:

- Mez pevnosti v tahu R_m :

rovnice udává napětí odpovídající největšímu zatížení silou před porušením zkušební tyče:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

F_m největší síla před přetržením tyče

S_0 počáteční průřez tyče

- Mez kluzu R_e :

Součást se v tomto místě prodlužuje, aniž by docházelo k nárůstu napětí. Charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou deformací. Na hranicích krystalových mřížek dochází ke zpevnění materiálu. V tahovém diagramu se projevuje výraznou formou jako výrazná mez kluzu R_e nebo nevýraznou formou v podobě smluvního napětí $R_{p0,2}$.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

F_e síla na mezi kluzu

S_0 počáteční průřez tyče

Přesné měření velmi malých deformací v průběhu zatěžování je nutné v případě měření $R_{p0,2}$ a modulu pružnosti v tahu E . K měření těchto malých deformací se používají průtahoměry (tzv. extenzometry). Při měření jsou upnuty přímo na tyč a zaznamenávají okamžitou deformaci vznikající zatěžováním.

- Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$:

Používá se v případě, že materiál nevykazuje výraznou mez kluzu. Jedná dána 0,2 % trvalé deformace počáteční délky měřené tyče a je dána rovnicí:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

$F_{p0,2}$ je síla vyznačená na obrázku 8, při které dosáhne trvalá deformace hodnoty 0,2 % počáteční měřené délky zkušební tyče L_0 .

- Youngův modul pružnosti E :

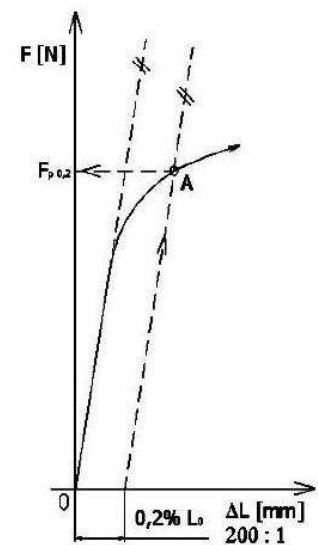
Modul pružnosti v tahu má v diagramu lineární charakter. Tomuto lineárnímu úseku diagramu přísluší elastické deformace a vyjadřuje úměru mezi napětím a deformací. Vztah pro výpočet je vyjádřen pomocí Hookova zákona:

$$R = E\varepsilon_{el} \text{ [Mpa]} \quad (7)$$

kde deformace ε se spočítá jako poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [-]} \quad (8)$$

[12][13][14]



Obrázek 8 Diagram $F-\Delta l$ s vyznačenou smluvní mezí kluzu $R_{p0,2}$ [12]

Deformační charakteristiky

- Tažnost A:

Trvalé prodloužení po přetržení vyjádřené poměrem prodloužení k počáteční délce zkušební tyče podle rovnice.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} 100 [\%] \quad (9)$$

L_0 počáteční měřená délka zkušební tyče [mm]

L_u konečná měřená délka zkušební tyče po přetržení [mm]

- Kontrakce Z:

Je poměr nejmenší plochy příčného průřezu měřené po přetržení k počáteční ploše průřezu podle rovnice. Je také udávána v procentech.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100 [\%] \quad (10)$$

S_0 počáteční plocha příčného průřezu [mm²]

S_u nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení zkušební tyče [mm²] [12][13][14]

Zkouškou tahem je možné stanovit další charakteristiky. Jedná se o elastické charakteristiky jako je Poissonova konstanta μ , velikost elastické energie, plastické charakteristiky jako exponent zpevnění n , součinitel anizotropie r a velikost deformační energie. Dalšími charakteristika, které je možné stanovit ze zkoušky tahem je vnitřní útlum, vnitřní tření a deformační zpevnění.

Poissonova konstanta (součinitel příčného zúžení) je poměr relativního prodloužení k relativnímu příčnému zkrácení a lze jí získat rovnicí:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| [-] \quad (11)$$

kde ε_y je deformace podélném směru tyče a ε_x je deformace v příčném směru tyče. [15]

Velikost deformační energie je dána plochou pod křivkou zaznamenanou během zkoušky tahem.

Součinitel plastické anizotropie popisuje nerovnoměrnosti mechanických vlastností v přímém a kolmém na rovinu tyče. Udává schopnost materiálu odolávat ztenčení při tažení. Čím je tato hodnota vyšší, tím je vyšší i tvařitelnost. Je dán vztahem:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} [-] \quad (12)$$

kde φ_b je logaritmická deformace ve směru šířky vzorku a φ_s je logaritmická deformace ve směru tloušťky vzorku. [16]

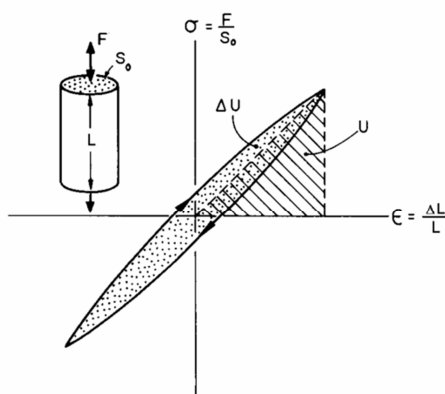
Exponent zpevnění udává schopnost materiálu zpevněvat se při plastické deformaci. Je dán vztahem:

$$\sigma = A * \varepsilon^n \Rightarrow n = \frac{\log(\sigma)}{\log(A) - \log(\varepsilon)} \quad (13)$$

Vnitřní útlum, vnitřní tření je schopnost materiálu rozptýlovat elastickou energii při vibracích. Míru vnitřního útlumu udává koeficient ztrát a logaritmický dekrement útlumu daný rovnicí 14:

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U} \quad (14)$$

kde ΔU je množství rozptýlené energie za jeden cyklus a U je celková přivedená energie.

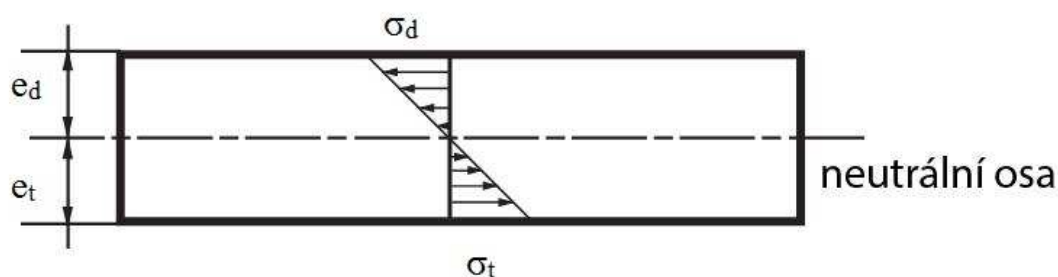


Obrázek 9 Hysterezní smyčka vnitřního útlumu, vnitřního tření [24]

Deformační zpevnění je poměrem meze pevnosti a meze kluzu. Je-li větší než 1,4 jedná se o velké deformační zpevnění a v případě, že je tento poměr menší než 1,2 se jedná o zpevnění malé. [24]

2.5.2 Zkouška ohybem

V práci byla použita zkouška 3 bodovým ohybem. Pro houževnaté materiály nemá takový význam jako ostatní mechanické zkoušky, jelikož nelze stanovit výslednou pevnost. Tyč se totiž pouze prohne, ale nedojde k lomu. Zkouška má tedy význam pouze pro zkoušení křehkého materiálu, kde lze z průhybu určit deformační schopnost. To při tahové zkoušce pro nepatrné těžko měřitelné prodloužení je možné pouze v případě použití průtahoměru. Hodí se například pro zkoušení šedé litiny a některých nástrojových ocelí.



Obrázek 10 Rozdělení napětí v průřezu tyče nad mezí úměrnosti pro materiál stejných vlastností v tahu a tlaku

Při zatěžování svislou silou F vyvolává vzniklý ohybový moment na horních vláknech průřezu tlak σ_d a ve spodních vláknech tah σ_t . Mezi oběma druhy namáhání je neutrální osa ve vzdálenosti $e_t=e_d=e$, ve které je napětí rovno nule. Pro zkoušku ohybem se volí tyče se symetrickým průřezem, u nichž se neutrální vrstva nachází uprostřed průřezu. Největší napětí je v okrajových vláknech tažených i tlačných a zjistí se z rovnice:

$$R_o = \frac{M_o e}{I} \text{ [MPa]} \quad (15)$$

kde M_o značí ohybový moment v určité vzdálenosti od krajních vláken, e je vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy a I je moment setrvačnosti plochy průřezu k neutrální ose průřezu. Tímto poměrem se získá modul průřezu:

$$W = \frac{I}{e} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (16)$$

a po dosazení do rovnice (15) obdržíme:

$$R_o = \frac{M_o}{W} \text{ [MPa]} \quad (17)$$

Typické průřezy mají kruhový, obdélníkový nebo čtvercový tvar. Podle toho se liší i jednotlivé průřezové moduly.

Průřezový modul pro kruhový průřez:

$$W_o = \frac{\pi d^3}{32} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (18)$$

Průřezový modul pro obdélníkový průřez:

$$W_o = \frac{bh^3}{12} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (19)$$

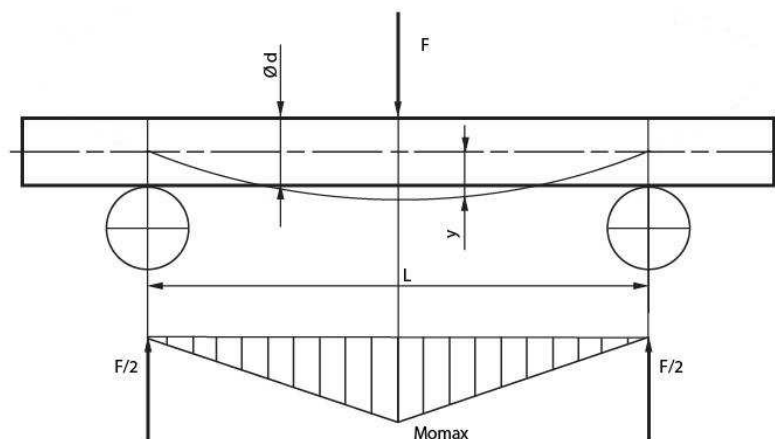
Průřezový modul čtvercového průřezu

$$W_o = \frac{a^3}{6} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (20)$$

Svislá síla F působící během zkoušky na tyč uprostřed mezi podpěrami vyvolává maximální ohybový moment. Průběh ohybového momentu má po celé délce tyče tvar trojúhelníku a jeho vrchol je pod působící silou.

$$M_{o\max} = \frac{F_{\max}L}{4} \text{ [Nmm]} \quad (21)$$

Kde F_{\max} je maximální zatížení před porušením tyče, L vzdálenost podpor. Mez pevnosti v ohybu se určí dosazením maximálního ohybového momentu do rovnice (22).



Obrázek 11 Schéma zkoušky ohybem

$$R_{\text{mo}} = \frac{M_{\text{omax}}}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (22)$$

Největší prohnutí tyče je v místech, kde působí zatěžující síla. Pokud je toto zatížení uprostřed pro maximální prohnutí platí:

$$y = \frac{F L^3}{48 E I} \text{ [mm]} \quad (23)$$

kde I je kvadratický moment průřezu a pro kruhový průřez má tvar:

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \text{ [mm}^4\text{]} \quad (24)$$

[20]

Ze zkoušky ohybem lze také určit mez kluzu v ohybu. Postup stanovení je obdobný jako u zkoušky tahem jen se bere v úvahu trvalá deformace krajního vlákna. Mez kluzu se stanoví z průhybu y , při kterém byla naměřena trvalá deformace krajního vlákna 0,2%. Pro tříbodovou zkoušku má průhyb hodnotu:

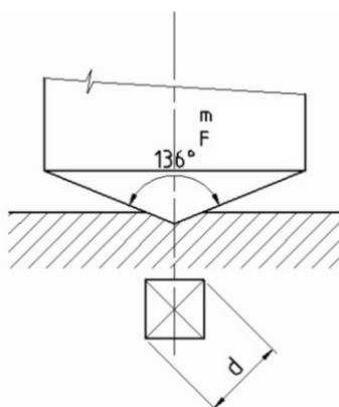
$$y = \frac{M L^2}{12 E I} = \frac{l^2}{12\rho} \text{ [mm]} \quad (25)$$

2.5.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška spočívá ve vtlačování diamantového indentoru do zkušební tělesa pod zatěžující silou působící kolmo k povrchu součásti.

Princip zkoušky:

Diamantový indentor ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou s předepsaným vrcholových úhlem $\alpha = 136^\circ$ mezi protilehlými stranami, je znázorněn na obrázku 13, se zatačuje do povrchu zkušební vzorku a poté se měří úhlopříčky vtisku, které zůstanou po odlehčení zkušebního zařízení. Z naměřených úhlopříček d_1 a d_2 se vypočítá aritmetický průměr a výsledná hodnota d se dosadí do vzorce pro výpočet tvrdosti. [13]



Obrázek 13 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [17]

$$\text{Tvrdost podle Vickerse} = \text{Konstanta} \times \frac{\text{Zkušební zatížení}}{\text{Plocha povrchu vtisk}}$$

$$HV = 0,102 \times \frac{2F \times \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (28)$$

Pozn.: Konstanta = $0,102 \approx \frac{1}{9,80665}$, kde 9,80665 je převodní faktor z kgf na N.

Ze zkoušky tvrdosti je dále možné určit koeficient k sloužící pro přibližný přepočítání meze kluzu a meze pevnosti. Tento koeficient je tedy závislý na daném materiálu a lze jej vyjádřit dosazením hodnot ze zkoušky tahem do rovnic $R_{p0,2} = kHV$ a $R_m = kHV$.

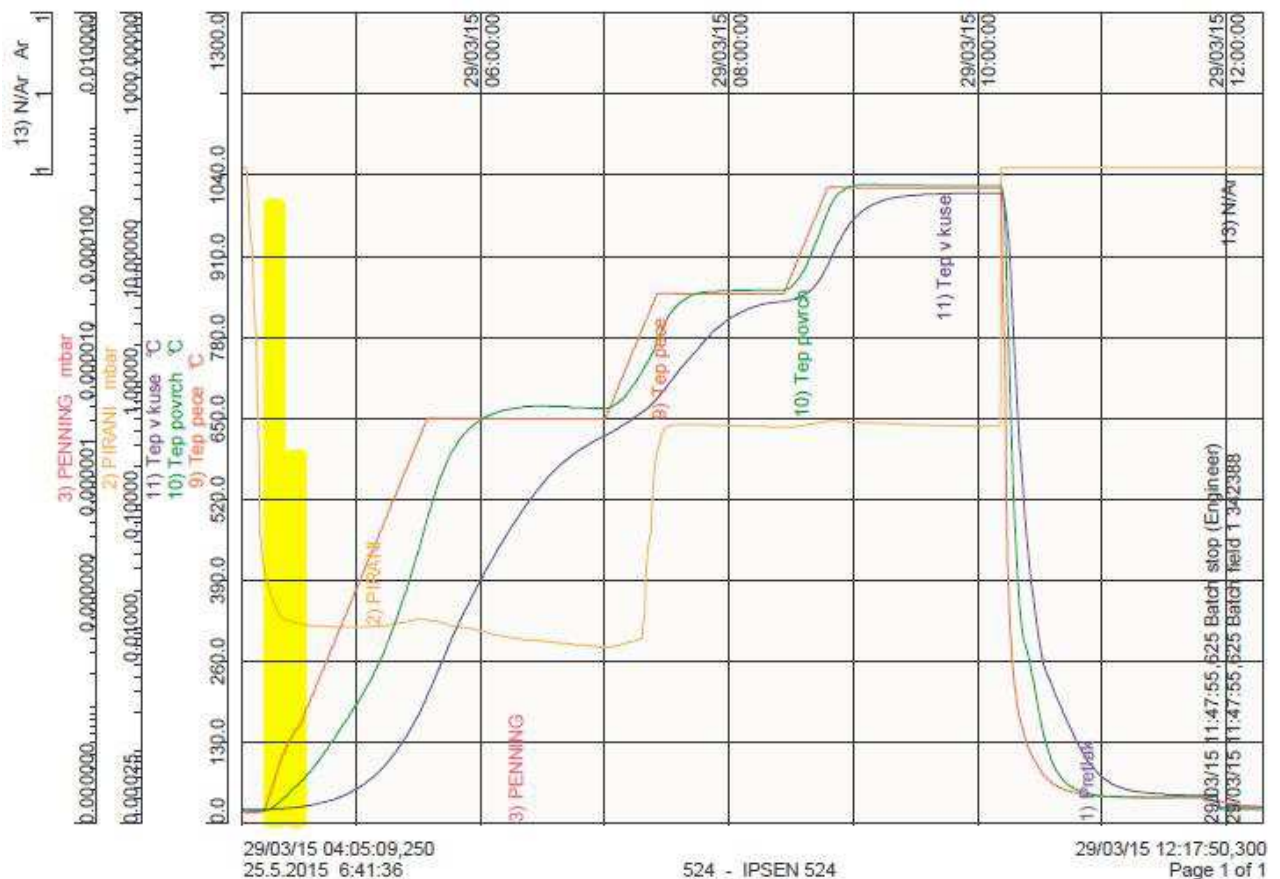
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Experimentální materiál a příprava vzorků

Výchozím polotovarem pro výrobu vzorků byl dodaný tyčový polotovar oceli LC 200 N, z níž bylo obrobena všech osm vzorků (4 ks pro zkoušku tahem a 4 ks pro zkoušku ohybem). Vzorky byly současně tepelně zpracovány kalením a popouštěním v ochranné atmosféře s následným zmrazováním v kapalném dusíku. Proces tepelného zpracování byl veden následujícím způsobem:

Průběh kalení

- 1) Předehřev 650 °C / výdrž 20 min
- 2) Předehřev 850 °C / výdrž 20 min
- 3) Austenitizace 1020 °C / výdrž 300 min
- 4) Ochlazování 4,5 bar N₂



Obrázek 14 Průběh kalení oceli LC 200 N

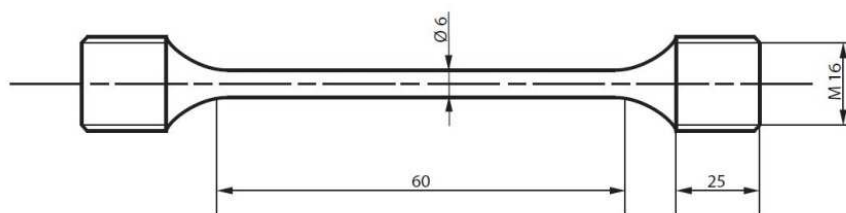
Proces byl řízen 4 termočlánky. Dvěmi pecními (bezpečnostním a regulačním) a dvěmi vsázkovými měřicí střed a povrch vsázky. Výdrž byla počítána od dosažení teploty ve středu vsázky. Po zakalení byly vzorky broušeny na brusce na kulato.

Průběh popouštění a zmrazování:

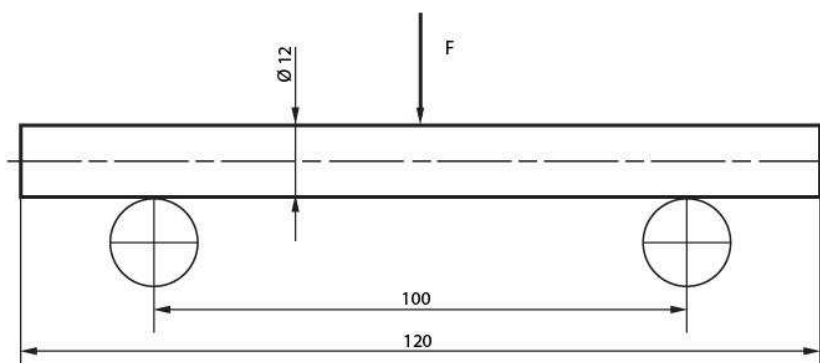
- 1) Popouštění 480 °C / výdrž 2 hod. / parciální tlak dusíku N₂ (p_{N₂} = 50 kPa)
- 2) Zmrazování v kapalném dusíku N₂ / výdrž 2 hod.
- 3) Popouštění 470 °C / výdrž 2 hod. / parciální tlak dusíku N₂ (p_{N₂} = 50 kPa)

Vzorky byly obrobeny na požadovaný rozměr dle obrázku 15 a obrázku 16. U tyče pro tahovou zkoušku byly konce pro upnutí vzorku navrhnuty se závitem. V případě upnutí vzorku do čelistí s hladkým povrchem by totiž mohlo dojít prokluzu a nepřesným výsledkům měření.

Rozměry vzorků:



Obrázek 15 Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku



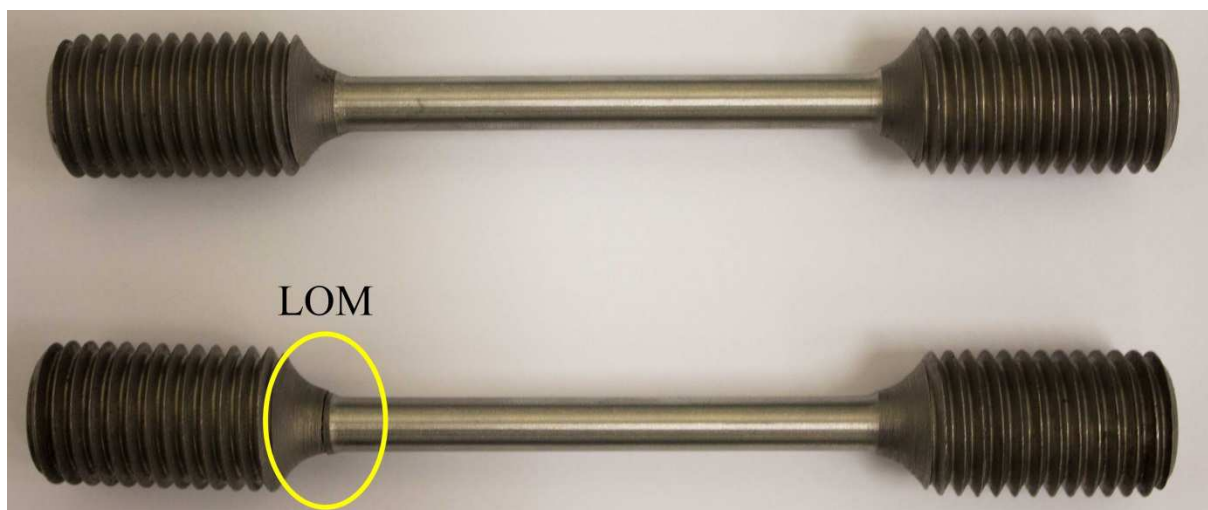
Obrázek 16 Rozměry vzorku pro zkoušku ohybem

3.2 Experimentální metody

3.2.1 Zkouška tahem

Zkoušky tahem za teploty okolí byly provedeny v laboratořích Ústavu materiálového inženýrství fakulty strojní na universálním zkušebním stroji INSTRON 5582 s rychlostí příčnicku 1 mm/min. Pomocí extenzometru se v intervalu 100 – 500 MPa lineárního průběhu napětí v oblasti elastických deformací při rychlosti deformace 0,3 %/min určil modul pružnosti v tahu E . Extenzometrem byla změřena také velmi přesná hodnota smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$. Běžným postupem zkoušky tahem byla vyhodnocena mez pevnosti R_m . Orientačně byla stanovena i tažnost materiálu A .

Před samotným měřením na zkušebním stroji byly přeměřeny rozměry zkušebních tyčí pomocí posuvného měřidla Mitutoyo Absolute Digimatic 0 – 150 mm. Byl měřen průměr tyče $\varnothing d$ a počáteční délka L_0 . Naměřené hodnoty se shodovaly s předepsanými rozměry. Pro možnost stanovení tažnosti oceli byla posuvným měřidlem přeměřena konečná délka zkušební tyče po přetržení L_u .



Obrázek 17 Zkušební tyče před zkouškou a po destrukci

Rozdíl mezi počátečními rozměry tyče a rozměry po destrukci lze vidět na obrázku 17, kde horní vzorek představuje tyč s počátečními rozměry a spodní vzorek s konečnými rozměry po přetržení. U všech vzorků docházelo k lomu v místě vrubu mimo broušený povrch (vyznačeno místo na obrázku 17), tedy v místě, ve kterém vzniká největší napětí.

3.2.2 Zkouška ohybem

Zkoušky ohybem za teploty okolí byly provedeny v laboratořích Ústavu materiálového inženýrství fakulty strojní na universálním zkušebním stroji INSTRON 5582 s podpěrami vzdálenými 100 mm.

Před ohybovou zkouškou byly pomocí posuvného měřidla Mitutoyo Absolute Digimatic 0 – 150 mm přeměřeny rozměry průměru $\varnothing d$ zkušebních tyčí. Naměřené hodnoty se shodovaly s předepsanými rozměry.

3.2.3 Měření tvrdosti

Tvrdost byla měřena na dvou vzorcích metodou podle Vickerse HV30. Síla pro zatěžování indentoru je dána normou a její hodnota je 294,2 N. Povrch vzorků byl nejdříve přebroušen brusným papírem, a vpichy byly provedeny na obou vzorcích na šesti náhodných místech.

3.2.4 Měření drsnosti

Pro měření drsnosti povrchu byl použit profilometr HOMMEL TESTER T1000 na obrázku. Vyhodnocuje parametry dle ČSN EN ISO 4287 včetně materiálového podílu. Měření bylo provedeno na vybraném vzorku č. 3 pro tahovou zkoušku a na vzorku č. 3 pro zkoušku ohybem. Na obou vzorcích byla drsnost přeměřena třikrát.

V případě, že je brán v potaz vliv povrchu oceli na mechanické vlastnosti, je potřeba sledovat povrchové defekty ve tvaru trhlinek, které mohou být kritické. Pro posouzení tedy byly zvoleny tyto parametry drsnosti:

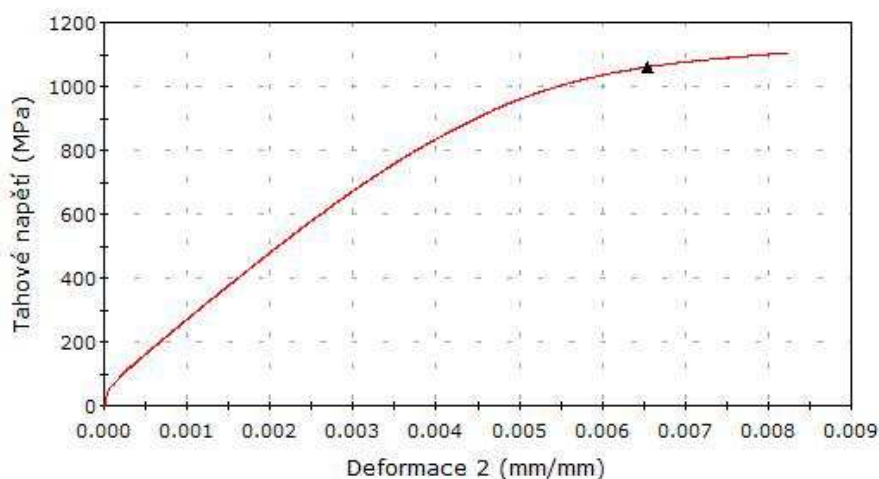
Rz: střední hodnota pěti Rz (součet výšky největšího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu z pěti základních délek l_r na měřeném úseku l_n)

Rmax: maximální hloubka drsnosti na měřené délce l_n (vzdálenost od nejvyššího bodu vrcholu a nejnižšího bodu prohlubně od střední čáry profilu).

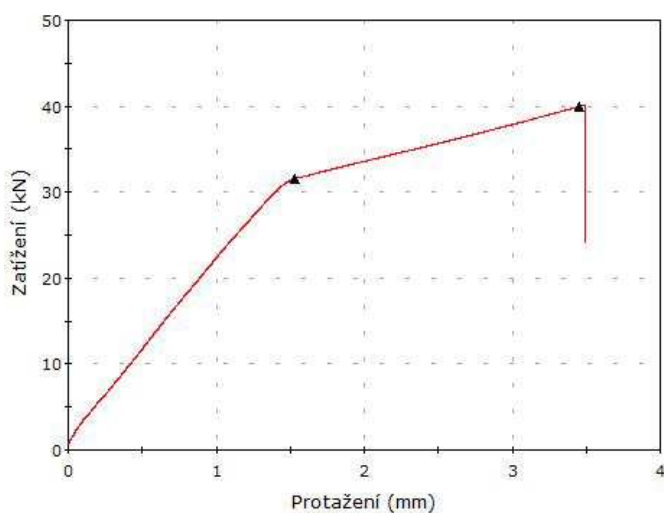
3.3 Výsledky a jejich diskuze

3.3.1 Výsledky zkoušky tahem

Zkouška tahem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Během zkoušky tahem byl zaznamenáván průběh v diagramu $F-\Delta L$ respektive $R-\varepsilon$. Průběhy těchto závislostí a naměřené hodnoty materiálových charakteristik jsou uvedeny na obrázku 18 a 19 a v tabulce 1, 2. Na každé zkušební tyči byl nejdříve proměřen modul pružnosti a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ pomocí extenzometru firmy Instron (záznam z měření je na obrázku 18). U vzorku 1 a 4 byl modul pružnosti proměřen dvakrát. Po odlehčení na počáteční stav a sejmutí extenzometru byla provedena běžná zkouška tahem až do lomu (záznam je obrázku 19). Stanovené hodnoty modulu pružnosti E jsou v tabulce 1, meze kluzu a meze pevnosti jsou v tabulce 2.

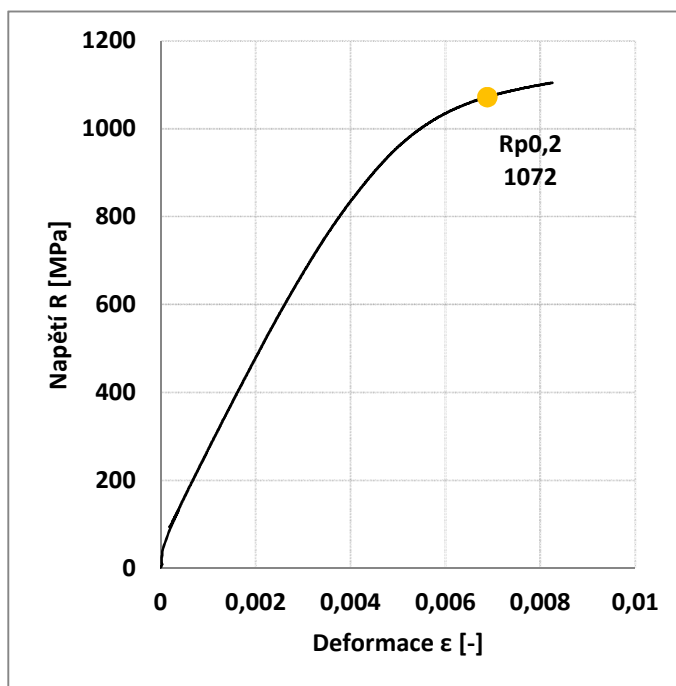


Obrázek 18 Průběh měření modulu pružnosti E a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 3)- Instron

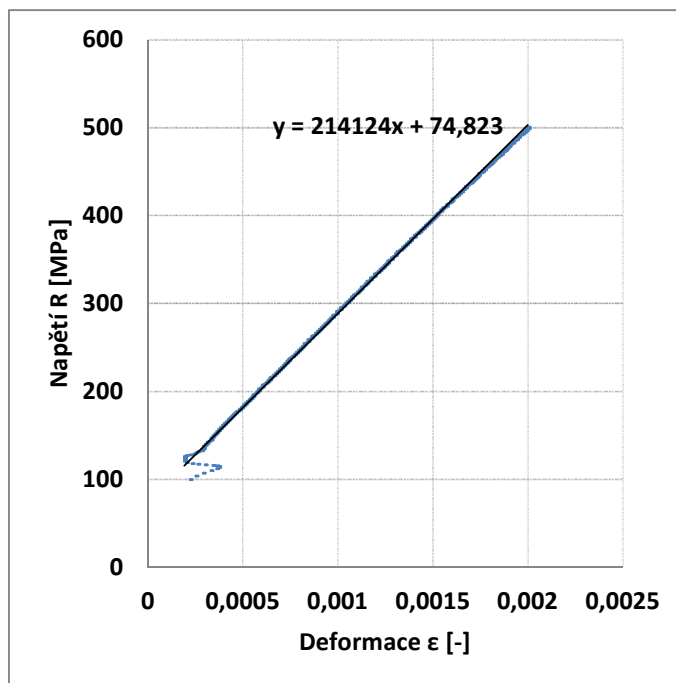


Obrázek 19 Průběh měření meze pevnosti R_m (vzorek 3)- Instron

Z údajů o velikosti síly a prodloužení získaných ze záznamu stroje Instron byly zpracovány pomocí tabulkového procesoru Excel a opět byl stanoven modul pružnosti E a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (obrázek 21 a 22). Tyto hodnoty jsou obsaženy v tabulce 1.



Obrázek 21 Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 3)- Excel



Obrázek 22 Modul pružnosti (vzorek 3) - Excel

měření	E [Mpa]	
	Instron	Excel
1.1	249807	224087
1.2	215189	208229
2	201275	196645
3	222141	214124
4.1	217395	206682
4.2	207485	204773
\bar{x}	218882	209090
s	15399	8469

Tabulka 1 Moduly pružnosti ze zkoušky tahem

Na základě určení směrodatné odchylky lze stanovit, že modul pružnosti propočítaný programem Excel je přesnější. To mohlo být způsobeno proložením většího množství bodů, než množství bodů, které pro vyhodnocení použil přístroj. Průměry naměřených hodnot se vzájemně liší o 4,5 %.

měření	R _{p0,2} [Mpa]		R _m [Mpa]
	Instron	Excel	Instron
1	-	-	1645
2	1119	1118	1562
3	1060	1072	1423
4	1096	1095	1556
\bar{x}	1092	1095	1547
s	24	19	80

Tabulka 2 Smluvní mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušky tahem

Určené smluvní meze kluzu se vzájemně téměř shodují. Rozdílnost průměrů obou postupů vyhodnocení je tedy také minimální a liší se pouze o 0,3 %. Mez pevnosti má poměrně velký rozptyl naměřených hodnot. Vzorek 1 nebyl použit pro stanovení smluvní meze kluzu, proto není v tabulce zaznamenán.

Na základě hodnot získaných ze všech postupů byly stanoveny celkové průměry jednotlivých mechanických charakteristik zkoušky tahem.

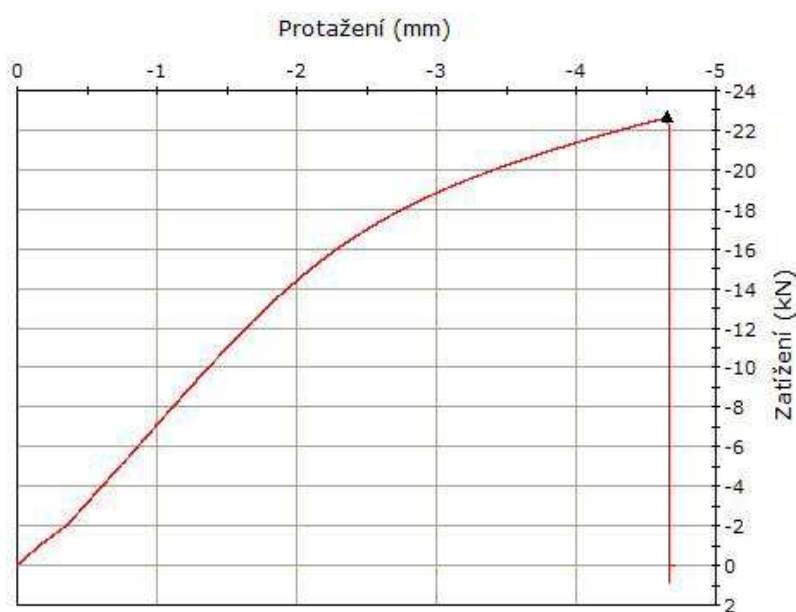
Charakteristika	R _{p0,2} [Mpa]	R _m [Mpa]	E [Mpa]
Celkový \bar{x}	1093	1547	213986
Celková s	22	80	13356

Tabulka 3 Celkové průměrné hodnoty mechanických charakteristik zkoušky tahem

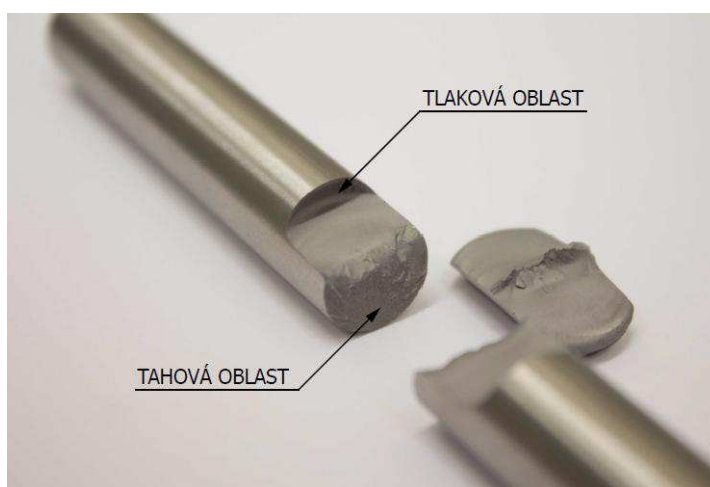
Dále z naměřených hodnot rozměrů tyče před zkouškou a po přetržení byla orientačně určena tažnost této oceli, která byla stanovena přibližně: $A = 2,7 \%$.

3.3.2 Výsledky zkoušky ohybem

Zkouškou ohybem byl zaznamenán průběh F - y (obrázek 23). Ukázka vzhledu lomu ohybové zkoušky je na obrázku 24. Na lomu jsou dvě rozlišné části, kde na jedné působilo tahové a na druhé tlakové napětí. Z daných grafů byly stanoveny hodnoty meze pevnosti R_{mo} . Pro stanovení meze kluzu $R_{p0,20}$ byl aplikován postup z kapitoly 2.5.2 v teoretické části práce. Pro stanovení meze kluzu byla využita hodnota průhybu y_k dle rovnice 27 v teoretické části. Odečtené hodnoty jsou v tabulce 4.

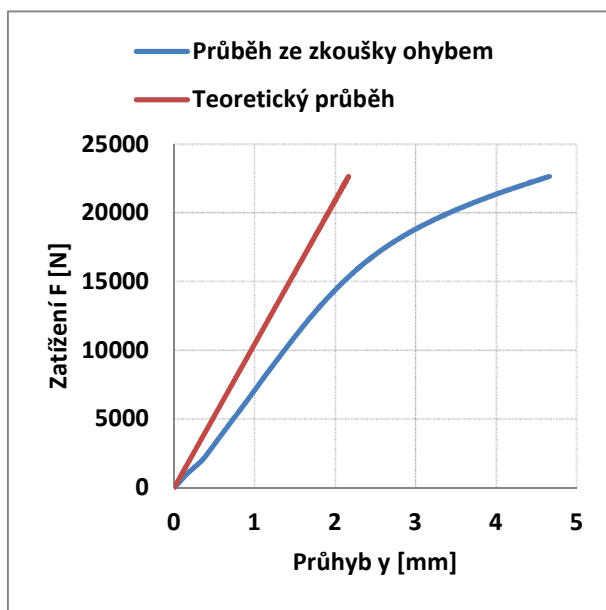


Obrázek 23 Průběh měření zkoušky ohybem (vzorek 3) - Instron

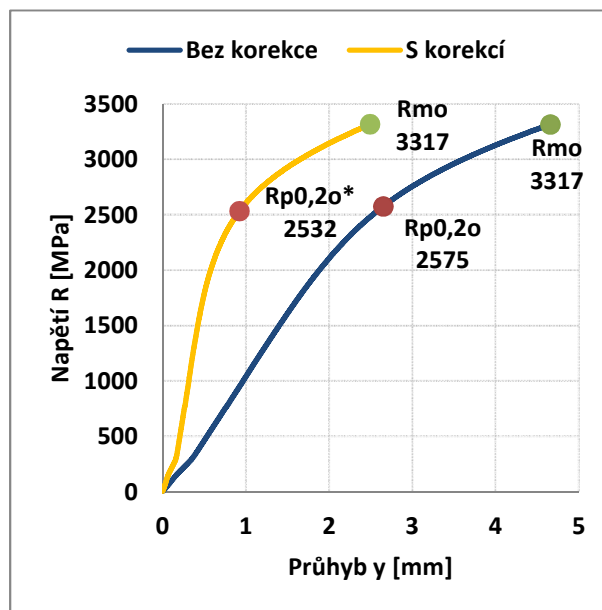


Obrázek 24 Lom při ohybu

Vzhledem k tomu, že při zkoušce ohybem byl průhyb detekován pouze z pohybu příčnicku, není možné stanovit přesně modul pružnosti. Hodnoty stanovené z těchto záznamů vychází v průměru 98350 MPa (vypočteno dle vzorce 23). Pro zpřesnění výsledků bylo nutné provést korekci výstupních parametrů o tuhost a poddajnost stroje a přípravku. Proto byl skutečný průhyb přepočten známým modulem pružnosti z tahové zkoušky. Rozdíl skutečného a teoretického průběhu je na obrázku 25.



Obrázek 25 Skutečný a teoretický průběh zkoušky ohybem (vzorek 3)



Obrázek 26 Průběh zkoušky ohybem bez korekce a s korekcí průhybu y (vzorek 3)

Výpočet teoretického průhybu na základě známého modulu pružnosti udává rovnice 29:

$$y^* = \frac{F \cdot 100^3 \cdot 64}{48 \cdot 209090 \cdot \pi \cdot 12^4} = F \cdot 9,5649 \cdot 10^{-5} \quad (29)$$

Hodnota korekce Δ byla spočítána jako rozdíl průhybu získaného ohybovou zkouškou y a průhybu teoretického y^* , vypočítaného při známém modulem pružnosti. [25]

$$\Delta = y - y^* \text{ [mm]} \quad (30)$$

Z korekce prohnutí byl vytvořen korigovaný průběh zkoušky a stejnou metodou jako u průběhu bez korekce byla zjištěna smluvní mez kluzu $R_{p0,20^*}$ (obrázek 26).

měření	R _{p0,2o} [Mpa]		R _{mo} [Mpa]
	bez korekce	s korekcí	Instron
1	2579	2573	3397
2	2631	2587	3467
3	2575	2532	3354
4	2591	2549	3423
\bar{x}	2594	2560	3410
s	22	21	41

Tabulka 4 Smluvní mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušky ohybem

Hodnoty smluvní meze kluzu ze záznamu i po provedení korekce jsou vzájemně téměř shodné. Průměry těchto hodnot se liší pouze o 1,3 %.

Charakteristika	R _{p0,2o} [Mpa]	R _{mo} [Mpa]	y [mm]
Celkový \bar{x}	2577	3398	3,50
Celková s	22	49	1,30

Tabulka 5 Celkové průměrné hodnoty mechanických charakteristik zkoušky ohybem

3.3.3 Výsledky zkoušky tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Výsledky zkoušky byly stanoveny postupem dle kapitoly 2.5.3 v teoretické části. Hodnoty měření jsou v tabulce 6.

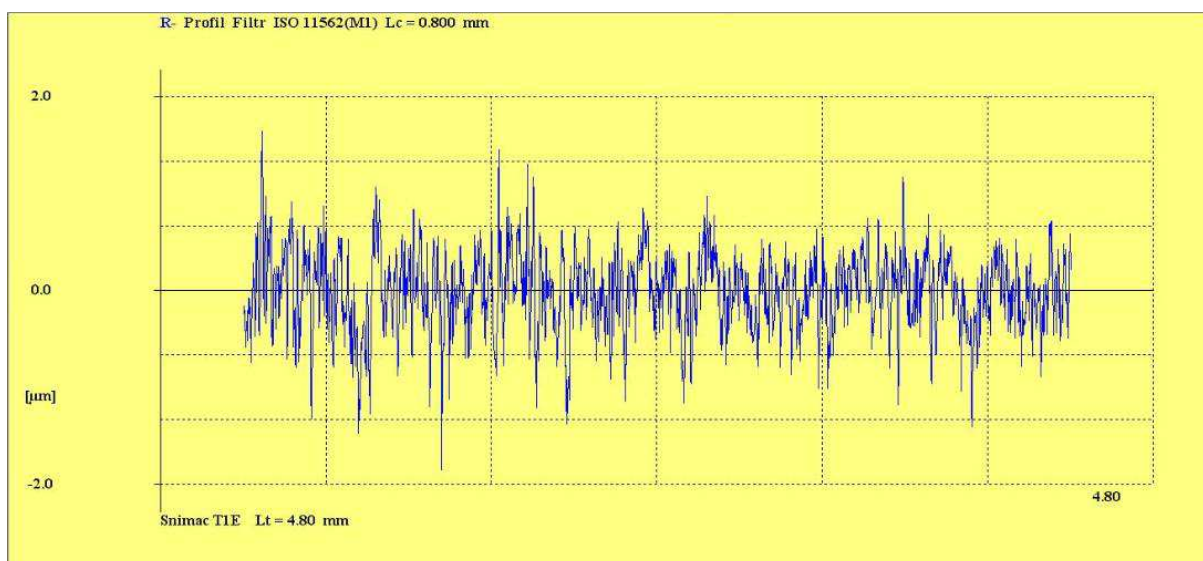
	Vzorek 4 (tah) – číslo měření						Vzorek 3 (tah) – číslo měření					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Tvrdość HV	579	550	568	560	586	560	579	579	618	579	618	598

Tabulka 6 Hodnoty průměrů úhlopříček z měření tvrdosti oceli

Tvrdość je tedy 580 HV30, což podle převodních tabulek odpovídá přibližně tvrdosti podle Rockwella 54 HRC. Ze změřené tvrdosti lze získat i přibližné hodnoty jiných mechanických charakteristik oceli.

3.3.4 Výsledky měření drsnosti

Záznam průběhu drsnosti je zachycen na obrázku 27 a vybrané parametry drsnosti jsou v tabulce 7.



Obrázek 27 Záznam profilu drsnosti povrchu vzorku

Vzorek	Měření	Rz [μm]	Rmax [μm]
Tah	1	2,63	3,32
	2	2,58	2,90
	3	2,97	3,60
Ohyb	1	4,94	6,08
	2	4,48	5,53
	3	6,11	7,14

Tabulka 7 Parametry drsnosti vzorků pro zkoušku tahem a ohybem

Vzorek	Charakteristika	Rz [μm]	Rmax [μm]
Tah	\bar{x}	2,73	3,27
	s	0,17327	0,28767
Ohyb	\bar{x}	5,18	6,25
	s	0,68616	0,66818

Tabulka 8 Celkové průměrné parametry drsnosti vzorků pro zkoušku tahem a ohybem

Zvolené parametry byly získány ze záznamu profilu drsnosti na obrázku 27. Mají největší vypovídající hodnotu, jelikož udávají velikost trhlinek, které by se mohli v případě zkoušené oceli projevit jako vrub a mít nepříznivý vliv na její mechanické vlastnosti.

3.4 Diskuze

Následující tabulka demonstruje celkové průměrné hodnoty mechanických charakteristik. Z těchto charakteristik uvedených v tabulce 9 je možné stanovit korelační vztahy.

	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	E [MPa]	HV30
Tah	1093	1547	213986	-
Ohyb	2577	3398	-	-
Tvrdość	-	-	-	580

Tabulka 9 Hodnoty mechanických vlastností oceli LC 200 N

Z tabulky vyplývá, že hodnoty meze kluzu a meze pevnosti celkových průměrných hodnot mechanických charakteristik ze zkoušky ohybem je přibližně dvojnásobně vyšší. Rozdíl meze kluzu mezi tahem a ohybem je 42 % a rozdíl meze pevnosti v tahu a ohybu je 45,6 %.

Pro přibližný přepočítání mechanických charakteristik oceli mezi jednotlivými zkouškami slouží níže stanovené koeficienty.

Vztah mezi tvrdostí, smluvní mezí kluzu a mezí pevnosti:

$$R_{p0,2} = k \cdot HV \quad \Rightarrow \quad k = \frac{R_{p0,2}}{HV} \doteq \mathbf{1,9}$$

$$R_m = k \cdot HV \quad \Rightarrow \quad k = \frac{R_m}{HV} \doteq \mathbf{2,7}$$

$$R_{p0,2o} = k \cdot HV \quad \Rightarrow \quad k = \frac{R_{p0,2o}}{HV} \doteq \mathbf{4,4}$$

$$R_{mo} = k \cdot HV \quad \Rightarrow \quad k = \frac{R_{mo}}{HV} \doteq \mathbf{5,9}$$

Vztah smluvní meze kluzu v ohybu a tahu:

$$R_{p0,2o} = k \cdot R_{p0,2} \quad \Rightarrow \quad k = \frac{R_{p0,2o}}{R_{p0,2}} \doteq \mathbf{2,4}$$

Vztah meze pevnosti v ohybu a tahu:

$$R_{mo} = k \cdot R_m \quad \Rightarrow \quad k = \frac{R_{mo}}{R_m} \doteq \mathbf{2,2}$$

Koeficienty deformačního zpevnění v tahu a ohybu:

$$k = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \quad \Rightarrow \quad k \doteq \mathbf{1,4}$$

$$k = \frac{R_{mo}}{R_{p0,2o}} \quad \Rightarrow \quad k \doteq \mathbf{1,3}$$

Naměřené hodnoty budou určitě citlivé na stav povrchu vzorku a lze očekávat, že drsnost významně ovlivní některé materiálové charakteristiky, jako je například lomová houževnatost K_{IC} . Povrch vzorků měl být broušen na stejnou hodnotu drsnosti. Ovšem rozdílná jakost povrchu byla rozeznatelná již vizuální kontrolou. To bylo potvrzeno následným měřením na profilometru, který prokázal, že drsnost tyče pro ohyb je dvakrát větší než u tyče určené pro tahovou zkoušku. Naměřené parametry drsnosti R_z a R_{max} byly vyšší než $5 \mu\text{m}$. Při uvažování, že lomová houževnatost K_{IC} takto tepelně zpracované oceli LC 200 N bude menší než $20 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, by mohly být trhlinky velikosti větší než $5 \mu\text{m}$ kritické a mohly by ovlivňovat mechanické vlastnosti oceli. Lze tedy říci, že by bylo možné předpokládat v případě vyšší jakosti povrchu lepší mechanické vlastnosti oceli LC 200 N při namáhání na ohyb.

4 Závěr

Z naměřených hodnot materiálových charakteristik lze učinit následující závěry:

- 1) Naměřené hodnoty sledovaných materiálových charakteristik jsou srovnatelné s těmi, které udává dodavatel. Ovšem přesné porovnání není možné s ohledem na jiný typ tepelného zpracování a typ provedené zkoušky (čtyřbodovým a třibodovým ohybem).
- 2) Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti jsou u ohybové zkoušky přibližně dvojnásobné.
- 3) Ze zkoušky ohybem prováděné bez přesného změření průhybu není možné stanovit korektní hodnotu modulu pružnosti E , ale naopak se prokázalo, že lze bezpečně určit smluvní mez kluzu $R_{p0,20}$.
- 4) Byly stanoveny korelační vztahy, které slouží pro přibližný přepočet materiálových charakteristik mezi zkouškou tahem, ohybem a tvrdostí.
- 5) Nejvýznamnější korelační koeficient srovnávající mez kluzu v tahu a ohybu je $k=2,3$.
- 6) V případě dalšího testování této oceli by bylo vhodné zaměřit se na to, jak významně jsou mechanické charakteristiky ovlivňovány jakostí povrchu.

5 Literatura

- [1] CHÁRA, T. *Impregnace korozivzdorných ocelí pro podmínky za oceánských plaveb*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Zmrzlý, Ph.D.
- [2] KREIBICH, Viktor, et. al. *Technologie I (Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1996. 227 s. ISBN 80-01-02351-6
- [3] ITALINOX S.R.O. *Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace pro použití, zpracování svařování a možné koroze* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/?p1=plechy&p2=p6&p3=p3>
- [4] KEY TO METALS AG. *Austenitic Steels* [online]. 2003 [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=CZ&site=kts&NM=104>
- [5] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 80-200-0671-0.
- [6] PTÁČEK, Luděk. et al. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [7] KOLAŘÍK, Ladislav. *Hodnocení svařitelnosti* [online]. Praha, 2008 [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/Svaritelnost.pdf>
- [8] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [9] HRADIL, D. *Korozivzdorné oceli pro součásti parního sterilizátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc..
- [10] BOHDAN BOLZANO S. R. O. *Charakteristika jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/charakteristika-skupin-korozivzdornych-oceli>
- [11] ČERNOBILA, Lubor. *Zkouška pevnosti v tahu* [online]. 2012 [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/1903046/>
- [12] *Statické zkoušky* [online]. [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
- [13] MACEK, Karel. *Nauka o materiálu - cvičení*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 89 s. ISBN neuvedeno.

- [14] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [15] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 308 s. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [16] ZÍKA, L. *Výroba součástí plošným tvářením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
- [17] PATA, Vladimír. *Zkoušky mechanických vlastností materiálů* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2076
- [18] PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu II*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959, 658 s.
- [19] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [20] *Vlastnosti a zkoušení materiálů: Pevnost krystalických materiálů* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM3_Pevnost_Krystalickych_Materialu.pdf
- [21] BOHDAN BOLZANO s. r. o. *Nástrojová ocel LC 200 N* [online]. [cit. 2015-06-16]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/materialove_listy/LC200N.pdf
- [22] BOHDAN BOLZANO s. r. o. *LC 200 N* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/assets/files/LC200N-s-mechanickymi-hodnotami.pdf>
- [23] ACESO PRAHA, s.r.o. *Elektrostruskové přetavování ESR* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://www.aceso.cz/elektrostruskove-pretavovani-ers>
- [24] CEJP, J. *Zkoušení materiálu – stanovení materiálových charakteristik*. Prezentace: [Přednáška Technické zkoušení materiálů; 2015 Praha].
- [25] MAREČEK, J. *Energetické porovnání dynamického a statického porušení materiálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Burša, Ph.D.
- [26] KLUG, T. REICHERT, J. BRUCKNER, R.: *Contribution to the problem of tensile and bending-test method for SiC-fibre-reinforced glass*. Journal of Materials Science 1993, Volume 28, Issue 23, p. 6303
- [27] XIAN, A. ZHONGY ANO, S.: *Direct Comparison between Tensile Strenght and Flexural Strenght of Ceramic/Metal Brazing Joint*, Chin.J.Met.Sci.Technol. Vol.8, 1992

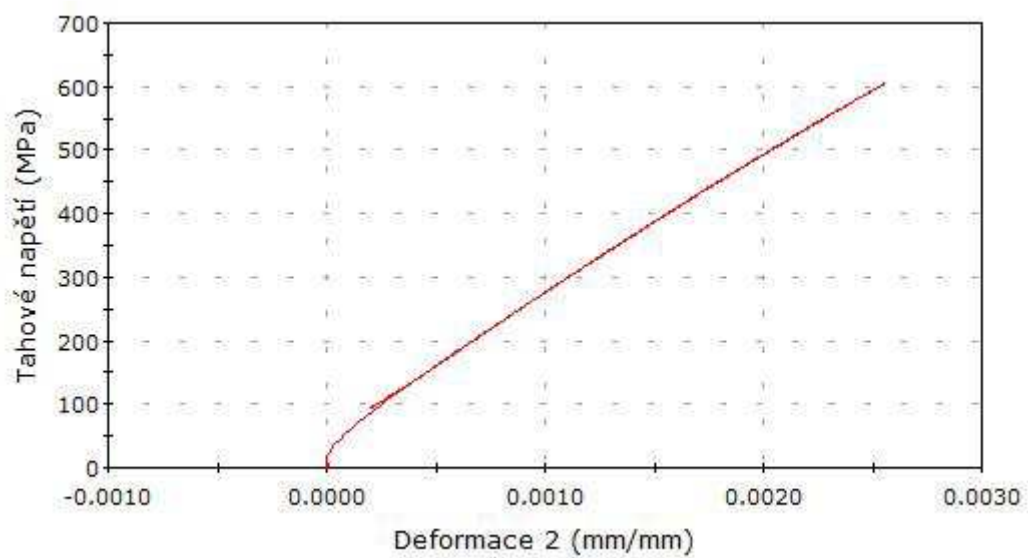
6 Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1 Fe-Cr diagram [4].....	13
Obrázek 2 Schaefflerův diagram [7].....	14
Obrázek 3 Množství zbytkového austenitu v závislosti na kalící teplotě [22]	22
Obrázek 4 Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli LC 200 N [22].....	23
Obrázek 5 Hodnoty mechanických vlastností LC 200 N ve vysoce popouštěném stavu [22]	23
Obrázek 6 Korozní odolnost oceli LC 200 N v jednotlivých korozních prostředích [22]	24
Obrázek 7 Diagram zkoušky tahem [24].....	25
Obrázek 8 Diagram $F-\Delta l$ s vyznačenou smluvní mezí kluzu $R_{p0,2}$ [12].....	26
Obrázek 9 Hysterezní smyčka vnitřního útlumu, vnitřního tření [24].....	28
Obrázek 10 Rozdělení napětí v průřezu tyče nad mezí úměrnosti pro materiál stejných vlastností v tahu a tlaku.....	29
Obrázek 11 Schéma zkoušky ohybem	31
Obrázek 12 Protážení vláken při ohybu.....	32
Obrázek 13 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [17]	33
Obrázek 14 Průběh kalení oceli LC 200 N	34
Obrázek 15 Rozměry vzorku pro tahovou zkoušku.....	35
Obrázek 16 Rozměry vzorku pro zkoušku ohybem	35
Obrázek 17 Zkušební tyče před zkouškou a po destrukci.....	36
Obrázek 18 Průběh měření modulu pružnosti E a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 3)- Instron.....	38
Obrázek 19 Průběh měření meze pevnosti R_m (vzorek 3)- Instron	38
Obrázek 20 Diagram $R-\varepsilon$ zkoušky tahem vzorku 3 zaznamenaný extenzometrem	38
Obrázek 21 Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 3)- Excel	39
Obrázek 22 Modul pružnosti (vzorek 3) - Excel.....	39
Obrázek 23 Průběh měření zkoušky ohybem (vzorek 3) - Instron.....	41
Obrázek 24 Lom při ohybu.....	41
Obrázek 25 Skutečný a teoretický průběh zkoušky ohybem (vzorek 3)	42
Obrázek 26 Průběh zkoušky ohybem bez korekce a s korekcí průhybu y (vzorek 3).....	42
Obrázek 27 Záznam profilu drsnosti povrchu vzorku	44

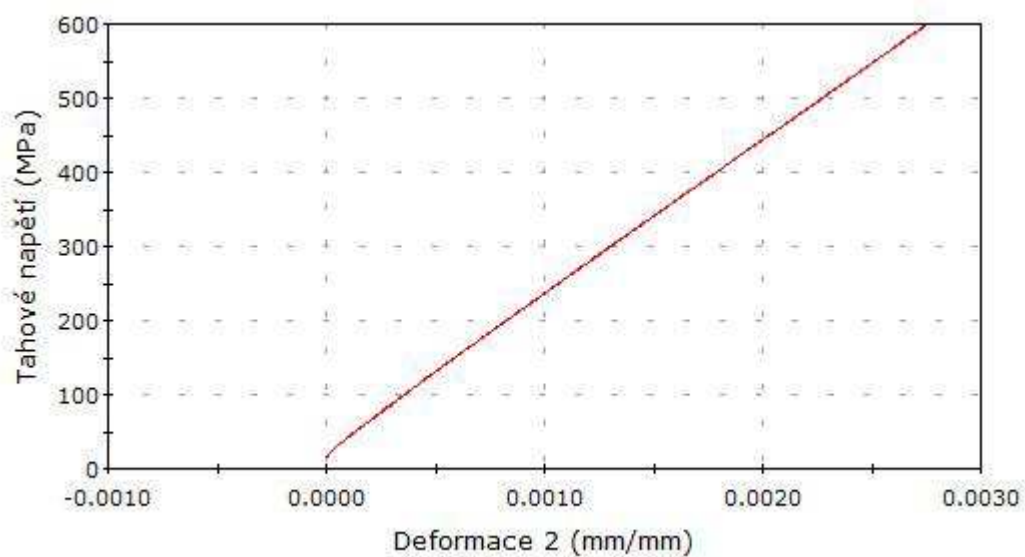
7 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1</i> Moduly pružnosti ze zkoušky tahem	40
<i>Tabulka 2</i> Smluvní mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušky tahem	40
<i>Tabulka 3</i> Celkové průměrné hodnoty mechanických charakteristik zkoušky tahem.....	40
<i>Tabulka 4</i> Smluvní mez kluzu a mez pevnosti ze zkoušky ohybem.....	43
<i>Tabulka 5</i> Celkové průměrné hodnoty mechanických charakteristik zkoušky ohybem	43
<i>Tabulka 6</i> Hodnoty průměrů úhlopříček z měření tvrdosti oceli.....	43
<i>Tabulka 7</i> Parametry drsnosti vzorků pro zkoušku tahem a ohybem.....	44
<i>Tabulka 8</i> Celkové průměrné parametry drsnosti vzorků pro zkoušku tahem a ohybem	44
<i>Tabulka 9</i> Hodnoty mechanických vlastností oceli LC 200 N.....	45

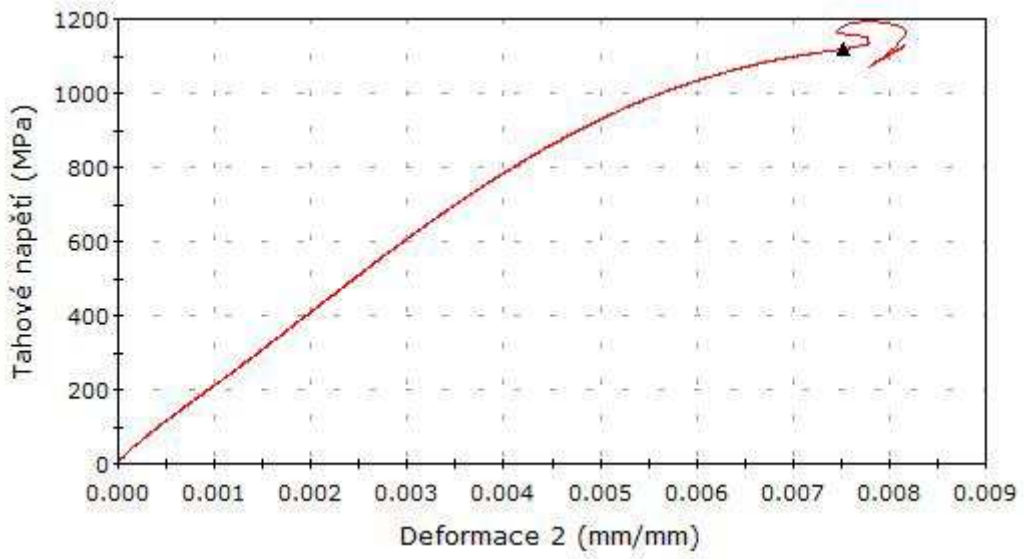
8 Přílohy



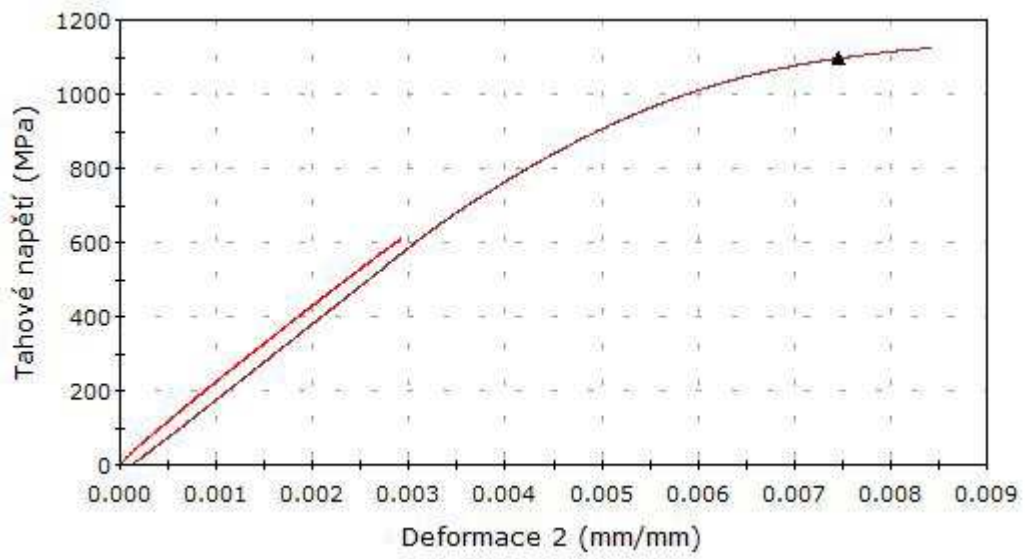
Granf 1 Průběh měření modulu pružnosti E a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 1/měření 1)- Instron



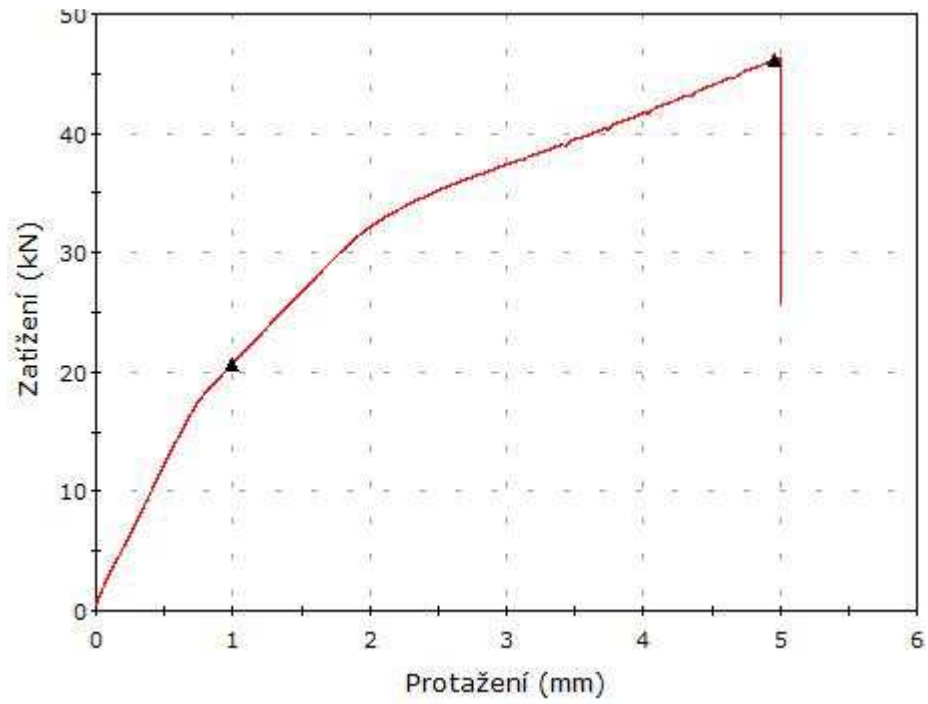
Granf 2 Průběh měření modulu pružnosti E a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 1/měření 2)- Instron



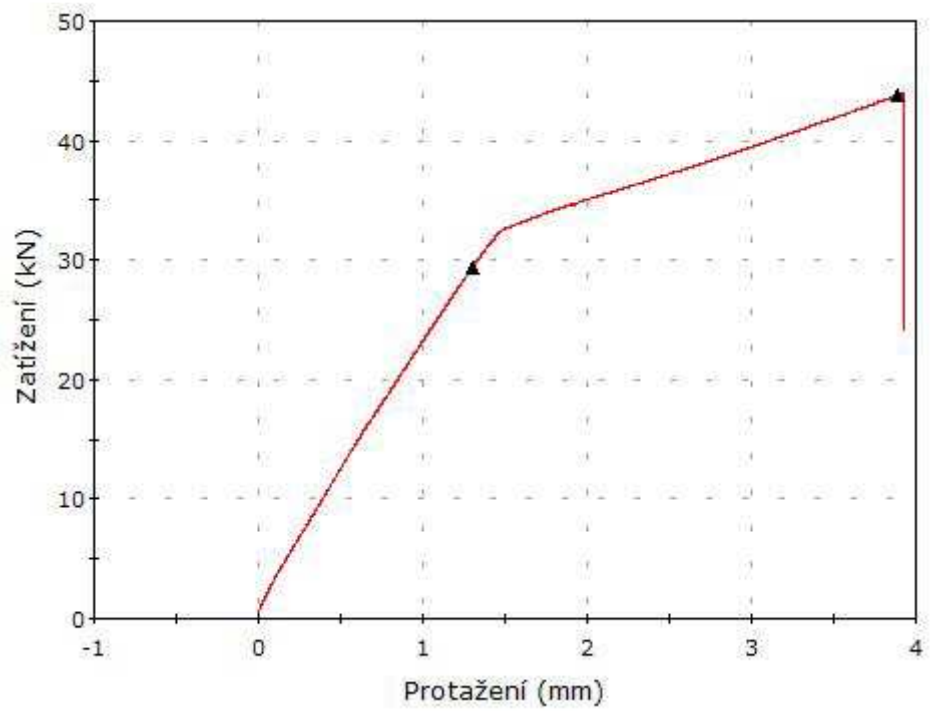
Granf 3 Průběh měření modulu pružnosti E a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 2)- Instron



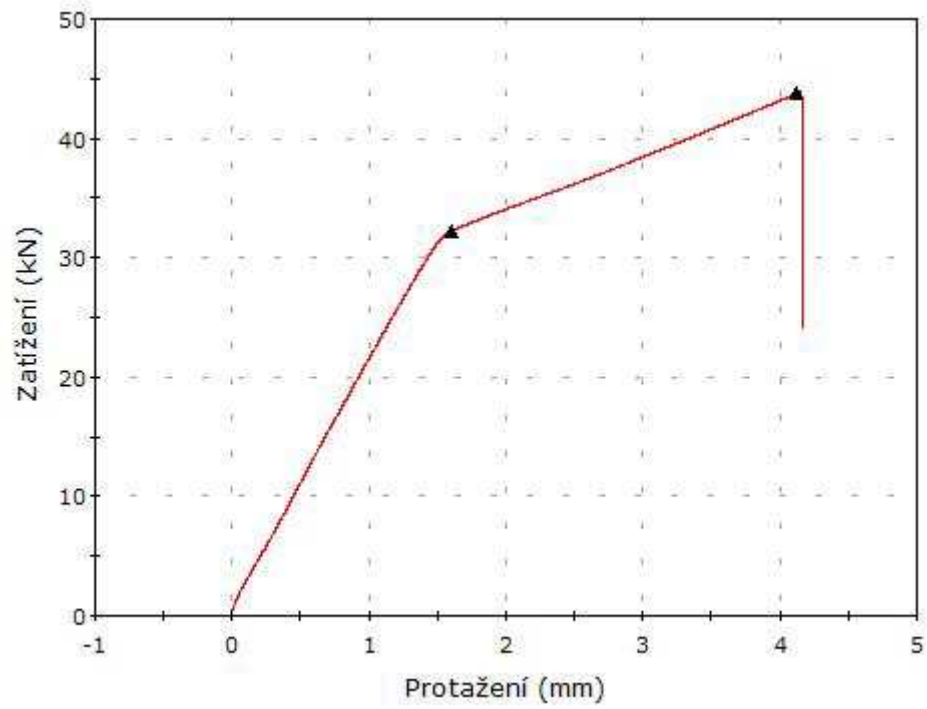
Granf 4 Průběh měření modulu pružnosti E a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 4/měření 1, 2)- Instron



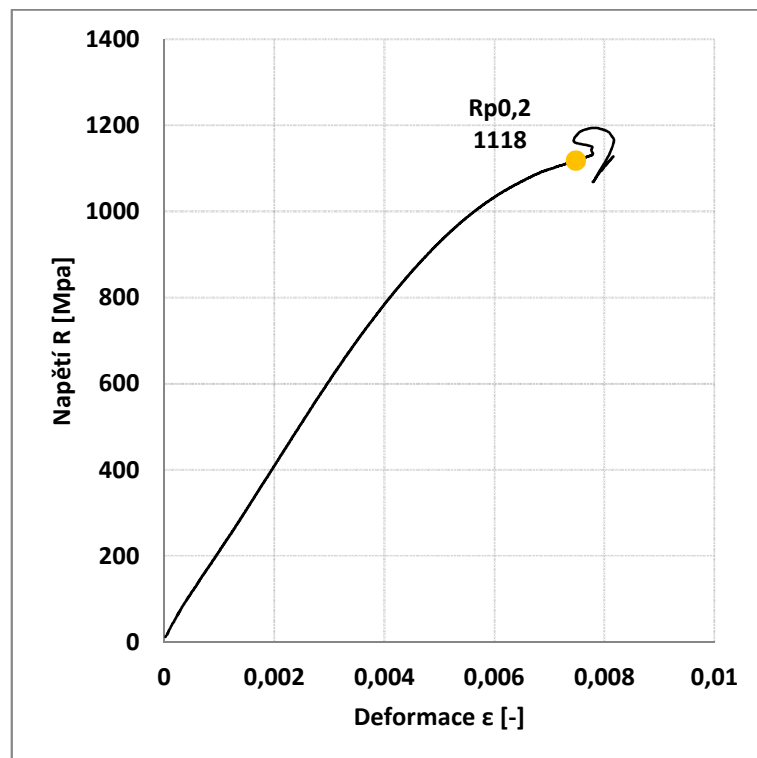
Graf 5 Průběh měření meze pevnosti R_m (vzorek 1)- Instron



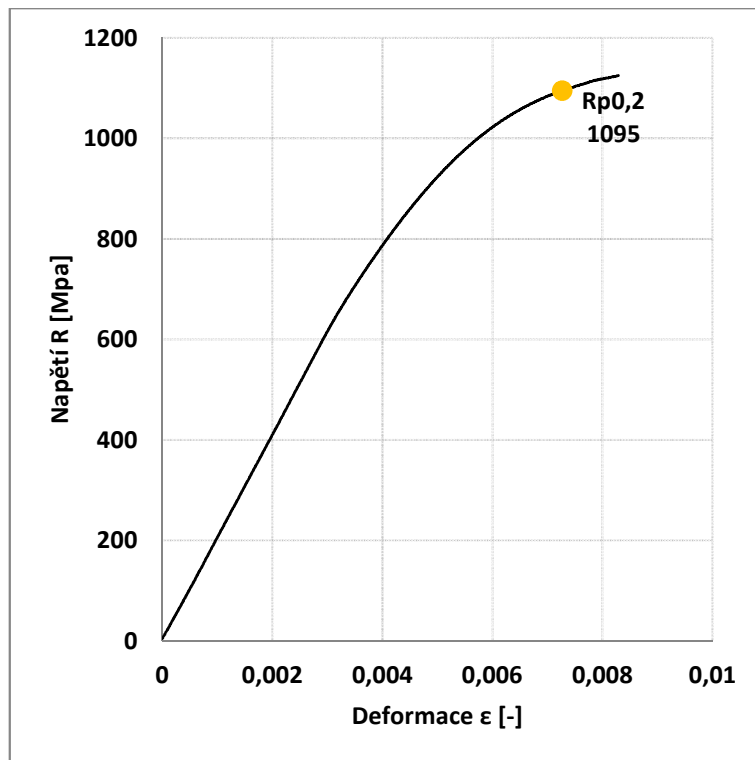
Graf 6 Průběh měření meze pevnosti R_m (vzorek 2)- Instron



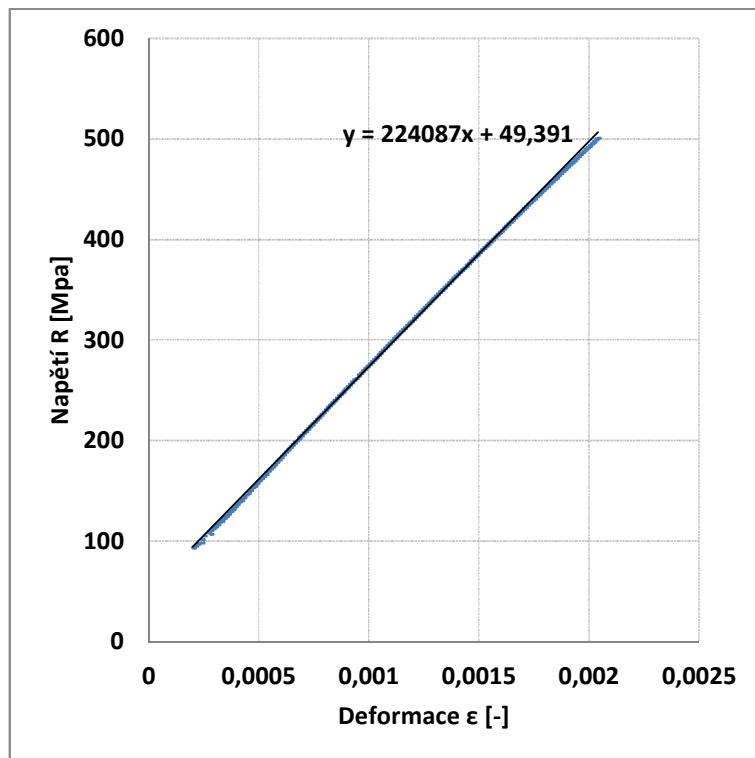
Graf 7 Průběh měření meze pevnosti R_m (vzorek 4)- Instron



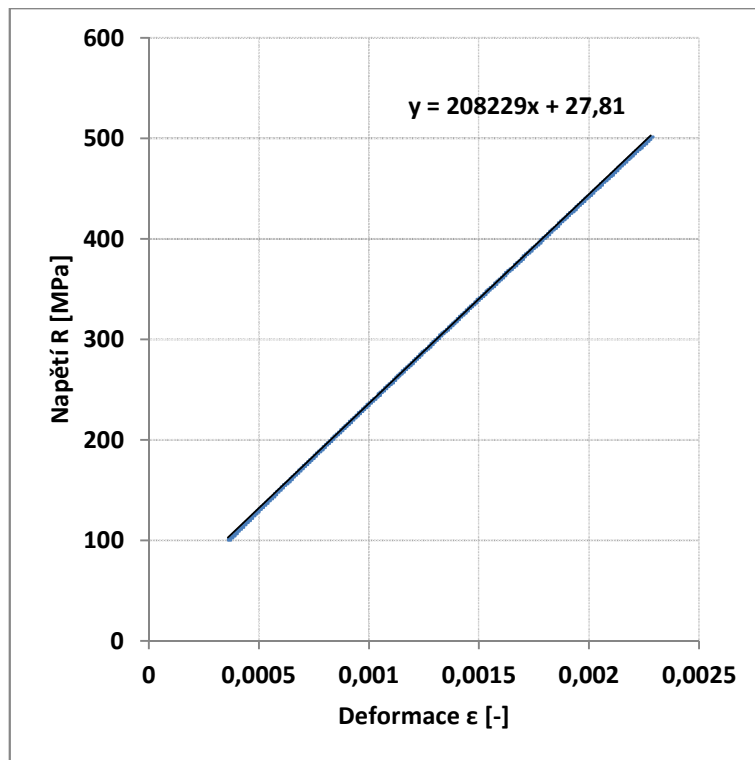
Graf 8 Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 1)- Excel



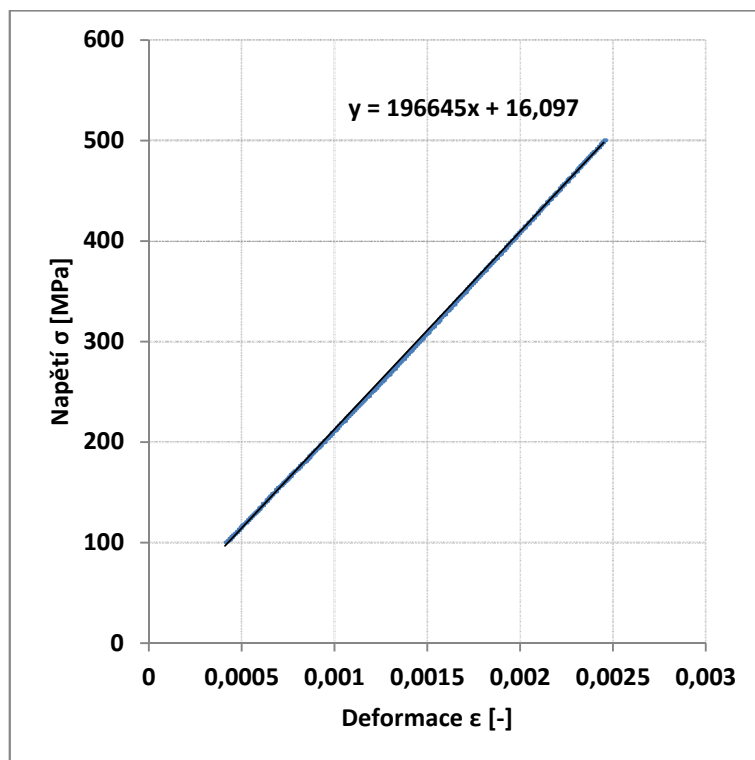
Graf 9 Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (vzorek 2) - Excel



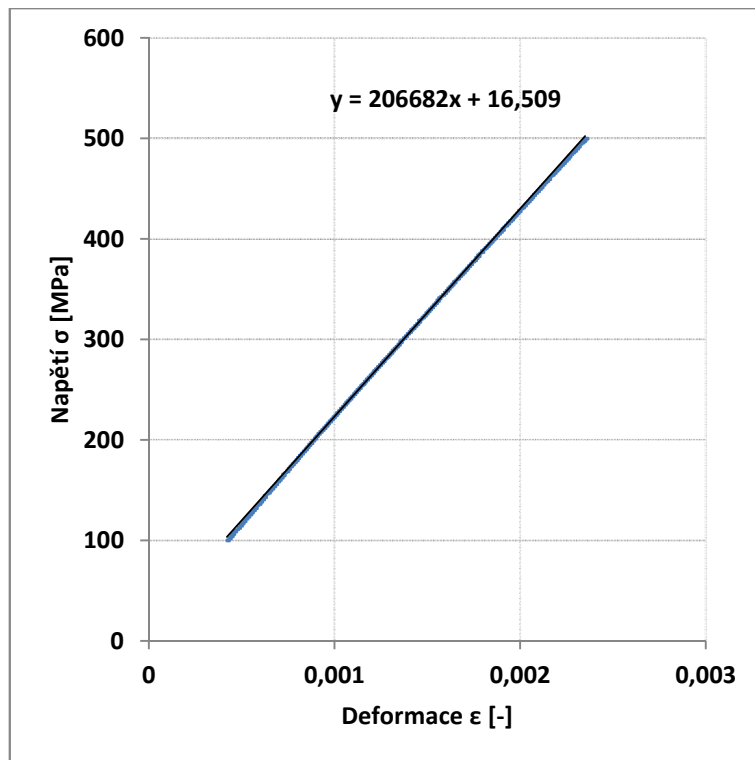
Graf 10 Modul pružnosti E (vzorek 1/měření 1) - Excel



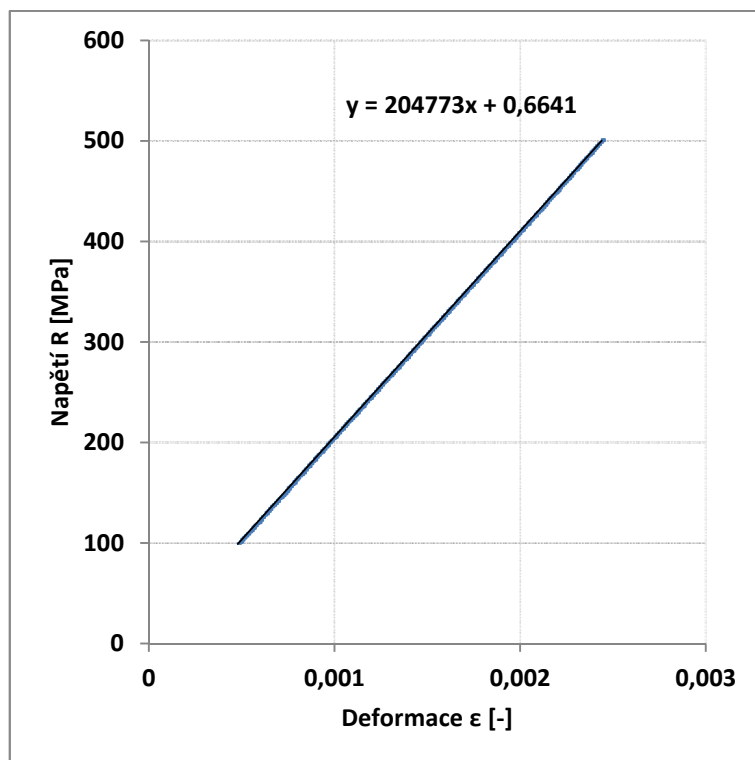
Graf 11 Modul pružnosti E (vzorek 1/měření 2) - Excel



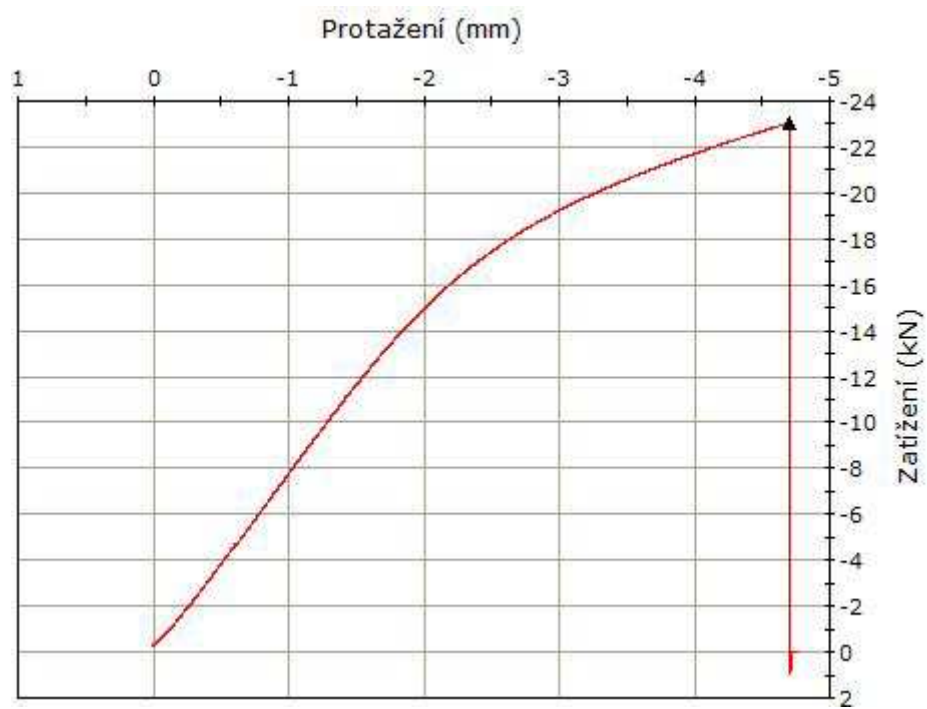
Graf 12 Modul pružnosti E (vzorek 2) - Excel



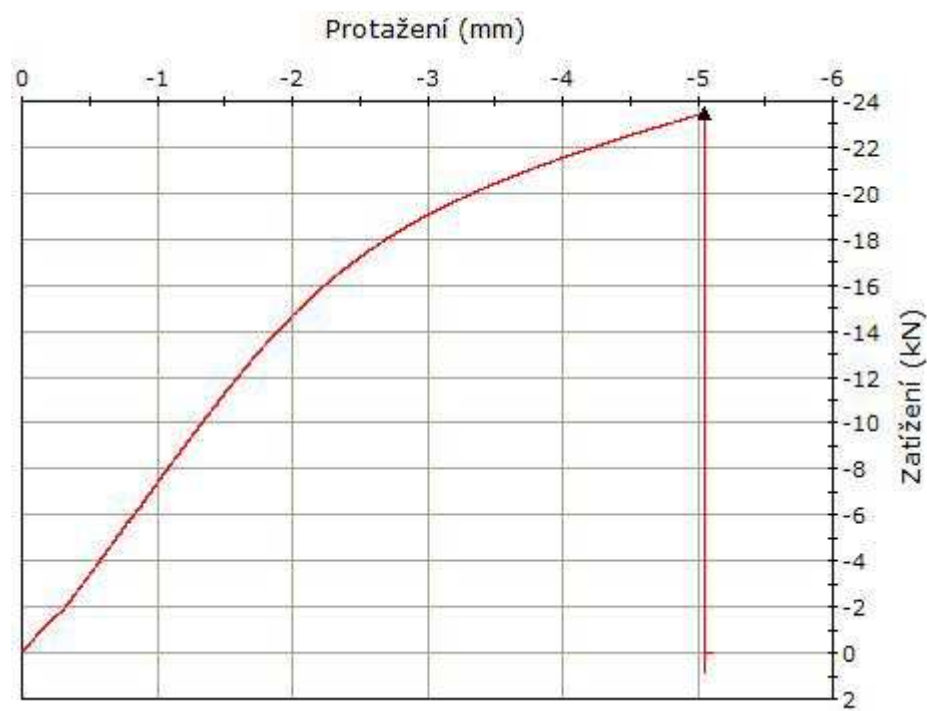
Graf 13 Modul pružnosti E (vzorek 4/měření 1) - Excel



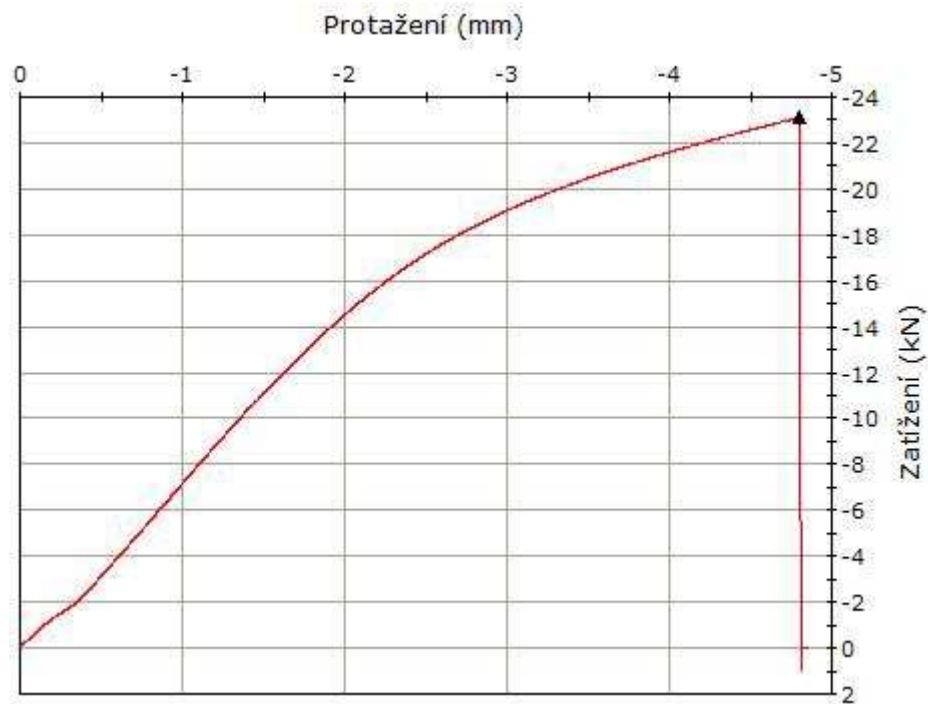
Graf 14 Modul pružnosti E (vzorek 4/měření 2) - Excel



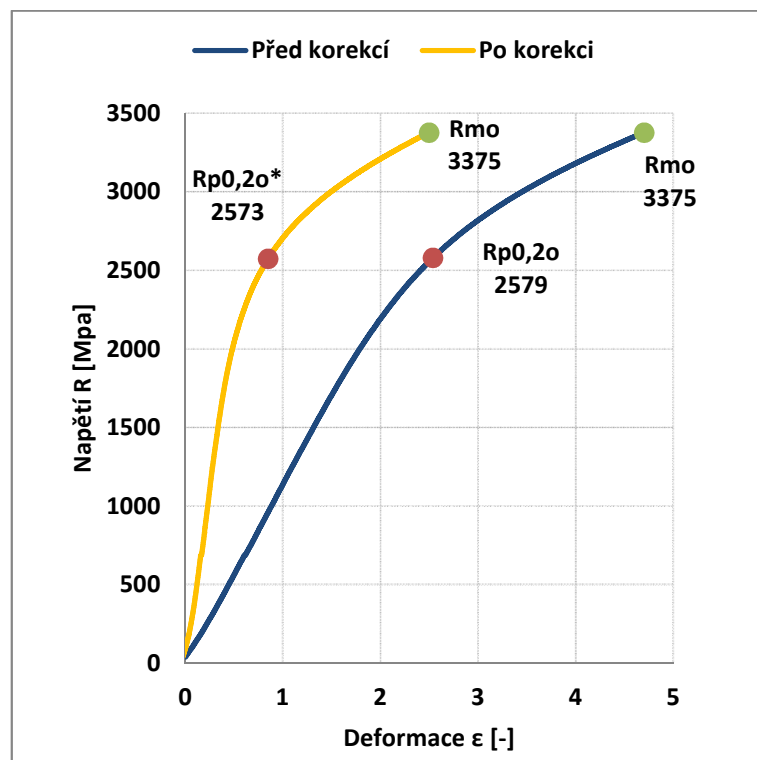
Graf 15 Průběh měření zkoušky ohybem (vzorek 1) - Instron



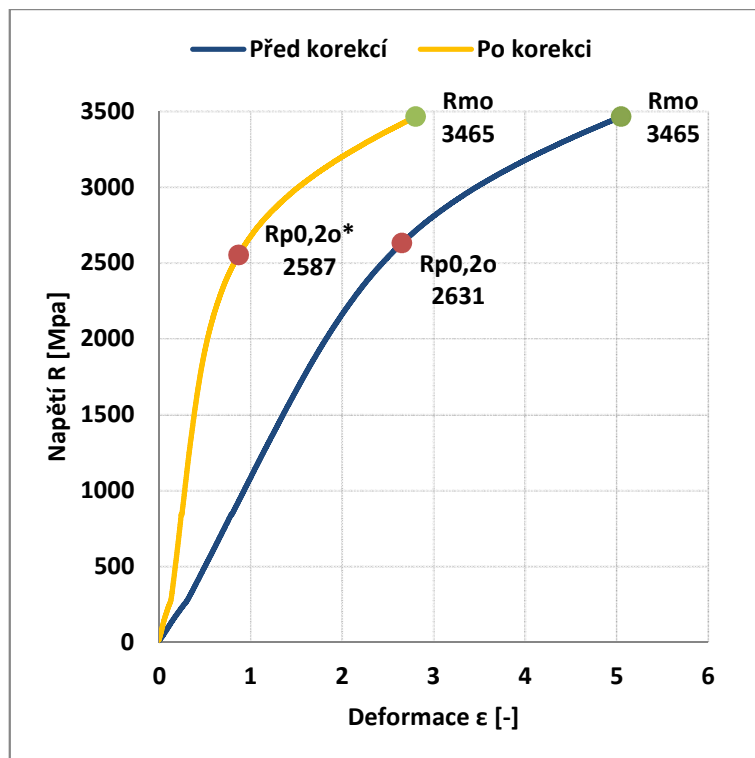
Graf 16 Průběh měření zkoušky ohybem (vzorek 2) - Instron



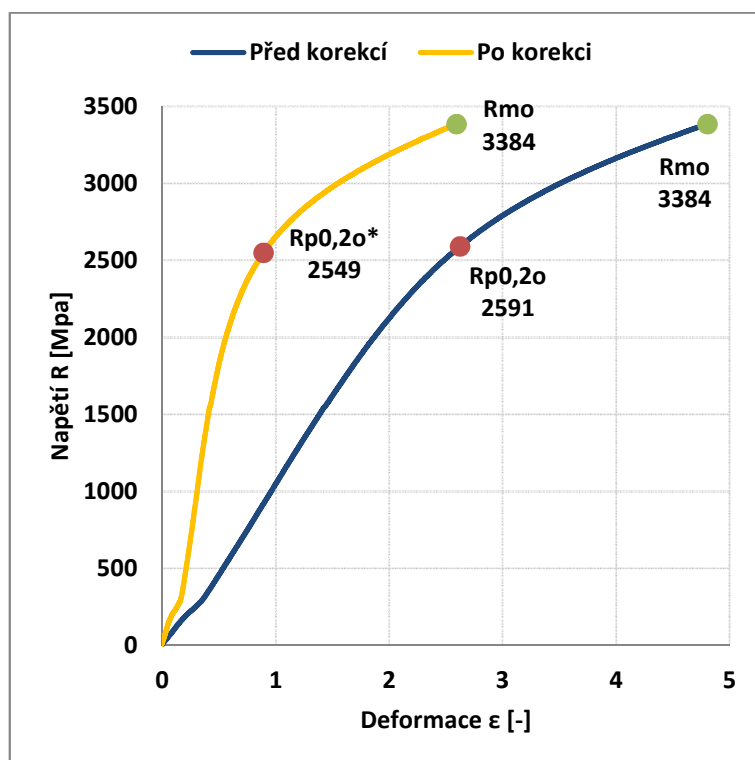
Graf 17 Průběh měření zkoušky ohybem (vzorek 4) - Instron



Graf 18 Průběh zkoušky ohybem bez korekce a s korekcí průhybu y (vzorek 1)



Graf 19 Průběh zkoušky ohybem bez korekce a s korekcí průhybu y (vzorek 2)



Graf 20 Průběh zkoušky ohybem bez korekce a s korekcí průhybu y (vzorek 4)