

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv dlouhodobého tepelného zpracování na oduhličení a mechanické vlastnosti oceli

Autor: **Bc. Jan Brotánek**

Vedoucí práce: **Ing. Josef Odehnal, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr magisterského studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Brotánek	Jméno Jan			
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“				
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Odehnal, Ph.D.	Jméno Josef			
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KMM				
DRUH PRÁCE	BAKALÁŘSKÁ DIPLOMOVÁ	Nehodící se škrtněte			
NÁZEV PRÁCE	Vliv dlouhodobého tepelného zpracování na oduhličení a mechanické vlastnosti oceli				
FAKULTA	strojí	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2018
POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)				GRAFICKÁ ČÁST	30
CELKEM	79	TEXTOVÁ ČÁST	49		
ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato práce se zabývá oduhličením přilítých zkoušek odlitků ze kterých jsou následně zhotovovány zkušební vzorky pro mechanické vlastnosti předávané spolu s odlitkem zákazníkovi. V teoretickém rozboru je uveden potřebný podklad pro praktickou část práce. V experimentální části se práce zabývá oduhličením materiálu v celém průřezu zkušebních bloků, mechanickými vlastnostmi, vzhledem mikrostruktur a hodnotami mikrotvrdosti. V závěrečné části práce je provedeno zhodnocení experimentu s doporučením, jakým oblastem zkušební bloku se při výrobě zkušebních vzorků vyhnout a které jsou naopak vhodné.				
KLÍČOVÁ SLOVA	Oduhličení, Tepelné zpracování, Austenitizace, Mechanické vlastnosti, Mikrostruktura				

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname	Name			
	Brotánek	Jan			
FIELD OF STUDY	3911T016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“				
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees)	Name			
	Ing. Odehnal, Ph.D.	Josef			
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM				
TYPE OF WORK	BACHELOR	DIPLOMA	Delete when not applicable		
TITLE OF THE WORK	Long Time Effect of Heat Treatments on Decarburization and Mechanical Properties of Steel				
FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2018
NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)					
TOTALLY	79	TEXT PART	49	GRAPHICAL PART	30
TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This thesis deals with the decarburization of the poured tests of castings which are subsequently used for test samples for the mechanical properties and which are provided to customer with required část. In the theoretical part of this thesis is given all necessary backround for the practical part. In the experimatal part the thesis deals with decarburization of the testing blocks in the entire section, mechanical properties, microstructures and mickrohardnesses. In the final part of this thesis is an evaluation of the experiment with a recommendation which areas of the tests blocks should be used for test samples.</p>				
KEY WORDS	Decarburization, Heat treatment, Austenitization, Mechanical properties, Microstructure				

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Odehnalovi, Ph.D. a konzultantovi diplomové práce Ing. Miroslavu Hálovi, CSc. za příkladné vedení a cenné rady k dané práci. Dále bych rád poděkoval prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za podmětné připomínky, které pomohly k finální podobě.

Obsah

Přehled použitých zkratk a veličin.....	8
1. Nehomogenita v ocelích	9
2. Možnosti tepelného zpracování.....	9
2.1 Žihání.....	10
2.1.1 Homogenizační žihání	10
2.1.2 Normalizační žihání	11
2.1.3 Žihání pro zhrubnutí zrna.....	12
2.1.4 Žihání základní.....	12
2.1.5 Žihání na měkko	12
2.2 Kalení.....	13
2.2.1 Způsoby kalení.....	14
2.2.1.1 Martenzitické kalení	15
2.2.1.2 Bainitické kalení.....	15
2.3 Popouštění	16
3. Oduhličování oceli	17
3.1 Příčiny vzniku vady	17
3.2 Matematický model oduhličení	18
4. Vliv legujících prvků.....	20
4.1 Doprovodné prvky škodlivé	20
4.2 Doprovodné prvky prospěšné.....	21
4.3 Přísadové prvky	22
4.3 Vliv prvků na oduhličení oceli.....	23
5. Rozpad austenitu	24
6. Přeměny při ochlazování	25
6.1 Perlitická přeměna	25
6.2 Bainitická přeměna	26
6.2.1 Horní bainit	26
6.2.1 Dolní bainit	27
6.3 Martenzitická přeměna	27
7. Transformační diagramy ocelí IRA a ARA	28
8. Odlitek spodního beranu HR18101 a HR17060.	30

8.1 Chemické ložení taveb.....	31
8.2 Tepelné zpracování odlitků	31
8.2.1 Základní parametry žíhací pece MAERZ P91	32
8.2.2 Základní parametry el. žíhací pece	32
8.2.3 Kalicí prostředí.....	33
8.2.4 Grafické znázornění tepelného zpracování	34
8.3 Přilíté zkoušky	35
8.4 Oduhličení přilítých zkoušek po TZ a jejich mechanické vlastnosti.....	36
8.4.1 Odlitek spodního beranu HR18101	36
8.4.1.1 Metalografický rozbor.....	40
8.4.1.2 Mechanické Vlastnosti zk. bloku z HR18101	46
8.4.1.3 Výsledné hodnoty mikrotvrdosti u zk. bloku HR18101	51
8.4.2 Odlitek spodního beranu HR17060	53
8.4.2.1 Metalografický rozbor.....	57
8.4.2.2 Mechanické Vlastnosti zk. bloku z HR17060	62
8.4.2.3 Výsledné hodnoty mikrotvrdosti u zk. bloku HR17060	68
Vyhodnocení cílů práce.....	71
Závěr.....	72
Citovaná literatura	73
Seznam obrázků	75
Seznam tabulek.....	77
Seznam Grafů	78
Příloha	80
Mikrostruktury P1A,P1C, P5A,P5C ze zkušebních bloků z HR18101 a HR17060	80
Výsledné chemické složení spalovací metodou Leco	100
Závěr pro spalovací analýzu Leco	103

Přehled použitých zkratk a veličin

Ms - Martenzit start

Mf - Martenzit finish

PP - Počáteční podmínky

OP - Okrajové podmínka

ARA - Anizotermický rozpad austenitu

IRA - Izotermický rozpad austenitu

Rp0,2 - Mez kluzu

Rm - Mez pevnosti

A5 - Tažnost

Z - Kontrakce

KV - Vrubová houževnatost

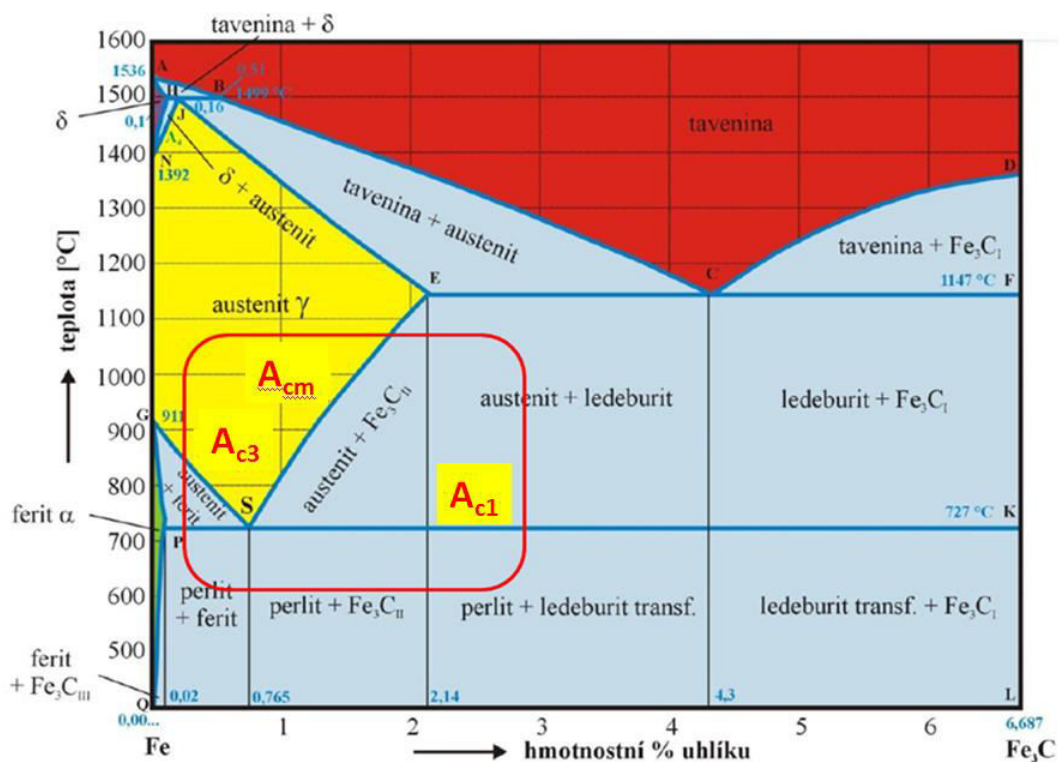
1. Nehomogenita v ocelích

Vadou nehomogenity rozumíme nikoliv rozdíl v chemickém složení, nýbrž shluky vysoké koncentrace vycezenin, sulfidů, či ostatních vměstků, hrubé primární struktury, nízkou hmotnost materiálu, tedy porositu, řediny, staženiny nebo ostatní vnitřní poruchy, které lze zjistit nedestruktivními metodami zkoušení materiálu. [20]

Příčiny vnitřní nehomogenity jsou různé podle toho, jaká vada nehomogenitu způsobuje. Druhy vady se řídí typem a velikostí odlitku a druhem materiálu, z kterého je odlit. Nejčastější příčinou jsou vnitřní dutiny, staženiny, řediny, bublinatost, perezita a plynové vycezeniny, U větších a tlustostěnných odlitků jsou to dále sulfidické vměstky, shluky vycezenin, zadobeniny, hrubá dendritická struktura, vnitřní poruchy souvislosti materiálu či masivní soustružené podpěrky zajišťující polohu jader. [20]

2. Možnosti tepelného zpracování

Struktura odlitků v litém stavu je zpravidla hrubozrnná, u ocelí se středním obsahem uhlíku je přítomen Widmannstättenův ferit a ne zřídka se projevuje i značná heterogenita struktury, vyvolaná různým stupněm odměšení v průběhu krystalizace v rozdílných průřezích odlitku. Tyto okolnosti mají nepříznivý vliv zejména na mechanické vlastnosti odlitku. K nápravě těchto nedostatků a dosažení optimálních vlastností se využívá různého tepelného zpracování.



Obr. č. 1- Rovnovázný binární diagram Fe-Fe₃C

2.1 Žihání

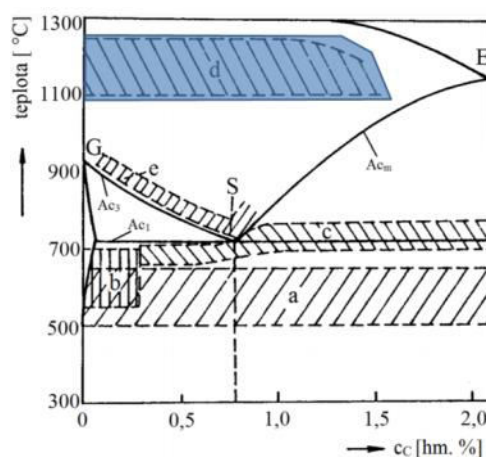
Žiháním nazýváme postup při tepelném zpracování, při které se dílce ohřívají na určitou teplotu a po výdrží následuje (z pravidla pomalé) ochlazování. Cílem je pak dosažení stabilní struktury. Účelem žihání taktéž bývá odstranění nerovnoměrnosti struktury a její zjemnění, vyrovnání rozdílů v chemickém složení, snížení vnitřních pnutí a zotavení deformovaných zrn. Základním diagramem pro stanovení teploty ohřevu je u většiny žihacích pochodů rovnovážný diagram Fe-Fe₃C (viz. obr. 1). [10]

2.1.1 Homogenizační žihání

Účelem homogenizačního žihání je vyrovnat co nejvíce nestejnou chemickou složení oceli difúzí. Nestejnorodost chemického složení již při chladnutí odlité oceli mezi teplotami likvidu a solidu. U ocelí s větším obsahem uhlíku a slitinových prvků se již z taveniny vylučují primární karbidy. [13]

Homogenizační žihání jako samostatná operace je ohřev na teplotu značně vyšší, než je poloha bodů A_{c3} a A_{cm}, tedy mezi teplotami 1100 až 1250 °C (obr. 2), dostatečně dlouhá výdrž na této teplotě (6 i více hodin) a pomalé ochlazení. V zásadě se výdrž na teplotě řídí tloušťkou stěny výrobku, nebo odlitku pro dosažení rovnoměrného prohřátí v celém průřezu. Obvykle se udává výdrž 25 mm = 1 hodina. [13]

Delší výdrž na vysoké teplotě se však zpravidla vytvoří na povrchu okuje a podpovrchové vrstvy se ochudí o uhlík (oduhlíčí). Proto je homogenizační žihání správné jen tehdy, když je to nutné, a pokud možno již na ingotu nebo odlitku; jinak se musí značně zvětšit přídavky na opracování. V oceli již tvářené (s rozrušenou lící strukturou) probíhá ovšem difúzní vyrovnání chemického složení mnohem rychleji. Další tvářením po homogenizačním žihání je nežádoucí pro zjemnění zrna. Pokud je účelem difúzního žihání homogenizace prvků rozpustných ve feritu, lze využít větší difúzní rychlosti v železe α a žihat při teplotách těsně pod bodem A_{c1}, u ocelí s velmi nízkým obsahem uhlíku těsně pod bodem A_{c3}. [13]



Obr. č. 2 - Homogenizační žihání - pásmo žihacích teplot

2.1.2 Normalizační žihání

Účelem normalizačního žihání je zjemnění hrubého zrna, které se v oceli vytvoří při tuhnutí taveniny, nebo dlouhodobým žiháním za vysokých teplot. Dokovací nebo doválcovací teplota, stupeň protávení a rychlost ochlazování po tváření nejsou stejné u všech výrobků a často jsou různé i v různých částech jednoho výkovku, zejména nejsou-li stejného průřezu. Proto mohou mít jednotlivé výrobky různě velké zrno a mohou se různě chovat při následujícím tepelném zpracování. Normalizačním žiháním se vytvoří nejen zrno jemnější, ale i stejnoměrně velké. V normách jakosti ocelí se stav normalizačně žihaných označuje doplňkovým číslem 1. Normalizační žihání podeutektoidních ocelí je ohřev na teplotu o 30 až 50 °C nad bodem přeměny A_3 (viz. obr. 3) a následující volné ochlazení na vzduchu. [13]

Oceli nadeutektoidní se zpravidla normalizačně nežihají. Pokud se má normalizací odstranit karbidické síťový na hranicích zrn, způsobené pomalým ochlazováním po tváření, je vhodná normalizační teplota asi 30 °C nad bodem A_{cm} , a pak rychlé ochlazení až na teplotu pod 700 °C. Další ochlazování musí být pomalé, aby se austenit přeměnil na perlit a nenastalo zakalení, které by při tak vysoké austenitizační teplotě mělo za následek velká pnutí a vznik trhlin. K rychlému ochlazení, které potlačí vylučování nadeutektoidních karbidů na hranicích zrn mezi teplotami A_{cm} a A_{c1} , stačí jen u předmětů malých rozměrů vzduch; u předmětů s většími rozměry (přibližně o průměru větším než 100 mm) nestačí ani krátkodobé ochlazení ve vodě. [13]

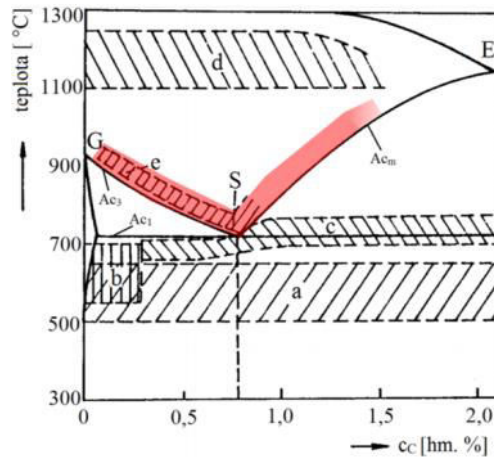
Má-li se normalizačním žiháním nadeutektoidních ocelí zjemnit zrno, provádí se ohřev jen nad teplotu A_1 s následujícím ochlazením na vzduchu. Při ohřevu na teplotu A_{cm} zrno zbytečně hrubne a při pomalém ochlazení se vyloučí karbidy rozpuštěné v austenitu na hranicích zrn a vytvoří se zde karbidická síť. [13]

Normalizační žihání se však nepoužívá jen jako příprava pro následující kalení, ale i jako konečná operace tepelného zpracování méně namáhavých strojních součástí, zpravidla uhlíkových ocelí. Aby se odstranilo vnitřní pnutí, snížila pevnost a zlepšily plastické vlastnosti oceli, výrobek se po normalizaci ještě žihá (žihání na pevnost) při teplotách 500 až 650 °C. [13]

Velmi důležité je normalizační žihání ocelových odlitků. Hrubé a nestejnoměrné zrno, které vzniká při pomalém ochlazování z teploty odlévání, se normalizačním žiháním zjemní alepší se i plastické vlastnosti oceli. Opakovanou normalizací se zrno ještě více zjemňuje.

Zjemnění zrna při normalizaci je způsobeno překrytí, a je tím větší, čím rychleji rychlejší byl ohřev na normalizační teplotu a čím rychlejší bylo ochlazení. Proto u obzvláště náročných součástí bývá normalizační žihání před kalením spojeno s ochlazením do oleje; tento postup se nazývá předzušlechtění. [13]

Vzhledem k požadavku rychlého ohřevu a ochlazení na vzduchu jsou pro normalizační žihání vhodné pece užívané ke kalení. Lze však použít i peci žihacích s výjezdovou nístějí. Pro sériovou výrobu jsou vhodné pece průběžné, zejména válečkové. [13]



Obr. č. 3 - Normalizační žihání - pásmo žihacích teplot

2.1.3 Žihání pro zhrubnutí zrna

Oceli s nízkým obsahem uhlíku jsou po žihání naměkko špatně obrobitelné, protože jsou příliš měkké. Povrch oceli po obrábění je nejakostní (ocel se maže). Proto se tyto oceli, např. oceli cementační, před obráběním normalizují. Protože obrobitelnost je lepší u hrubozrnné struktury, vyvolává se úmyslně zhrubnutí zrna ohřevem na vyšší teploty (950 až 1100 °C) s následujícím pomalým ochlazením v peci. Zápustkové výkovky jsou následkem vyšší kovačí teploty hrubozrnné, takže stačí jen vyžít pod A_{c1} ke snížení tvrdosti, a jsou dobře obrobitelné. [13]

2.1.4 Žihání základní

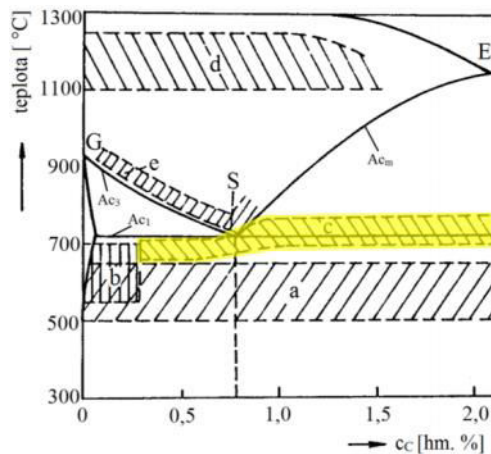
Účelem tohoto žihání je zlepšit obrobitelnost a tvařitelnost ocelí, snížit tvrdost a vnitřní pnutí. Po ohřevu oceli na teplotu 30 až 50 °C nad A_{c3} nebo A_{cm} následuje výdrž na této teplotě a pomalé ochlazování v peci. Stav oceli po tomto tepelném zpracování se v normálních jakostech oceli označuje doplňkovou číslicí 2. [13]

2.1.5 Žihání na měkko

Účelem žihání na měkko je jednak snížení tvrdosti pro následující obrábění nebo tváření za studena, jinak získání vhodných mechanických, fyzikálních i jiných vlastností a rovněž i příprava vhodné výchozí struktury pro následující kalení. [13]

Nejjednodušší žihání na měkko je ohřev na teplotu těsně pod bodem A_{c1} (viz obr. 4) a několikahodinová výdrž na této teplotě. Je-li výchozí strukturou martenzit nebo bainit, vylučují se a shlukují se karbidy při této teplotě poměrně rychle. Je-li výchozí strukturou lamelární perlit, probíhá sbalování lamel poměrně pomalu, a tím pomaleji, čím jsou lamely hrubší. Z hrubého lamelárního perlitu se při tomto způsobu žihání vytvoří hrubý globulární perlit, který je nevhodnou strukturou pro následující kalení zejména u nadeutektoidních ocelí. Karbidické síťoví, tj. nadeutektoidní karbidy vyloučené na hranicích zrn, se tímto žiháním neodstraní. Průběh žihání lze poněkud urychlit kolísáním žihací teploty okolo bodu A_1 . Při žihání velkých kusů nebo velkých vsázek se však mění teplota jen na povrchu a uvnitř materiálu se změny teploty téměř neprojeví. [13]

Podstatně rychleji se globulární perlit vytvoří žiháním při teplotách nad A_{c1} s následujícím pomalým plynulým ochlazováním. Je-li ve výchozí struktuře před žiháním hrubý lamelární perlit, je tento způsob žihání jediné možný k dosažení jemného globulárního perlitu. Předpokládá austenitizaci perlitu bez přílišné homogenizace austenitu, aby v ohřáté oceli bylo co nejvíce zárodků, z nichž se při ochlazování vylučují jemné a stejnoměrně rozložené karbidy. Čím má ocel větší obsah uhlíku, tím déle se karbidy rozpouštějí, a proto u nadeutektoidních ocelí je správná žihací teplota vyšší. [13]

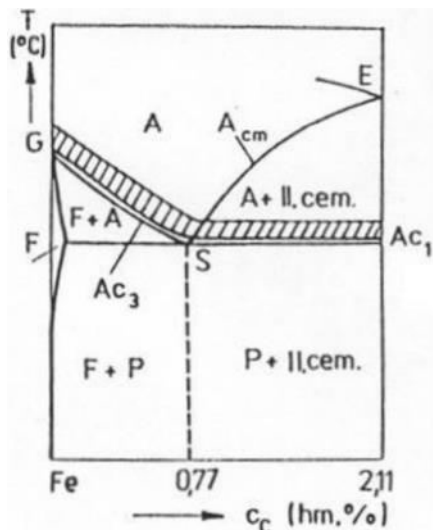


Obr.č. 4 - Žihání na měkko - pásmo žihacích teplot

2.2 Kalení

Kalení je pro ocel nejtypičtějším způsobem tepelného zpracování. Závislost přeměny modifikace γ v α na ochlazovací rychlosti umožňuje dosažení takové rozmanitosti vlastností jako u žádných jiných slitin. Kalení je tepelné zpracování, jehož cílem je dosažení nerovnovážných stavů ocelí. Výsledné martenzitické nebo bainitické struktury jsou velmi tvrdé a pevné [2, 3, 5].

Kalení spočívá v ohřevu na teplotu nad A_{c3} , popř. nad A_{c1} a v ochlazování rychlostí kritickou nebo nadkritickou okamžitě po pohřevu. Volba správné kalicí teploty (viz obr. 5) je velmi důležitá. Ta u podeutektoidních ocelí nabývá hodnot 30 až 50 °C nad A_{c3} , u ocelí nadeutektoidních se obvykle pohybuje v rozmezí 30 až 50 °C nad A_{c1} . Nesprávně zvolená kalicí teplota má za následek vznik nežádoucích struktur (obvykle měkčí, křehčí a s vyššími hodnotami vnitřních pnutí) [4, 6, 17].



Obr.č. 5 - Pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C [6].



Obr. č. 6 - Průběh ochlazování při kalení do různých prostředí [4].

Oceli kalitelné jsou oceli, u kterých lze získat martenzitickou strukturu. V souvislosti s kalitelností se zavádí ještě další dva pojmy, a to zakalitelnost a prokalitelnost. Zakalitelnost je dána maximální tvrdostí povrchu výrobku a může být určena na jakémkoliv vzorku ochlazovaném nadkritickou rychlostí. Je závislá především na chemickém složení a stavu austenitu před kalením. Prokalitelnost je schopnost oceli dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem požadovanou tvrdosti. Na prokalitelnost má největší vliv poloha křivek v ARA diagramu [2, 4, 13].

Kalicí prostředí se volí tak, aby ochlazování pro danou ocel probíhalo alespoň kritickou rychlostí. Oceli s malou prokalitelností se musí chladit intenzivněji, než oceli s prokalitelností vyšší (např. oceli tzv. samokalitelné se kalí jen na vzduchu). Základní kalicí prostředí a průběhy jejich ochlazování jsou uvedeny na obr. 6 [4, 6].

Tab. č. 1 - Hodnoty tvrdosti po kalení u různých ocelí [1].

Označení	Chladící prostředí	Kalicí teplota [°C]	Tvrdost [HRC]
11 500	voda	850 – 880	asi 40
	olej	860 – 890	asi 30
12 020	voda (olej)	770 – 800	asi 62 ⁵
14 208	voda	790 – 820	min. 61
	olej	810 – 830	
19 103	voda	780 – 810	min. 59
	olej	800 – 840	asi 55

⁵ Této tvrdosti je dosaženo až druhým kalením, kterému předcházelo kalení z teploty 870 – 920 °C a mezižihání.

2.2.1 Způsoby kalení

V praxi se používá různých způsobů kalení. Vhodný způsob je vybrán s ohledem na požadované vlastnosti kaleného předmětu, jeho tvaru a velikosti a na druhu použité oceli.

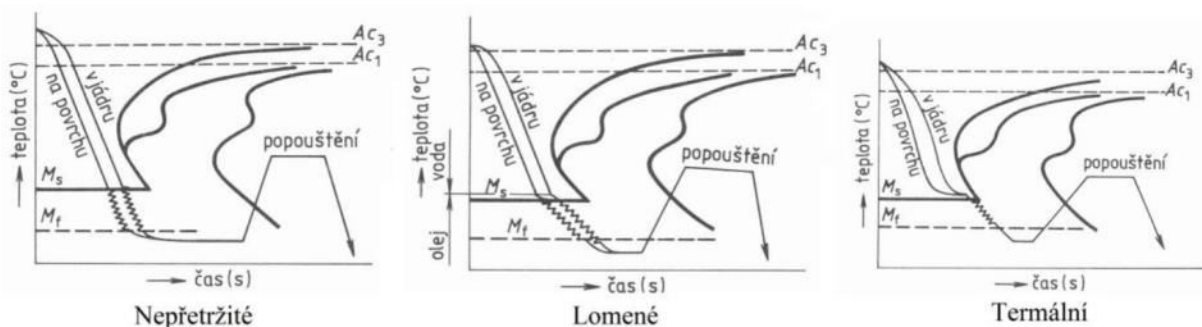
Kalení se rozděluje podle převažující strukturní složky v zakalené oceli na martenzitické a bainitické [2, 6].

2.2.1.1 Martenzitické kalení

Struktura po martenzitickém kalení je tvořena pouze martenzitem a určitým podílem zbytkového austenitu. Pro snížení zbytkového austenitu je nutné ochladit ocel pod teplotu M_f . Následuje po něm popouštění [2]. Nejjednodušší a nejpoužívanější je martenzitické kalení do studené lázně (nepřetržitě). Kalicí prostředí je voda, olej nebo vzduch. Je technologicky nenáročné, ale nevýhodou jsou vysoké úrovně vnitřních pnutí (při kalení do vody může dojít i k prasknutí kalených předmětů) [2].

Lomené kalení využívá ochlazování ve dvou lázních. Nejprve probíhá rychlé ochlazování až k teplotě těsně nad M_s , poté se předmět dochládí v mírnějším prostředí, ve kterém proběhne martenzitická přeměna. Tímto je dosaženo snížení vnitřních pnutí a používá se pro tvarově složité a rozměrné výrobky [2, 4].

Termální kalení se provádí ochlazením v lázni, jejíž teplota je těsně nad M_s . Na této teplotě se provádí výdrž k vyrovnání teplotního rozdílu mezi jádrem a povrchem. Prodleva může být poměrně dlouhá, ale měla by být ukončena dříve, než začne přeměna bainitická. Další ochlazování probíhá na vzduchu. Termální kalení se používá pro malé tenkostěnné a tvarově složité součásti z nelegovaných nebo nízkolegovaných ocelí nebo pro výrobky z vysokolegovaných ocelí [4, 6, 14].



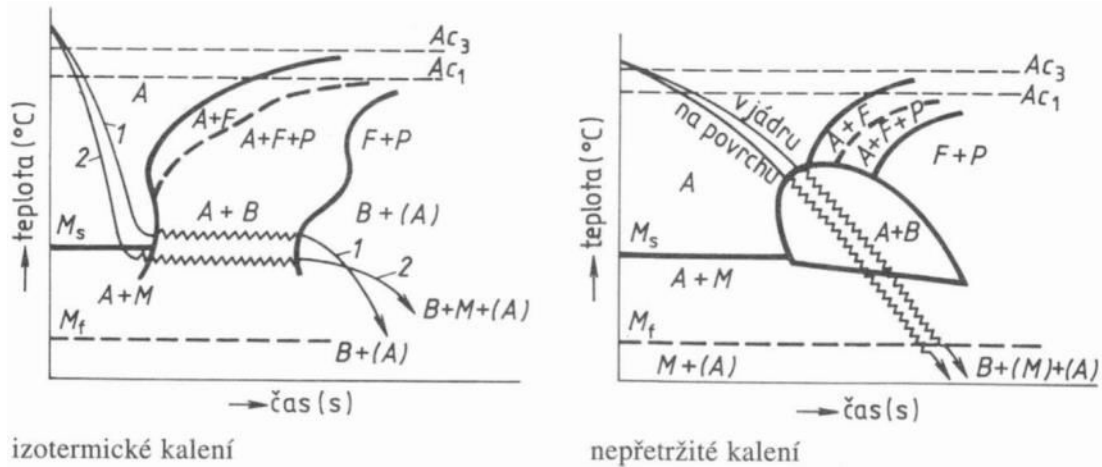
Obr. č. 7 - Schéma průběhu martenzitického kalení [4].

Při kalení se zmrazováním je předmět ihned po martenzitickém kalení přenesen do prostředí, jehož teplota je pod bodem mrazu. Účelem zmrazování je zmenšení podílu zbytkového austenitu ve struktuře. Je to metoda nákladná a používá se tam, kde je kladen důraz na stabilitu rozměrů (měřidla, kluzná ložiska) [4, 6].

2.2.1.2 Bainitické kalení

Součásti se po bainitickém kalení obvykle nepopouští, výjimkou jsou výrobky zpracované nepřetržitým kalením. Při izotermickém zušlechťování je předmět ochlazován v termální lázni o teplotě v rozmezí 300 – 400 °C. V lázni setrvá až do ukončení bainitické přeměny a poté je dochlazován na vzduchu. Při tomto zpracování jsou úrovně teplotních a strukturních pnutí minimální. Zušlechťované součásti se obvykle nepopouštějí. Využívá se pro výrobky menších průřezů z nízko a středně legovaných ocelí [4, 6]. Izotermické kalení je obdobou izotermického zušlechťování. Teplota lázně je těsně pod M_s a během tohoto zpracování vzniká struktura martenziticko-bainitická. Této struktury je možné dosáhnout i nepřetržitým

bainitickým kalením, které se provádí u ocelí s předsunutou bainitickou oblastí v diagramu ARA [4].



Obr. č. 8 - Schéma průběhu bainitického kalení (1 – izotermické zušlechťování, 2 – izotermické kalení) [4].

2.3 Popouštění

Zakalená ocel, v jejíž struktuře převládá martenzit, je velmi tvrdá, ale má značné pnutí a je také značně křehká. Ocel v tomto stavu je v praxi téměř nevyužitelná, a proto po kalení následuje popouštění [4].

Popouštění spočívá v ohřevu na teplotu pod A_{c1} , dostatečné výdrži (obvykle dvě hodiny) a ochlazování vhodnou rychlostí. Musí následovat ihned po zakalení, protože vnitřní pnutí mohou způsobit popraskání součásti i po vyjmutí z lázně. Jeho cílem je vytvoření struktur bližších rovnovážnému stavu [6].

Podle výšky popouštěcí teploty a účelu se popouštění rozděluje na dvě skupiny:

- popouštění při nízkých teplotách (napouštění) probíhá v rozmezí teplot 100 – 350 °C. Účelem tohoto popouštění je snížení úrovně vnitřních pnutí, zlepšení houževnatosti, snížení podílu zbytkového austenitu a stabilizace rozměrů součásti při malém poklesu tvrdosti. Používá se hlavně u nástrojových ocelí [2, 3, 5].
- popouštění při vysokých teplotách (anizotermické zušlechťování) v rozmezí 400 až 650 °C. Účelem tohoto popouštění je dosažení vysoké houževnatosti v kombinaci s dobrými pevnostními vlastnostmi. Zušlechťují se vysoce namáhané součásti z konstrukčních ocelí [2, 6].

Při zvyšování popouštěcí teploty klesá mez kluzu, mez pevnosti, tvrdost a roste houževnatost a plasticita. Ovšem u některých ocelí a v určitých teplotních oblastech dochází s poklesem pevnostních vlastností i k poklesu houževnatosti. Toto je způsobeno popouštěcí křehkostí. Rozlišujeme nízkoteplotní (350 – 450 °C) a vysokoteplotní (okolí teploty 550 °C) popouštěcí křehkost. Nízkoteplotní popouštěcí křehkost je nevratná, můžeme ji pouze omezit krátkou výdrží v rozmezí jejich teplot. Vysokoteplotní popouštěcí křehkost lze odstranit opětovným ohřevem a rychlejším ochlazením z popouštěcí teploty [2, 4, 6].

Tab. č. 2 - Hodnoty tvrdosti po popouštění u různých ocelí [1].

Označení	Teplota popouštění [°C]	Tvrdost ⁷	Poznámka
11 500	560 – 670	HB 173 – 203	konstrukční ocel
12 040	530 – 670	HB 160 – 203	k zušlechťování
14 208	150 – 170	HRC min. 52	na valivá ložiska
19 103	100 – 320	HRC 48 – 61	nástrojová ocel

U některých vysoce legovaných ocelí je popouštěcí teplota až 600 °C. Výjimku tvoří také součásti, u kterých je kladen požadavek na vysokou houževnatost. V takových případech může popouštěcí teplota dosáhnout až 400 °C [3, 5].

⁷ Hodnoty tvrdosti odpovídají popouštění, kterému předcházelo kalení.

3. Oduhličování oceli

Nepřípustné oduhličování povrchu odlitku a tím nevyhovující struktura v dané oblasti. Má za následek celkovou změnu mechanických, fyzikálních a chemicko-technologických vlastností odlitku. V případě oduhličování do „malé“ hloubky a v případě, že to přejímací podmínky připustí, nemusí být na závadu.

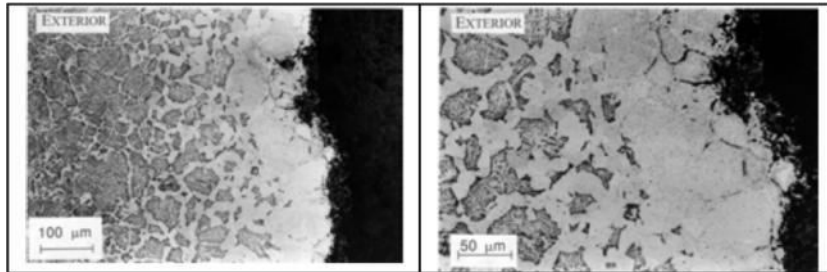
K povrchovému oduhličování může dojít buďto přirozeným způsobem přímo ve formě, což většinou nebývá (podle druhu slitiny a hloubky oduhličování) na závadu, nebo uměle při tepelném zpracování v zařízeních, která nemají řízenou atmosféru (vliv atmosférického kyslíku). [18]

3.1 Příčiny vzniku vady

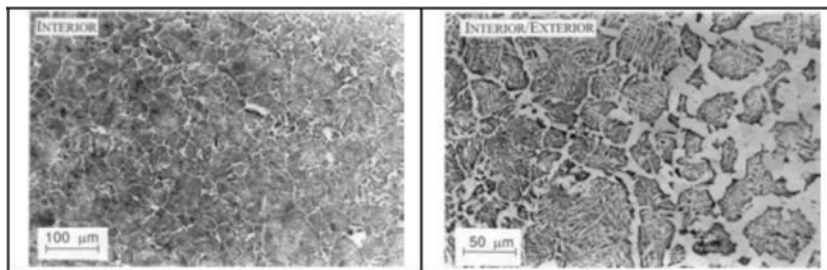
K oduhličování povrchových vrstev odlitku dochází v oxidační atmosféře v důsledku reakce: $C + O_2 \rightarrow CO_2$, je-li k dispozici aktivní kyslík, který se slučuje s uhlíkem ve slitině (v oceli a litině) a v podobě CO uniká do atmosféry. K významnému oduhličování dochází především v průběhu tepelného zpracování v žíhacích pecích. [18]

- Rychlost oduhličování je přímo závislá na teplotě, čase a oxidačním potenciálu pecní atmosféry. Nejvýznamnější je teplota procesu. Pod teplotou cca 500 °C je oduhličování zanedbatelné a pak s růstem teploty prudce roste. Při teplotě cca 900 °C je intenzita více než 70x větší, jako při teplotě 600 °C. [18]
- Oduhličování povrchových vrstev vzniká difuzí uhlíku z vnitřních částí směrem k povrchu. Množství kyslíku pod povrchem je relativně velmi malé a afinita kyslíku k uhlíku je větší jako k železu, z toho důvodu se neokysličuje ve větší hloubce Fe, ale pouze C. Z povrchu jsou atomy uhlíku odváděny poměrně rychle jeho snadným okysličováním. Tím se v povrchové vrstvě jeho koncentrace sníží a umožní další difuzi uhlíku směrem k povrchu. [18]
- Významnou roli v procese oduhličování hraje též složení slitiny a složení pecní atmosféry. Pecní atmosféra může obsahovat následující plyny: CO₂, CO, O₂, N₂, H₂O,

CH₄. Poměr množství jednotlivých plynů určuje charakter pecní atmosféry (oxidační, redukční, neutrální). Neutrální atmosféra, v případě, že není vytvořena uměle (např. argon) je dána poměrem oxidačních a redukčních složek plynného prostředí. [18]



Obr. č. 9 a)b) - Povrch oduhličené perlitické oceli [19]



Obr. č. 10 a)b) - Přechodová oblast částečně oduhličené oceli [19]

Jako příklad je v obr. č. 9 a,b oduhličený povrch eutektoidní perlitické oceli, v obr. č. 10 a,b je následující přechodová mezivrstva mezi částečně oduhličenou oblastí povrchové vrstvy a doposud neoduhličenou vnitřní oblastí, po vyžhání v oxidační atmosféře pece. Množství feritu v oduhličené vrstvě směrem k povrchu roste. Ferit nukleuje na hranicích zrn austenitu a postupně narůstá jeho množství a tloušťka. Tmavá následující oblast je směs Widmannstättenova feritu a perlitu. Vzhledem k tomu, že v další fázi oduhličení se na povrchu součásti již nenachází žádný uhlík, nastává oxidace Fe. Oxidace proniká přednostně po primárních hranicích zrn austenitu neboť jsou zde nejpříznivější energetické podmínky. [18]

3.2 Matematický model oduhličení

Matematický popis procesu oduhličení, či nauhličení povrchových vrstev oceli při tepelném zpracování vychází z řešení difúzní rovnice (2. Fickova zákona) pro poloprostor. Předpokládáme-li jednorozměrnou difúzi, difúzní tok je kolmý na rozhraní povrch oceli – atmosféra, potom lze okrajovou úlohu popisující tento problém definovat následujícím způsobem:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

$$\text{P.P.: } c(x,0) = c_c \quad \text{pro } x > 0 \quad (2)$$

$$\text{O.P.: } c(0,t) = c_0 \quad \text{pro } x > 0, \quad (3)$$

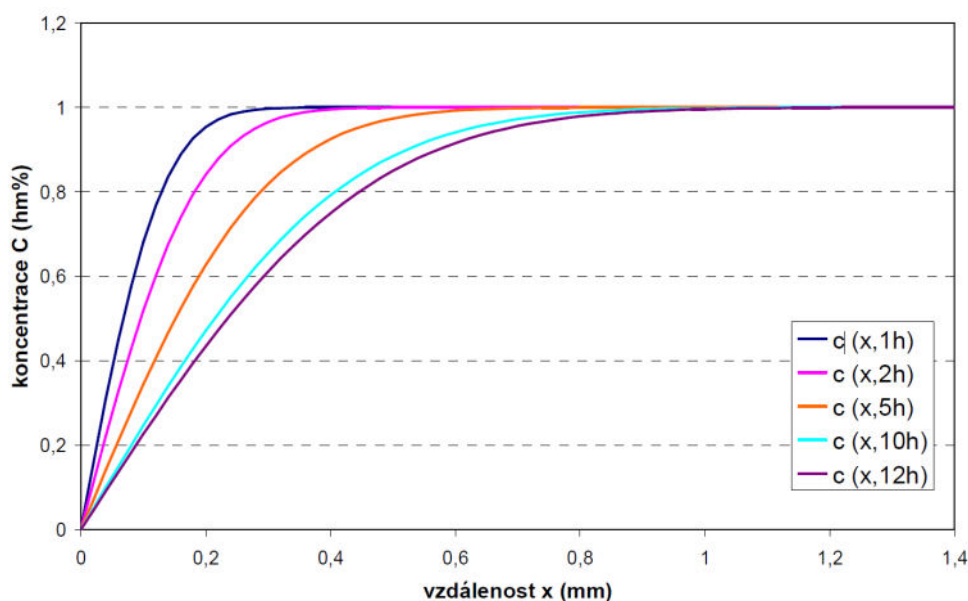
kde c_c je počáteční koncentrace uhlíku v oceli, c_0 je koncentrace uhlíku v atmosféře (uhlíkový potenciál atmosféry), D_c je difúzní koeficient uhlíku. [20]

Aplikací metody kombinace proměnných (bezrozměrné transformace) na okrajovou úlohu (1)-(3) získáme řešení ve tvaru:

$$\frac{c(x,t) - c_0}{c_c - c_0} = \text{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right] \quad (4)$$

kde $c(x,t)$ je koncentrace uhlíku v místě x od povrchu oceli v čase t .

Pro případ oduhličení platí $c_0 < c_c$. Koncentrační profily uhlíku v oceli vykreslené dle rovnice (4) pro různé časy jsou uvedeny na obr. č. 11. Byla uvažována difuze uhlíku v austenitu ($D_c(\gamma) = 10^{-8} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ při teplotě 800°C), dále pro jednoduchost byly uvažovány následující koncentrace uhlíku v oceli a atmosféře: oduhličení (obr. č. 29) – $c_c = 1 \text{ hm\%}$ a $c_0 = 0 \text{ hm\%}$. [20]

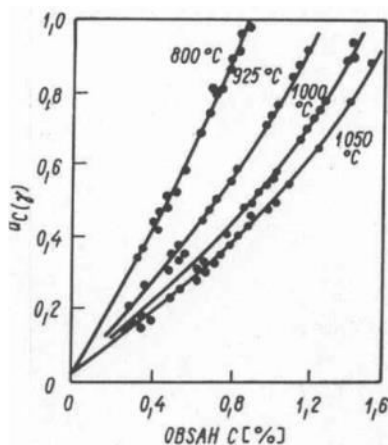


Obr. č. 11 - Koncentrační profily uhlíku dle rov(4), oduhličení [20]

Ve výše uvedených rovnicích (1)-(4) jsou obecně uvažovány koncentrace uhlíku v atmosféře (c_0) a v oceli (c_c). Při reálných výpočtech je nutno uvažovat termodynamickou aktivitu uhlíku a to jak v atmosféře, tak v oceli. Termodynamická aktivita uhlíku v atmosféře se často označuje jako tzv. uhlíkový potenciál atmosféry. Uhlíkový potenciál atmosféry bývá nejčastěji zjednodušeně definován jako obsah uhlíku v plynné směsi (atmosféře), který je v termodynamické rovnováze s obsahem uhlíku v povrchových vrstvách oceli. Ve skutečnosti

je třeba vždy pracovat s termodynamickými aktivitami, a to jak na straně atmosféry, tak na straně oceli. [20]

Roztok uhlíku v železe nelze pokládat za ideální, proto je nutno stanovit termodynamickou aktivitu rozpuštěného uhlíku (a_c). Jak ukazují výsledky pokusů na obr. č. 12, je závislost mezi aktivitou uhlíku v austenitu a koncentrací nelineární, protože aktivita uhlíku roste rychleji než koncentrace. Svědčí to o značných kladných odchylkách od zákonů ideálních roztoků. Z obrázku je také patrné, že při stejné koncentraci klesá aktivita uhlíku s rostoucí teplotou. [20]



Obr. č. 12 - Závislost aktivity uhlíku v austenitu na jeho koncentraci [20]

4. Vliv legujících prvků

Kromě železa a uhlíku jsou v ocelích a litinách přítomny další prvky, které mohou výrazným způsobem ovlivnit jejich vlastnosti. Některé prvky jsou přítomny vždy a to v množstvích souvisejících s výrobním procesem a použitými surovinami. Tyto prvky nazýváme prvky doprovodné. Dělí se na prvky škodlivé (S, P, O, H, N) a prvky prospěšné (Mn, Si). Působením prospěšných prvků se odstraňují nebo váží nečistoty. Tím se jejich nepříznivé působení snižuje do přípustných mezí. Druhou skupinu tvoří ty prvky, které jsou do ocelí a litin přidávány úmyslně, za účelem upravení některých vlastností. Nazýváme je prvky legující (přísadové, slitinové). [11]

4.1 Doprovodné prvky škodlivé

Síra

Obsah síry je u běžně vyráběných ocelí obvykle nižší než 0,02%. U vybraných typů perspektivních ocelí je ještě nižší (v tisícinách %). Pouze u tzv. automatových ocelí je podíl síry zvyšován až na 0,2%, za účelem zvýšení lámavosti třísky při obrábění. U kvalitních litin bývá obsah síry do 0,1%, u speciálních litin do 0,04%.

U ocelí tvářených nad teplotou 985 °C (tání eutektika Fe-S) způsobuje síra křehkost - „lámavost za červeného žáru“. Sulfid železnatý zhoršuje vrubovitou houževnatost, tvařitelnost za studena a odolnost proti korozi.

Nepříznivý vliv síry lze z větší části snížit přidáním manganu (popř. Ti, Zr a kovů vzácných zemin). Větší část síry přijde do strusky, zbytek se vyloučí ve formě sulfidů manganu, jejichž nepříznivý vliv je menší než vliv sulfidů železa. [11]

Fosfor

U většiny ocelí je obsah fosforu nižší než 0,03%. U litin se obsah fosforu pohybuje v desetinách procenta (obvykle do 0,5%), u jakostních litin je jeho obsah omezen na 0,15%. Fosfor v oceli způsobuje lámavost za studena, snižuje vrubovou houževnatost, zvyšuje přechodovou teplotu, zhoršuje tvařitelnost, zvyšuje křehkost svarů a propouštěcí křehkost. Odměšováním při tuhnutí zvyšuje heterogenitu. [11]

Kyslík

Kyslík rozpuštěný v železe, zvětšuje při obsahu nad 0,01% tvrdost, křehkost a výrazně přechodovou teplotu. Vliv kyslíku vázaného ve vměstcích (oxidy, křemičitany) závisí na tvaru vměstků. Jemně vyloučené vměstky působí příznivě (zjemnění struktury). Větší množství zvláště hrubších vměstků způsobuje sklon k „dřevitým lomům“, k únavovým lomům, heterogenitu vlastností po tváření, vznik prasklin při tepelném zpracování a sklon k bodové korozi. [11]

Vodík

V ocelích se obsah vodíku pohybuje v rozmezí 0,0001 až 0,0007%. Vodík má silný sklon k segregaci. V železe a jeho slitinách se vodík rozpouští pouze v atomárním stavu, s klesající teplotou jeho rozpustnost klesá (při teplotě okolí je obsah vodíku 0,002 % při tlaku 0,1 MPa). Přebytkový vodík se vylučuje v molekulární formě a vyvolává ve svém okolí silné napětí vedoucí ke vzniku vlasových trhlinek a trhlinek, které svým vzhledem připomínají vločky. Rozpuštěný vodík snižuje tažnost, kontrakci a vrubovou houževnatost. Vodík lze odstranit vhodným žiháním. [11]

Dusík

Jedná se o austenitotvorný prvek s běžným obsahem v ocelích od 0,002 do 0,0140%. Za účelem zjemnění zrna nebo stabilizace austenitu se zvyšuje např. u austenitických ocelí až na 0,25%. U litin bývá jeho obsah nižší než u ocelí, neboť s rostoucím obsahem uhlíku rozpustnost dusíku v železe klesá.

S klesající teplotou se dusík vylučuje ve formě nitridů železa. Ty se vylučují přednostně na hranicích zrn a ve skluzových deformačních pásech. Tím dochází k výraznému poklesu vrubové houževnatosti a tvařitelnosti za studena -stárnutí oceli. Nebezpečí stárnutí lze odstranit přidáním prvků (Al, Ti) s vyšší afinitou k dusíku než má železo, které tvoří nitridy stálé i za vysokých teplot. Nitridy železa navíc zvyšují sklon oceli k interkrystalické korozi. [11]

4.2 Doprovodné prvky prospěšné

Mangan

Doprovodný austenitotvorný prvek, který je v oceli považován až do obsahu 1,65%. V litinách bývá 0,4 až 1% manganu. Mangan v oceli zvyšuje tvrdost, pevnost i houževnatost. Pouze malá část manganu je vázána v cementitu, který se tím stabilizuje. Mangan působí jako účinný dezoxidační prostředek a jako prostředek k vázání síry a snižování jejího nepříznivého vlivu. [11]

Křemík

Doprovodný prvek, který je (dezoxidační přísada) v ocelích považován do obsahu 0,5%. V ocelích na odlitky je jeho přítomnost nutná ke zlepšení slévatelnosti. V šedé litině bývá 0,8 až 2,7% křemíku. Křemík zvyšuje pevnost feritu, zhoršuje však tvárnost za studena, zpomaluje fázové přeměny v tuhém stavu. [11]

Kromě uvedených prvků jsou v ocelích přítomny další příměsi, např. měď, chrom, nikl atd. v malých množstvích. Do ocelí se dostávají z rud nebo ze zpracovaného šrotu. Z těchto prvků je třeba upozornit zvláště na měď, nikl či molybden, který se nedá hutnickými pochody odstranit. Měď bývá v ocelích přítomna v množstvích do 0,2%. Zvyšuje odolnost oceli proti korozi. Vyšší obsah mědi má však za následek povrchové praskání oceli při tváření prováděném nad teplotou 1000°C. [11]

4.3 Přísadové prvky

Přísadové (legující) prvky jsou prvky, které se do ocelí úmyslně přidávají za účelem zlepšení některých vlastností. Je to např. k zvýšení tvrdosti a pevnosti při vyhovující houževnatosti, zlepšení prokalitelnosti a odolnosti proti propouštěcí křehkosti, odolnosti proti opotřebení a korozi, žárovzdornosti, žárupevnosti, ovlivnění velikosti zrna, zabránění vylučování nežádoucích nitridů a karbidů apod. Požadované vlastnosti oceli získáme nejen vhodnou kombinací legujících prvků ale vždy i správně zvoleným tepelným zpracováním. Často mohou i některé doprovodné prvky vystupovat jako přísadové (od určitého mezního obsahu) a naopak při velmi nízkých obsazích přísadových prvků nemusí být ocel ještě ocelí slitinovou. Mezní obsahy hlavních prvků, od kterých jsou tyto prvky považovány za prvky legující jsou:

Mn-1,65% Cr-0,30% Ni-0,30% W-0,10% Si-0,50% Mo-0,08% V-0,10% Ti-0,05%

Některé prvky přidáváme úmyslně v množstvích nižších než jsou uvedené mezní obsahy (v setinách a nízkých desetínách procenta). Potom hovoříme o mikrolegurách. Legující prvky lze podle jejich významu a nejčastějšího použití seřadit takto:

Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, Co, Ti, Al, Cu, Nb, Zr, B, N.

Nejčastěji se používá prvních sedmi prvků z této řady. Všechny přísadové prvky tvoří se železem substituční nebo intersticiální tuhé roztoky, ovšem s různým stupněm rozpustnosti. Při nižších teplotách mohou vznikat i intermediální fáze. [11]

Podle vlivu prvků na výši teploty polymorfních přeměn železa můžeme přísadové prvky rozdělit na prvky austenitotvorné a feritotvorné. [11]

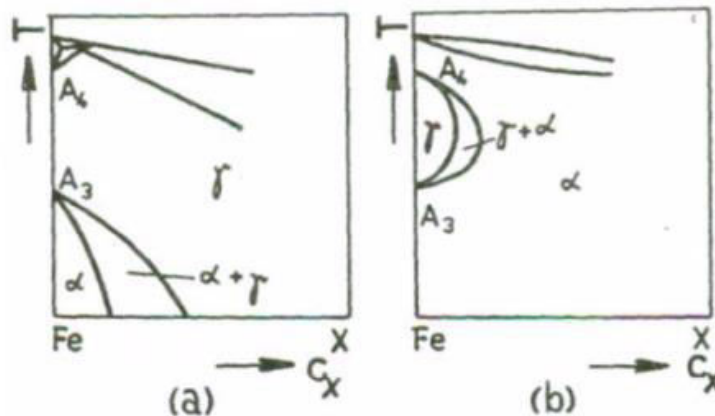
Austenitotvorné prvky

Snižují teplotu A_3 a současně zvyšují teplotu A_4 . V důsledku toho se v binárním systému železo - příslušný přísadový prvek oblast austenitu otevírá (obr.č. 13a). Při vyšších obsazích takového přísadového prvku může teplota přeměny $\gamma - \alpha$ klesnout až pod teplotu okolí a ocel si zachová austenitickou strukturu i při teplotě okolí. Takovou ocel nazýváme austenitickou. Mezi nejvýznamnější austenitotvorné prvky patří: Ni, Mn, Co, C, N.

Feritotvorné prvky

Naopak zvyšují teplotu A_3 a snižují teplotu A_4 (obr. č. 13b). Při vyšších obsazeních těchto prvků se oblast γ zcela uzavře. Oceli s vyšším obsahem takového přísadového prvku neprodělávají při ohřevu polymorfni přeměnu $\alpha - \gamma$. Ferit vznikající z taveniny je stálý až do teploty okolí. Takovéto oceli nazýváme feritickými. Mezi nejvýznamnější feritotvorné prvky patří: Cr, Si, W, Mo, V, Al, Ti. [11]

Většina legujících prvků posunuje eutektický bod, eutektoidní bod a bod udávající maximální rozpustnost uhlíku v austenitu k nižšímu obsahu uhlíku. I při nižším obsahu uhlíku se tak může ve struktuře oceli objevit ledeburit. [11]



Obr.č. 13 - Schéma rovnovážného diagramu
(a) železo - austenitotvorný prvek; (b) železo - feritotvorný prvek [11]

4.3 Vliv prvků na oduhličení oceli

Nikl

Nikl se koncentruje na rozhraní povrch-kov a přestože povrch nemusí být značně ovlivněn, rozpustnost uhlíku v povrchových vrstvách může být snížena, čímž dojde k omezení difúze uhlíku směrem ven a tím se snižuje hloubka oduhličení. [22]

Mangan

Měřitelná míra oduhličení není téměř ovlivněna a jakýkoliv vliv případného oduhličení bude omezen na dopad aktivity uhlíku a koeficient difúze. Vzhledem k tomu, že mangan je vylučován v povrchových vrstvách kovu, může být nicméně tento vliv (dopad) pouze nepatrný. [22]

Křemík

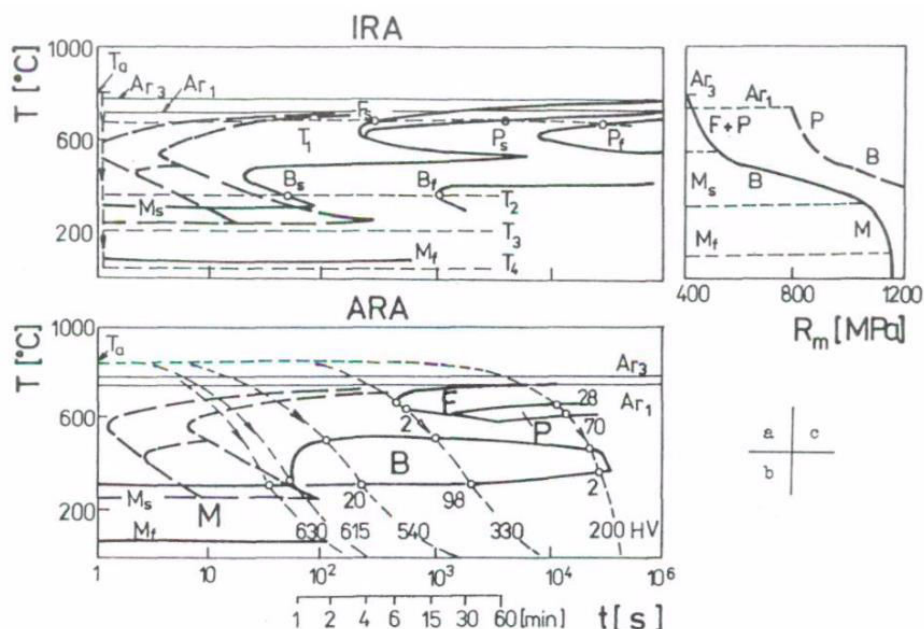
Křemík také zvyšuje aktivitu uhlíku a tím zvyšuje tendenci uhlíku pronikat ven z kovu. Tedy očekávaným obecným vlivem křemíku je zvýšení oduhličení. [22]

Chrom

Tvorba stálých karbidů zavádí možnost mechanismu pomalého karbidového rozkladu. Při obvyklých teplotách a časech meziohřevu se nicméně mohou karbidy chromu zcela rozpouštět. V takovém případě by chrom způsobil snížení aktivity uhlíku v roztoku a tudíž ke snížení rychlosti migrace na povrch. [22]

5. Rozpad austenitu

Rozpadem austenitu rozumíme jeho přeměnu při ochlazování na rovnovážné strukturní složky (perlit, ferit, sekundární cementit) nebo na nerovnovážné složky (bainit, martensit). Kinetiku rozpadu austenitu dělíme, podobně jako kinetiku austenitizace, na izotermický rozpad austenitu (IRA) nebo anizotermický rozpad austenitu (ARA). Při IRA je slitina předem austenitizovaná na teplotě T a prudce se ochladí na určitou teplotu nižší než Ar_3 resp. nebo, při níž dochází k přeměně v závislosti na času. ARA je charakterizován plynulým ochlazováním určitou rychlostí. Příslušné transformační diagramy jsou na obr. č. 14. Rovnovážné strukturní složky vznikají nad teplotou asi $550\text{ }^\circ\text{C}$, a to jak izotermický, tak i anizotermický. Nerovnovážné strukturní složky vznikají pod touto teplotou. V diagramu IRA jsou zakresleny dvojice téměř ekvidistantních čar, z nichž levá udává počátek přeměny a pravá její konec. Teplota M_s (martensit start) leží výše, teplota M_f (martensit finish) níže. Izotermická kinetika je nejrychlejší pro eutektoidní ocel při teplotě 112 asi $550\text{ }^\circ\text{C}$, kdy přeměna austenitu na perlit je ukončena za několik sekund. Při vyšších teplotách (např. při T_1) probíhá tato přeměna pomaleji. Při nižších teplotách, ale také nad M_s (např. při T_2) dochází k přeměně austenitu na bainit. Obě přeměny začínají po určité inkubační době. Martensit vzniká z austenitu v intervalu teplot M_s až M_f . Některé legující prvky (typicky Cr) oddělují oblast perlitické přeměny od bainitické přeměny. U podeutektoidních ocelí předchází perlitické přeměně rozpad austenitu na ferit, u nadeutektoidních ocelí předchází vznik sekundárního cementitu nebo karbidů legujících prvků. Podle obr. č. 10a se v dané podeutektoidní legované oceli začíná austenit rozpadat při teplotě T_j na ferit (bod F_s) a později na perlit (bod P_s); feritická přeměna končí v bodě P_s , perlitická přeměna končí v bodě P_f . Analogické body jsou pro bainitickou přeměnu při teplotě T_2 označeny jako B_s a B_f . Ochladíme-li prudce ocel na teplotu T_3 ležící mezi M_s a M_f , přemění se na martensit jen část austenitu. Po ochlazení na teplotu $T_4 < M_f$ je martensitická přeměna nejrozsáhlejší a podíl zbytkového austenitu minimální. [11]



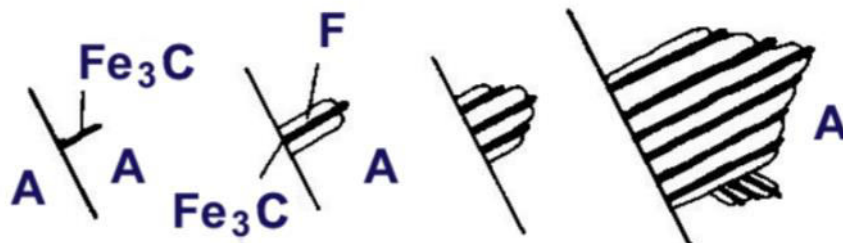
Obr. č. 14 - Diagram IRA (a) a ARA (b) pro podeutektoidní legovanou ocel (plné čáry) a pro eutektoidní uhlíkovou ocel (čárkovaně). Pevnost strukturních složek vzniklých při IRA ve výše uvedených dvou ocelích (c) [11]

V diagramu ARA mají čáry udávající počátek a konec rozpadu austenitu poněkud odlišný tvar a polohu než v diagramu IRA. S výjimkou teplot M_s a M_f lze o nich říci, že jsou posunuty k nižším teplotám a delším časům. Na obr. č. 10b je zakresleno pět rychlostí ochlazování a u jejich průsečíků s křivkami konce různých přeměn austenitu jsou připsána čísla, označující podíl nové strukturní složky. Tak např. při vyznačené nejmenší rychlosti ochlazování vznikne v uvažované podeutektoidní legované oceli 28 obj. % feritu, 70 % perlitu a 2 % bainitu; výsledná směs strukturních složek má tvrdost 200 HV. Zvláštní význam mají následující dvě rychlosti ochlazování. První z nich odděluje rychlosti ochlazování, při kterých vznikají rovnovážné strukturní složky od ostatních větších rychlostí, při nichž vznikají pouze nerovnovážné strukturní složky (bainit a martensit), tedy ty, které jsou nutné k zakalení oceli. Tuto rychlost ochlazování nazýváme dolní mezní rychlostí zakalení a na obr. č. 10b je to t_a , které se zleva dotýká oblasti feritické přeměny a přibližně dává tvrdost 330 HV. V eutektoidní oceli a v jiných ocelích, ve kterých bainitické přeměně nevyhnutelně předchází perlitická přeměna, bývá dolní mezní rychlost zakalení definována na základě nejvyššího přípustného podílu perlitu (obvykle 50 obj. %). Horní mezní rychlost zakalení je taková nejmenší ochlazovací rychlost, od níž dochází pouze k martensitické přeměně, takže se v diagramu ARA zleva dotýká oblasti bainitické přeměny. Mechanismus rozpadu austenitu je velmi rozmanitý a závisí na charakteru růstových dějů, které mohou být tepelně aktivované s přenosem hmoty na dlouhé vzdálenosti (při vzniku feritu, perlitu, sekundárního cementitu) nebo s přenosem hmoty na krátké vzdálenosti (při vzniku bainitu), růst martensitu je dokonce atermální (bezteplotní). [11]

6. Přeměny při ochlazování

6.1 Perlitická přeměna

Jedná se o eutektoidní rozpad přesyceného tuhého roztoku. Přeměna je plně difuzní. Při ochlazování oceli o eutektoidním složení se austenit rozpadá na eutektoidní směs feritu a cementitu (tj. perlit) [2]. Začátek perlitické přeměny je dán heterogenní nukleací. Nukleace vedoucí fáze probíhá přednostně na hranicích austenitických zrn a méně často na rozhraní austenit – minoritní fáze. Nejpomaleji tak probíhá u čistých hrubozrnných ocelí a nejrychleji u znečištěných jemnozrnných ocelí. Perlitická přeměna nemá vedoucí fázi. Zárodky feritu a cementitu vznikají zároveň nezávisle na sobě. Na obr. č. 15 je znázorněna nukleace a růst nodulí. [2, 6, 11]



Obr. č. 15- Schéma nukleace a růst perlitu [9]

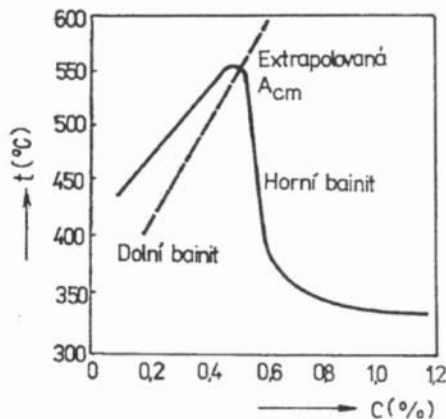
V uhlíkových ocelích je rychlost růstu perlitu určena difuzí uhlíku. V ocelích legovaných je rychlost přeměny řízena difuzní rychlostí železa a substitučních přísad. Legující prvky, s výjimkou hliníku a kobaltu, rychlost perlitické přeměny snižují. To je způsobeno vyššími hodnotami difuzivit uhlíku v porovnání se substitučními prvky [6].

U ocelí můžeme nejčastěji pozorovat perlit s lamelární morfologií a ta se může dále dělit na hrubý lamelární perlit a jemný lamelární perlit. Jemný lamelární perlit získáme při větším přechlazení nebo s rostoucí rychlostí ochlazování, kdy se zvětšuje počet zárodků a tím dochází ke zmenšení mezilamelární vzdálenosti perlitu. Perlit se může vyskytovat i jako perlit zrnitý (globulární). V něm se cementit vyskytuje ve tvaru částic globulárního tvaru. Vzniká velmi pomalým ochlazováním nebo sferoidizačním žiháním. U slitinových ocelí se může vyskytovat i perlit s vláknitou morfologií [2].

6.2 Bainitická přeměna

Základem bainitické přeměny je přeměna austenitu na ferit vzniklý smykovým mechanismem. Vznik a růst bainitického feritu doprovází popř. předchází difuze uhlíku a následná precipitace cementitu nebo méně stabilního karbidu. Jedná se tedy o přeměnu s částečnou difuzí. Bainit je směs přesyceného feritu a karbidů nelamelárního typu. [2, 8]

Přechod mezi strukturou jemného lamelárního perlitu a bainitu je u uhlíkových ocelí plynulý, protože se teplotní oblast perlitické a bainitické přeměny částečně překrývají. Teplota přeměny a rychlost ochlazování přes bainitickou oblast mají velký vliv na morfologii bainitické struktury. S transformační teplotou i chemickým složením se podstatně mění mechanismus tvorby bainitu i jeho morfologie, proto se obvykle rozděluje na dolní a horní bainit. [2, 8]



Obr. č. 16 - Vliv obsahu uhlíku na teplotní oblasti výskytu horního a dolního bainitu [11]



Obr. č. 17 - Struktura horního a dolního bainitu [7]

6.2.1 Horní bainit

V nízkouhlíkových ocelích s obsahem uhlíku asi do 0,3 hm. % nejdříve vznikají feritické laťky, které vznikají převážně na hranicích zrn, nebo méně často uvnitř zrn austenitu.

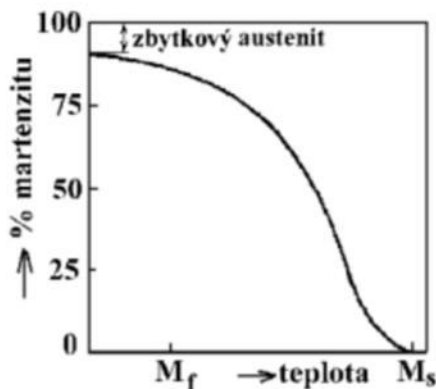
Bainitický ferit roste přednostně do délky, růst do šířky je značně omezen. Uhlík z austenitu zůstávajícího mezi feritickými laťkami je difúzně přerozdělován, dostává se na mezifázové rozhraní ferit-austenit, tam následně precipituje a vzniká cementit. Zvýšený obsah uhlíku ve středně a vysokouhlíkových ocelích usnadňuje nukleaci cementitu [2, 7, 12].

6.2.1 Dolní bainit

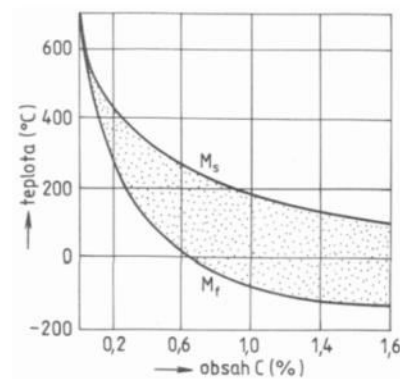
Vzniká při nižších teplotách a je tvořen tenkými deskami bainitického feritu přesyceného uhlíkem s precipitací karbidů, ke které dochází převážně uvnitř desek feritické matrice. Bainitický ferit vzniká smykem. Teplota je nízká, nejsou vytvořeny podmínky pro difuzi, a proto není bainitický ferit schopen vytlačit uhlík. Mikrostruktura dolního bainitu je jemná a vlastnostmi se blíží martenzitu [7, 12].

6.3 Martenzitická přeměna

Martenzitická přeměna austenitu je bezdifuzní smyková přeměna, při které se vytvářejí desky, jehlice a disky. Austenit je přechlazen do oblasti tak nízkých teplot, že již není možná difuze jak substitučních, tak intersticiálních prvků. Martenzit je nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Pro jeho vznik je nutné ochladit austenitovanou ocel pod teplotu M_s (martenzit start), a to kritickou rychlostí V_k , což je nejmenší rychlost, při které nedojde k zahájení perlitické nebo bainitické přeměny. Její hodnota je závislá na složení a struktuře austenitu a může dosahovat hodnot až kolem $1000 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$. Přeměna probíhá až do teploty M_f (martenzit finish). Při dalším ochlazování pod tuto teplotu již přeměna neprobíhá, a to i přes to, že ve struktuře zůstává určitý podíl zbytkového austenitu. Obr. č. 18 znázorňuje martenzitickou křivku oceli, která udává závislost množství martenzitu na teplotě. Na množství zbytkového austenitu má vliv stabilita austenitu a velikost austenitického zrna. Nezanedbatelný vliv má obsah C a také přísadové prvky, které ovlivňují hodnoty teplot M_s a M_f . Uhlík a většina legur (pokud jsou rozpuštěné v austenitu) tyto teploty snižují (viz obr. č. 19) [2, 8, 9].



Obr. č. 18 - Schéma martenzitické křivky oceli [8]

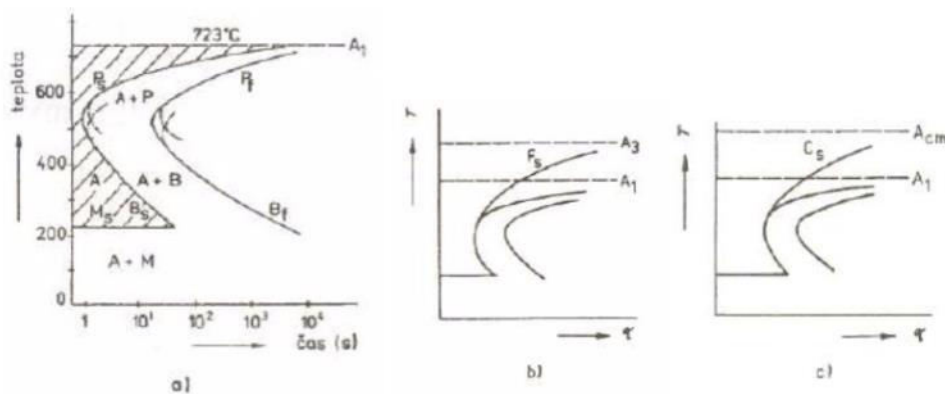


Obr. č. 19 - Vliv uhlíku v austenitu na teploty M_s a M_f uhlíkových ocelí [4]

7. Transformační diagramy ocelí IRA a ARA

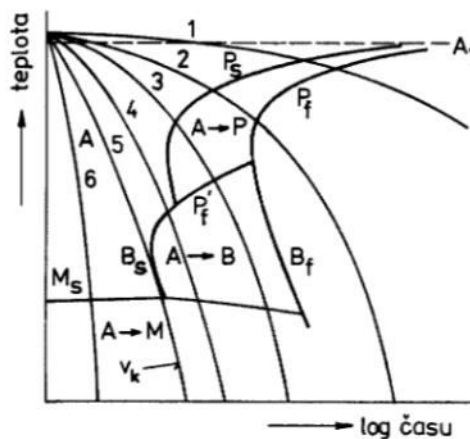
Diagramy IRA (izotermický rozpad austenitu) a ARA (anizotermický rozpad austenitu) slouží k popisu průběhu přeměny podchlazeného austenitu a poskytují nám informace o vlivu teploty a času na průběh přeměny. Jejich znalost má význam při tepelném zpracování, neboť austenit prodělává většinou více proměn. Především při větších rozměrech se mohou lišit rychlosti ochlazování ve středových oblastech a na povrchu materiálů. Každý konkrétní diagram odpovídá určitému typu oceli (dle chemického složení) a podmínkám austenitizace (velikost austenitického zrna). Tvar těchto diagramů ovlivňují legující prvky.

Diagramy IRA slouží pro izotermický rozpad austenitu. Udávají dobu přeměny γ za izotermních podmínek ($T = \text{konst.}$). Diagramy IRA mají praktický význam při izotermických pochodech tepelného zpracování (izotermické žhání a izotermické zušlechťování). Na obr. č. 20 je uveden příklad IRA diagramů pro a) eutektoidní ocel, b) podeutektoidní ocel a c) nadeutektoidní ocel. [8]



Obr. č. 20 - IRA digramy, a) eutektoidní, b) podeutektoidní a c) nadeutektoidní ocel [8]

Diagramy ARA slouží pro anizotermický rozpad austenitu. Udávají začátky a konce přeměn u plynulého ochlazování austenitu při různých rychlostech ochlazování. ARA diagramy jsou složitější než IRA diagramy, protože výsledná struktura je složená z více produktů přeměn, které vznikají při různých teplotách v procesu ochlazování. Příklad ARA diagramu dokumentuje obr. č. 21. [8]



Obr. č. 21 - Schematický ARA diagram[8]

Fázové transformace představují kvalitativní změny v atomárním uspořádání jednotlivých fází termodynamické soustavy. Dochází k nim v případě, že je vlivem změny vnějších podmínek porušena termodynamická rovnováha soustavy. Přehled fázových přeměn je uveden v tab. č. 3. Vdaném momentě jsou ovšem důležité pouze přeměny (transformace) podchlazeného austenitu. V důsledku polymorfie se při ochlazení přeměňuje Fe_γ (FCC kubická plošně středěná mřížka) v modifikaci Fe_α (kubická prostorově centrovaná mřížka BCC). Přeměna souvisí s výraznou objemovou změnou a také se značnou změnou rozpustnosti uhlíku v odpovídajících tuhých roztocích. [8]

Tab. č. 3 - Přehled fázových transformací [8]

změny skupenství:	přeměny v tuhém stavu:
Krystalizace	polymorfnní (alotropní) přeměny
Tavení	rozpad přesyceného tuhého roztoku
	přeměny podchlazeného austenitu

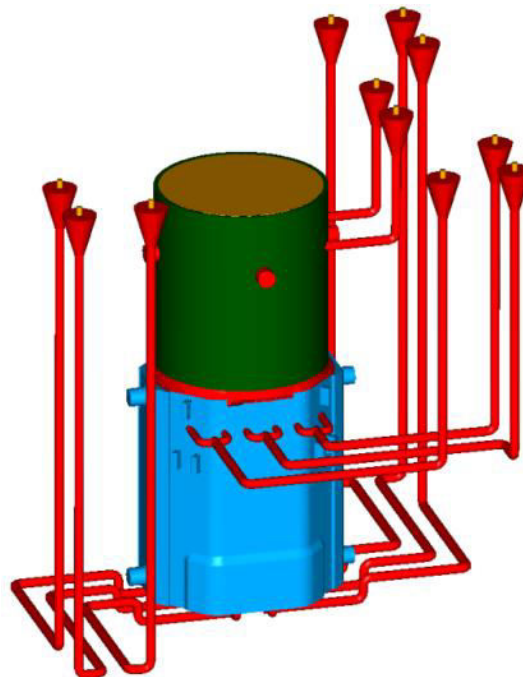
8. Odlitek spodního beranu HR18101 a HR17060.

Odlitek spodního beranu byl odlit z oceli GS20MnNi5 (obr. č. 22) . Surová hmotnost odlitku č. HR18101 byla 196 000 kg. V případě odlitku č. HR 17060 byla surová hmotnost 190 000 kg . Na obrázku č. 23 je znázorněna vtoková soustava pro dané odlitky.

Z důvodu velkého objemu materiálu byla tavba v obou případech rozdělena na dvě. V tabulce č. 3 je vidět výsledné chemické složení taveb pro odlitek č. 18101. V tabulce č. 4 pak výsledné chemické složení taveb pro odlitek č. 17060.



Obr. č. 22 - Surový odlitek spodního beranu



Obr. č. 23 - Vtoková soustava

8.1 Chemické ložení taveb

Odlitek č. 18101

Č. tavby	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu
1.	0,20	1,35	0,35	0,007	0,002	0,17	0,62	0,07	0,006	0,027	0,21
2.	0,18	1,37	0,35	0,007	0,003	0,18	0,62	0,05	0,006	0,027	0,21

Tab.č. 4 - Chemické složení taveb pro odlitek č. 18101

Odlitek č. 17060

Č. tavby	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu
1.	0,21	1,33	0,36	0,007	0,002	0,29	0,56	0,06	0,01	0,026	0,21
2.	0,25	1,34	0,35	0,010	0,005	0,18	0,56	0,06	0,01	0,018	0,23

Tab. č. 5 - Chemické složení taveb pro odlitek č. 17060

8.2 Tepelné zpracování odlitků

Režim tepelného zpracování byl rozdělen do tří fází. Grafické znázornění je zobrazeno na obr.č. 28 .

- Homogenizační (difúzní) žíhání, v jehož závěru bylo provedeno upálení nálitků
- Normalizační žíhání s následným chlazením do vody a oleje (předzušlechtění)
- Popouštění s následným ochlazením v peci

Homogenizační žíhání bylo provedeno v plynové vozové peci MAERZ P91 (obr. č. 24). Průběh tepelného zpracování byl 450°C / 6h / 650°C / 10h / 950°C / 65h pec 50°C / h - pálit nálitky. Základní specifikace pece jsou uvedeny v tabulce č. 6 .



Obr.č. 24 - Žíhací pec MAERZ P91

8.2.1 Základní parametry žíhací pece MAERZ P91

Technická specifikace	
Plynový příkon	50 m ³ /h
Počet hořáků	34
Max. výkon hořáků	350 kW
Max. teplota v peci	1050°C
Max. zátěž vozu	300 t
Vstupní tlak plynu	100 kPa
Užitný rozměr pece	11 x 6,5 x 3,7 m

Tab.č. 6 - Specifikace vozové pece MAERZ P91

Normalizační žíhání a následné popouštění bylo provedeno v elektrické vozové peci viz obr. č.25. Základní parametry el. pece jsou uvedeny v tabulce č. 7. Průběh tepelného zpracování byl 450°C / 6h / 650°C / 10h / 900°C / 60h / pec 50°C / h - následné ochlazení ve vodě / oleji.



Obr. č. 25 - Elektrická vozová pec

8.2.2 Základní parametry el. žíhací pece

Technická specifikace	
Max. příkon topení	2200 kW
Max. teplota v peci	1100°C
Provozní napětí	380 / 220 V
Provozní kmitočet	50 Hz

Tab. č. 7 - Specifikace el. žíhací pece

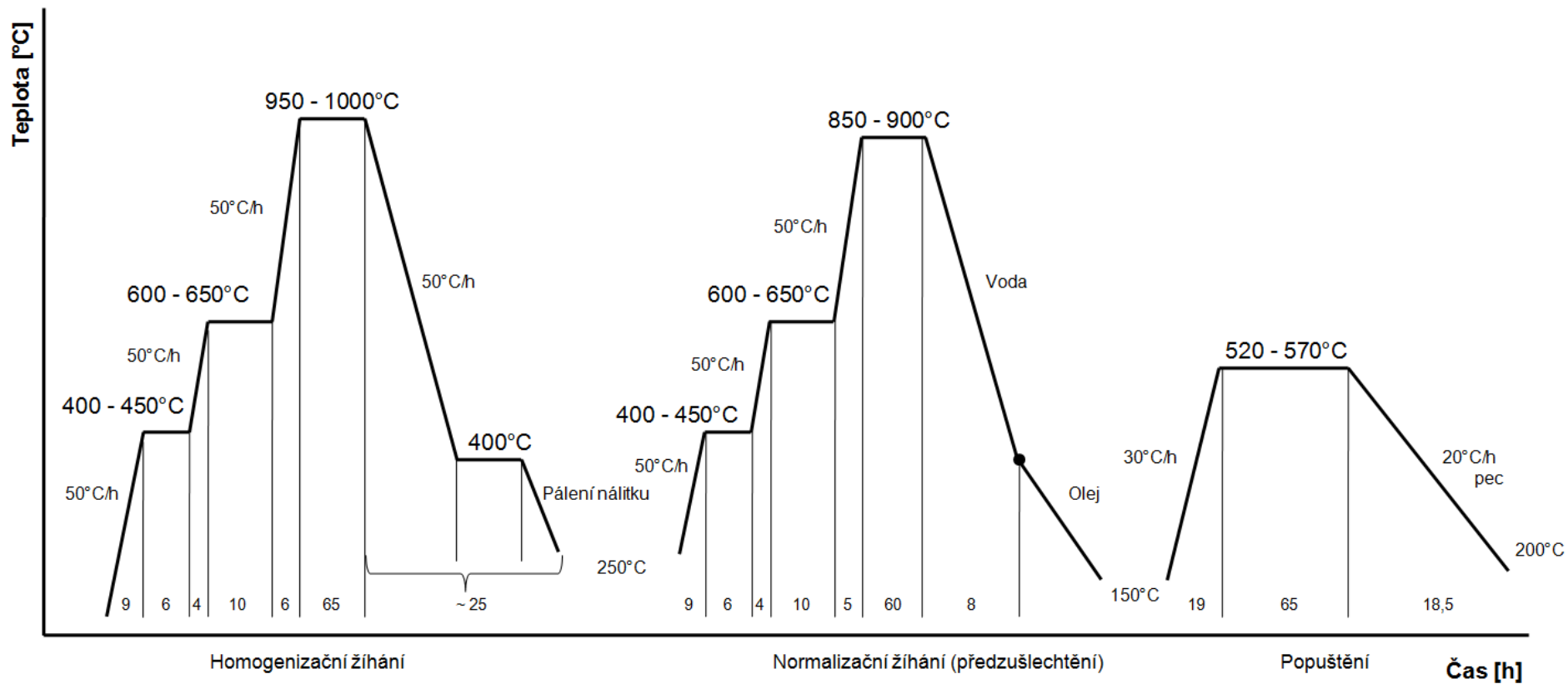
8.2.3 Kalicí prostředí

Odlity po normalizačním žhání byly ochlazovány nejprve ve vodní lázni a po sléze v oleji. Rozměry kalicích nádob byly pro obě dvě prostředí shodné a to 8 x 9 x 9,1 m. Nádoby jsou zobrazeny na obr. č. 26 a č. 27 .



Obr. č. 26 a č. 27 - Nádoby s kalicí lázní - Voda, olej

8.2.4 Grafické znázornění tepelného zpracování



Obr.č. 28 - Grafické znázornění tepelného zpracování odlitků

8.3 Přilité zkoušky

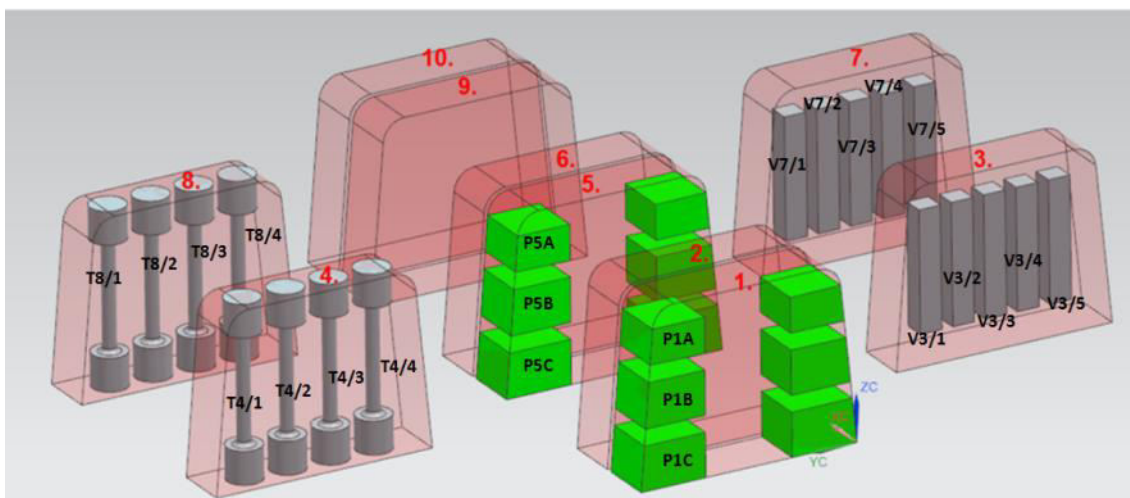
Z každého odlitku byla upálena přilítá zkouška, která byla opatřena ochranným nátěrem (Kalsen). Následně byl zkušební blok příčně rozřezán na 10 částí. Tyto jednotlivé části byly použity pro výrobu vzorků pro metalografické výbrusy, tahovou zkoušku, vrubovou houževnatost, chemické složení a přesný obsah uhlíku a síry. Rozřezané zkušební bloky jsou znázorněny na obr. č. 29 a č. 30. Rozřezový plán, kde je znázorněno na co byla jaká část byla použita je na obr. č. 31.



Obr. č. 29 - Provedení rozřezu a označení zkušebního bloku z HR17060



Obr. č. 30 - Provedení rozřezu a označení zkušebního bloku z HR18101



Obr. č. 31 - Rozřezový plán zkušebního bloku

Použití jednotlivých částí

- Část 1 a 5: metalografické výbrusy - mikrostruktura, měření mikrotvrdosti
- Část 2 a 6: chemické složení, přesný obsah uhlíku a síry
- Část 3 a 7: Vzorky pro zkoušku vrubové houževnatosti
- Část 4 a 8: Vzorky pro zkoušku tahem

Kalsen

Jedná se o ochranný nátěr vyvinutý speciálně pro zabránění oxidaci a oduhličení povrchu všech typů ocelí do teploty 1030°C. Povlak organokovu modifikovaný organobentonitem se nanáší na povrch o síle vrstvy 0,06 až 0,11 mm. K odstranění ochranné vrstvičky dochází samovolně při ochlazování kovu vlivem rozdílné tepelné roztažnosti. Vzhled chráněných dílů je po tepelném zpracování téměř kovově čistý. [21]

8.4 Oduhličení přilitých zkoušek po TZ a jejich mechanické vlastnosti

Následný rozbor je zaměřen na zjištění rozložení koncentrace uhlíku a mechanických vlastností v průřezu zkušebních bloků, které byly opatřeny ochranným nátěrem Kalsen. Výsledkem této studie je získání informací, kterým oblastem se při zhotovování zkoušek vyhnout a které oblasti jsou naopak vhodnější pro daný typ zkoušky.

8.4.1 Odlitek spodního beranu HR18101

Přilítá zkouška byla upálena z povrchu odlitku a jako zkušební blok byla rozřezána na 10 částí v podélném rozměru (viz obr. č. 32). Následně všechny vzorky byly podrobeny spektrální chemické analýze ve směru od povrchu zkušebního bloku k tělu odlitku a ve směru rovnoběžném (horizontálním) s povrchem odlitku (obr. č. 33). U vzorků č. 2 a č.6 byla pro kontrolu oduhličení použita přesná spalovací metoda Leco (výsledky jsou uvedeny v příloze práce). Výsledky analýzy reprezentují rozložení chemických prvků v jednotlivých vrstvách zkušebního bloku v závislosti na jejich segregaci při tunutí a difuzi při tepelném zpracování, pozornost je zde kladena právě na obsah uhlíku. Dle rozřezového plánu pak vzorek č. 1 a č. 5 byl použit pro získání metalografických výbrusů a zjištění hodnot mikrotvrdosti od povrchu zk. bloku. Dále vzorky č. 4 a č. 8 byly použity pro výrobu vzorků pro tahovou zkoušku. Vzorky č. 3 a č. 7 byly pak použity pro výrobu vzorků pro zkoušku rázem v ohybu.



Obr. č. 32 - Ukázka provedení chemické analýzy na vzorcích ze zk. bloku z HR18101



Obr. č. 33 - Detail značení chemických analýz na vzorcích ze zk. bloku z HR18101

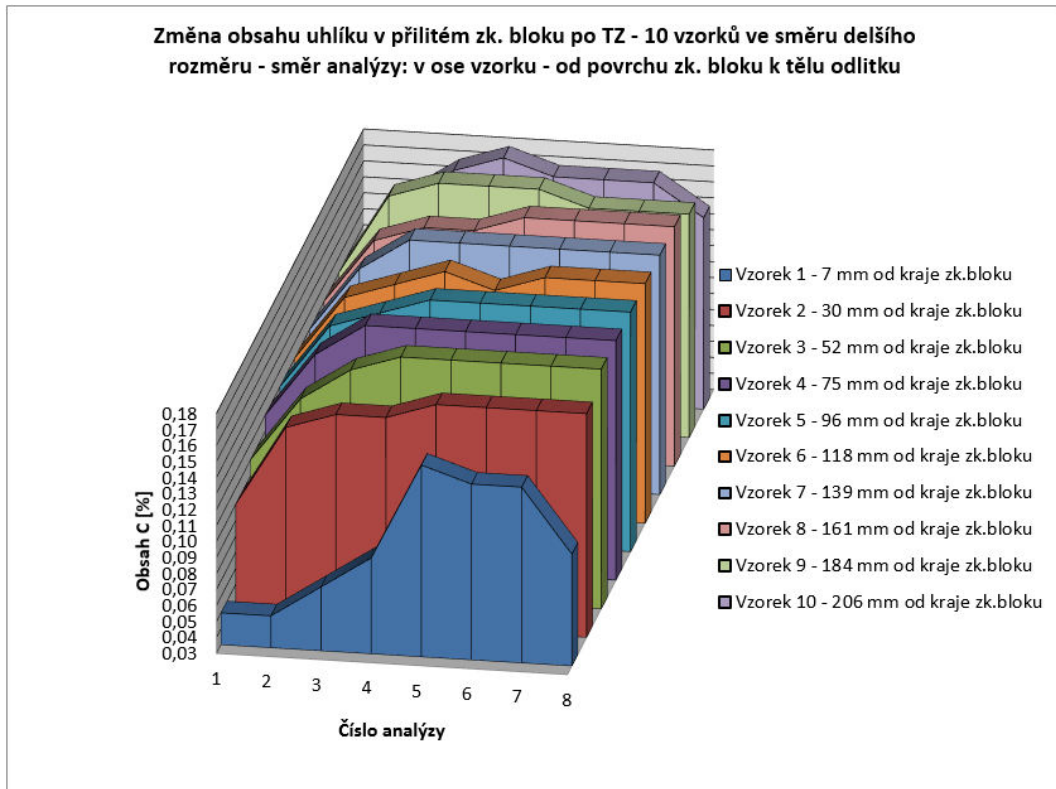
Výsledné grafy pro vzorky č. 1 - 10

Graf č. 1 - Obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.

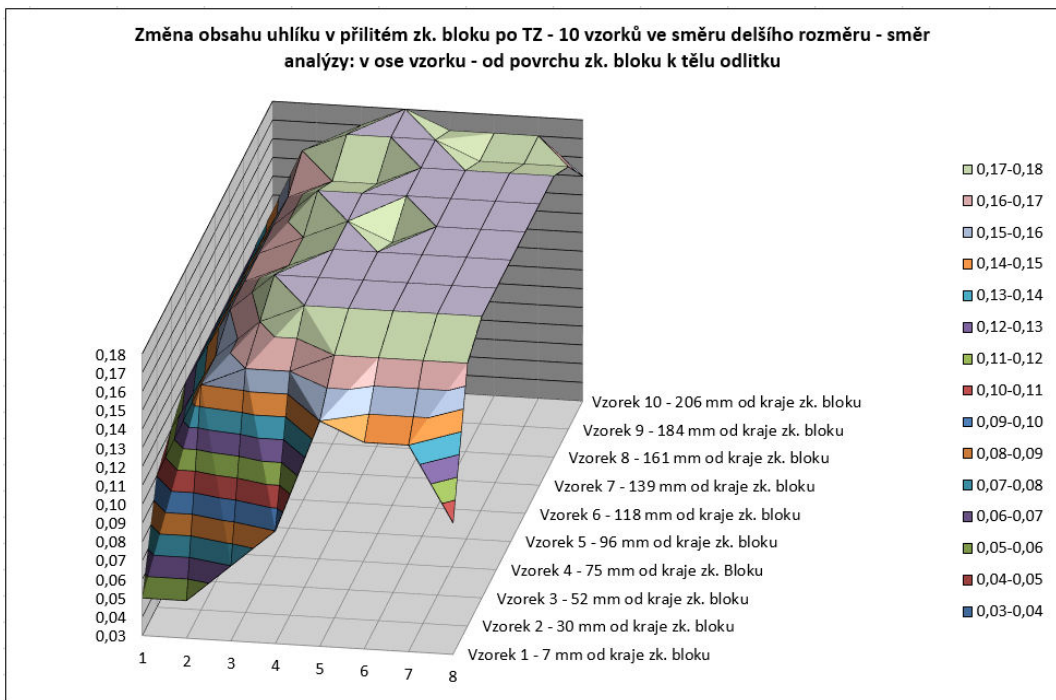
Graf č. 2 - Plošný obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.

Graf č. 3 - Obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.

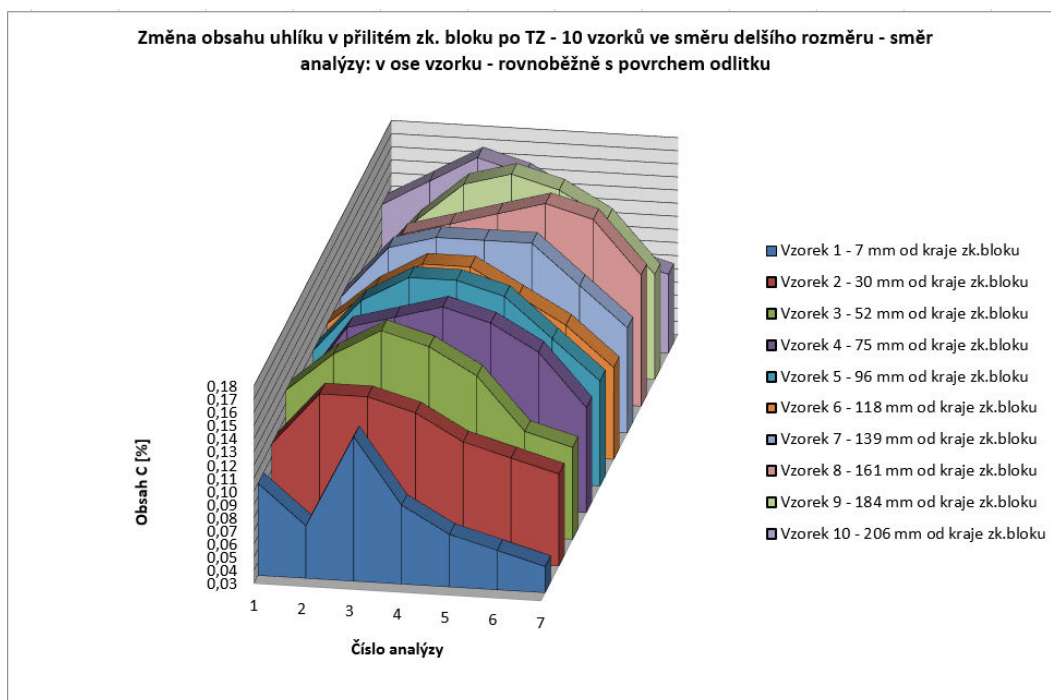
Graf č. 4 - Plošný obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.



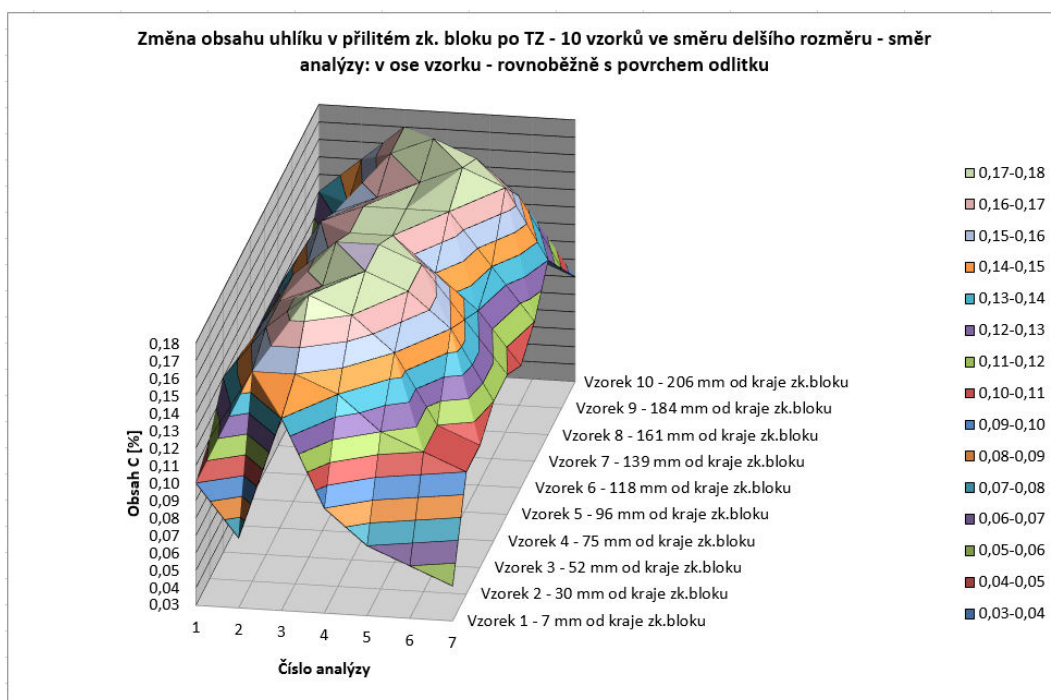
Graf č. 1 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku



Graf č. 2 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku



Graf č. 3 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku



Graf č. 4 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku

8.4.1.1 Metalografický rozbor

Pro hodnocení stavu povrchové vrstvy zkušební bloku byl proveden rozbor mikrostruktury na vybraných místech zobrazených na rozřezovém plánu, viz obr. č. 31.

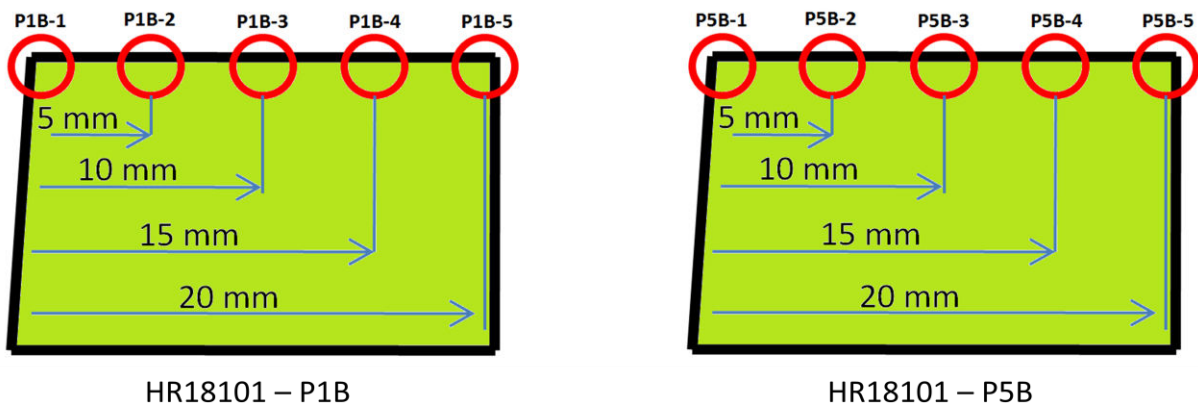
Pro vyhodnocení byly zvoleny vzorky č. 1 a č. 5 tj. kraj a prostřední část zkušební bloku. Vzorky byly rozřezány na laboratorní kotoučové pile Struers Discotom-6 (obr. č. 34) a následně vyleštěny na automatické leštičce stejnojmenné značky. Leptání výsledných částí bylo provedeno 2% roztokem leptadla Nital (kyselina dusičná na alkoholové bázi pro nelegované a nízkolegované oceli) .



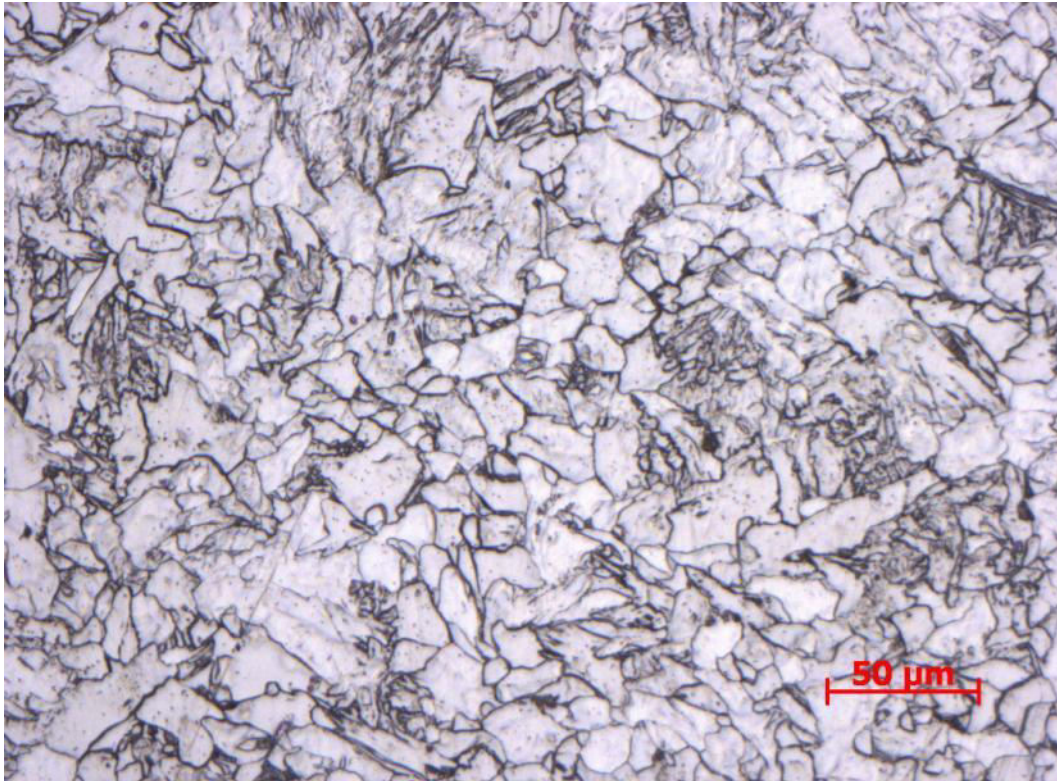
Obr. č. 34 - Laboratorní kotoučová pila Struers Discotom-6

Vyhodnocované vzorky ze zk. bloku z HR18101

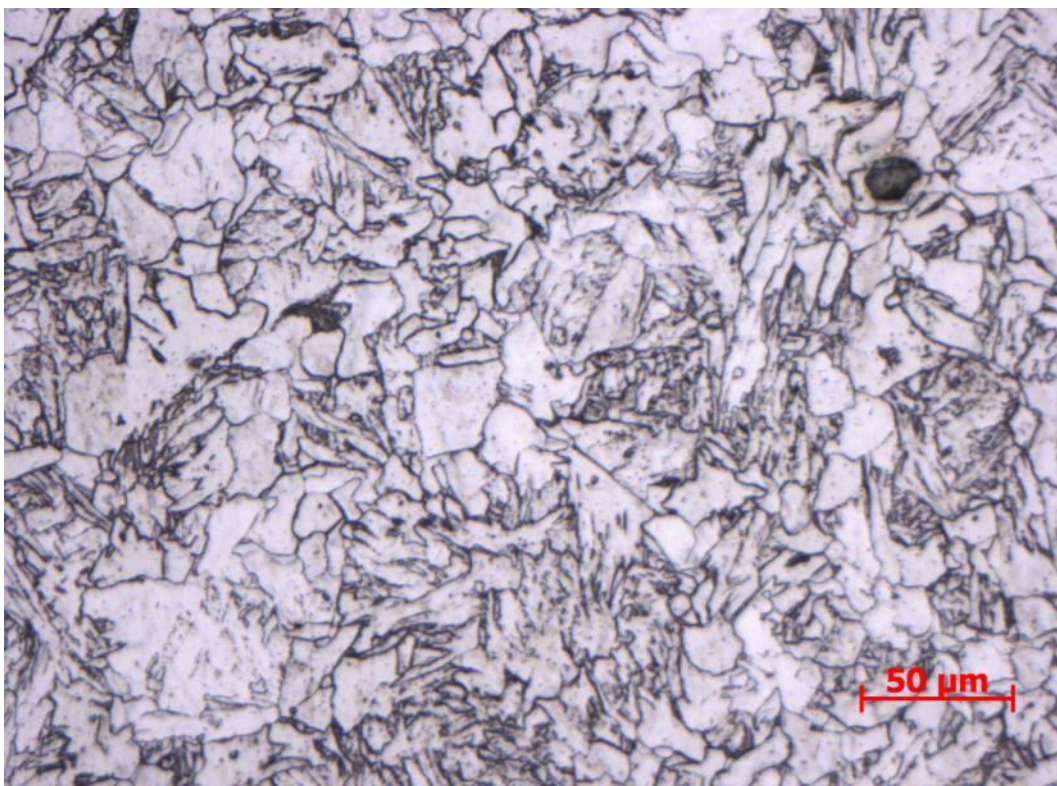
Na vybraných vzorcích P1B a P5B (krajní, prostřední část zk. bloku viz rozřezový plán obr. č. 31) byla mikrostruktura zkoumána ve čtyřech vzdálenostech od povrchu (viz obr.č. 35). Mikrostruktura pro ostatní metalografické výbrusy (P1A,P1C,P5A,P5C) je uvedena v příloze pod obr. č. 60 až obr. č. 79.



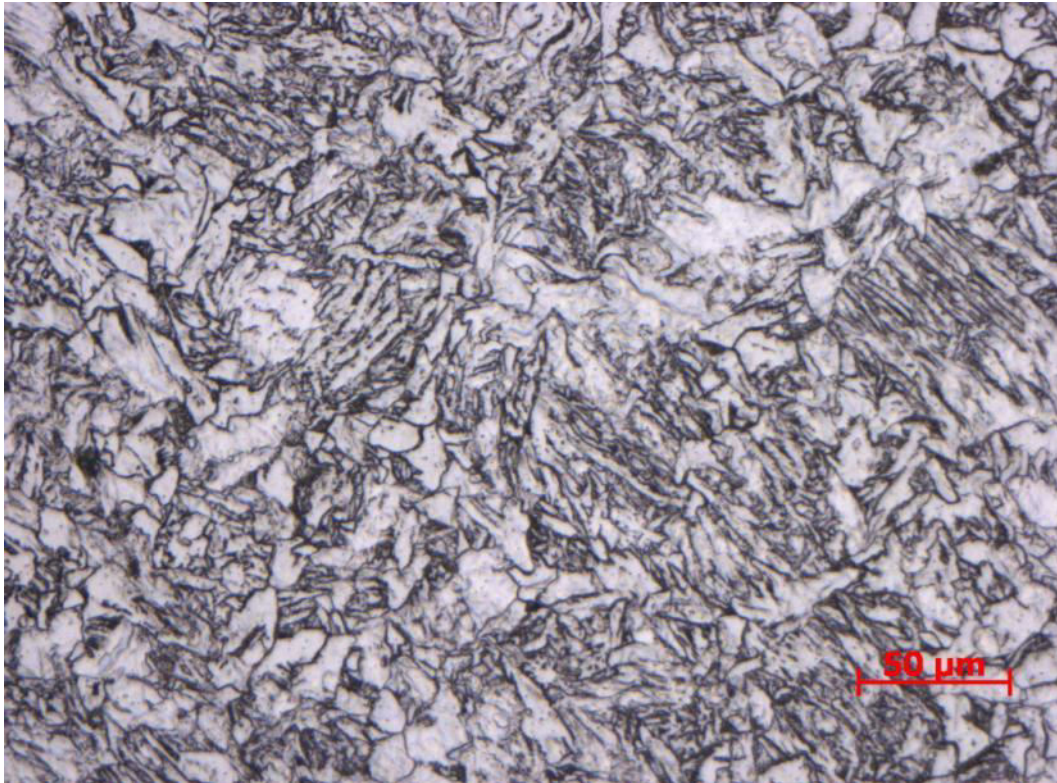
Obr. č. 35 - Schematické znázornění vzdálenosti pro pořízení mikrostruktur od povrchu zkušební vzorku (přilitého zk. bloku)



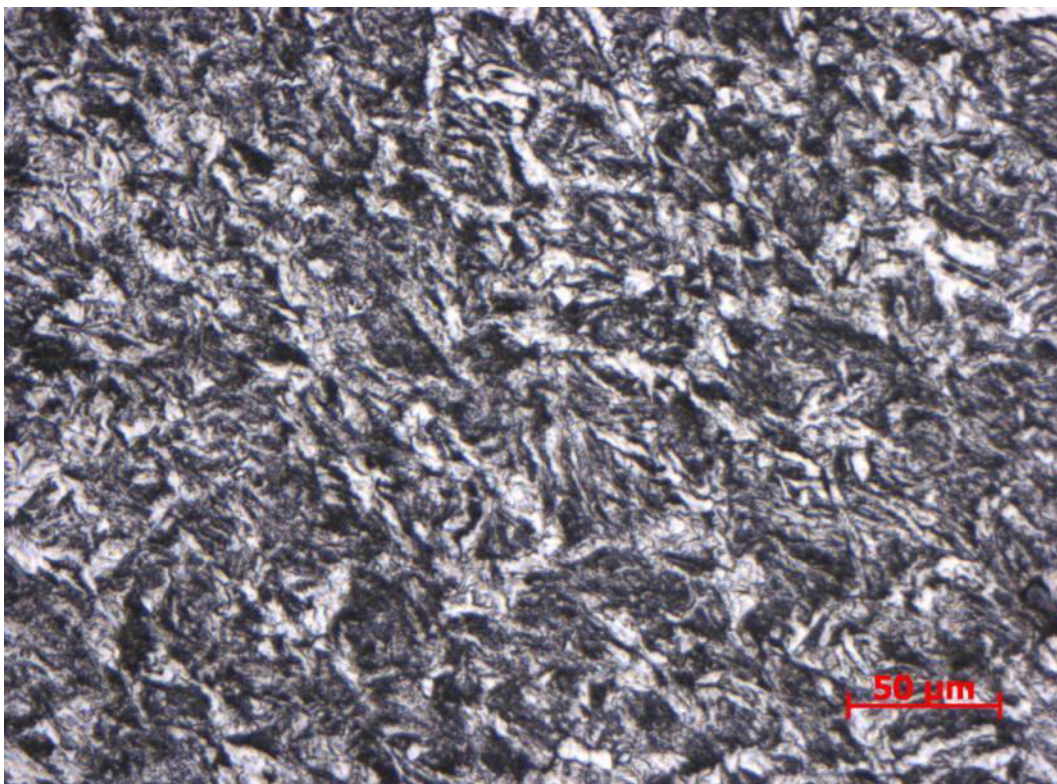
Obr. č. 36 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, ferit silně převažuje



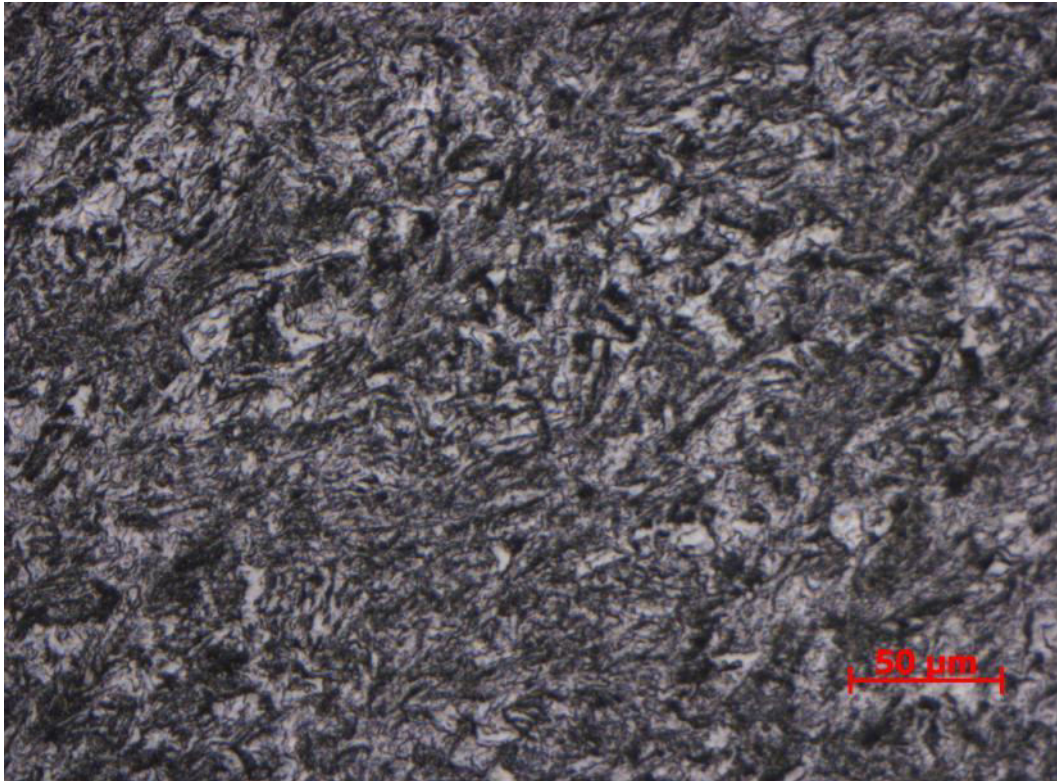
Obr. č. 37 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, ferit silně převažuje



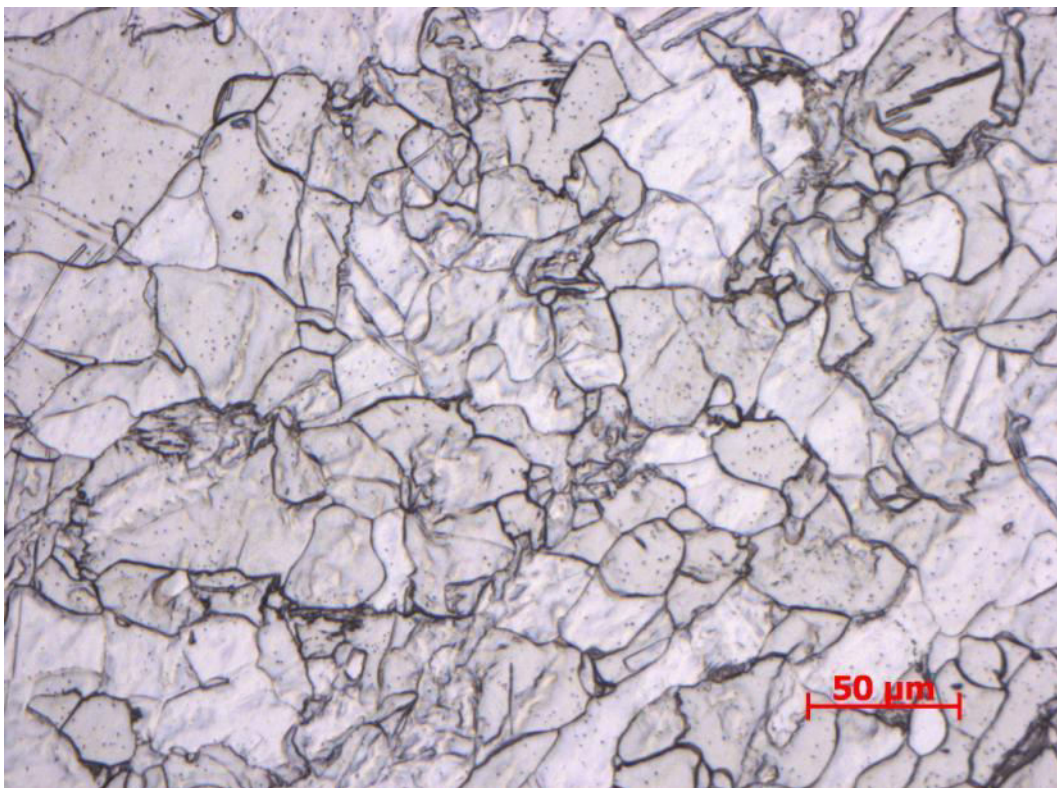
Obr. č. 38 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



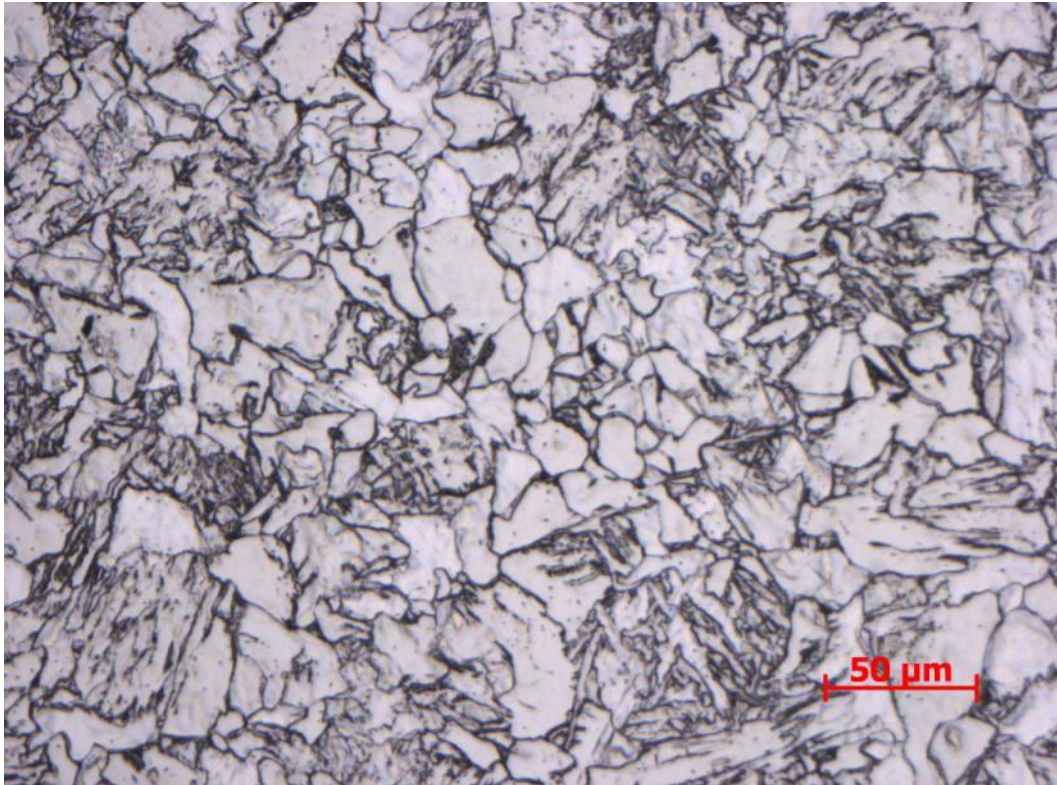
Obr. č. 39 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-4 (15 mm od povrchu zk. bloku) Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



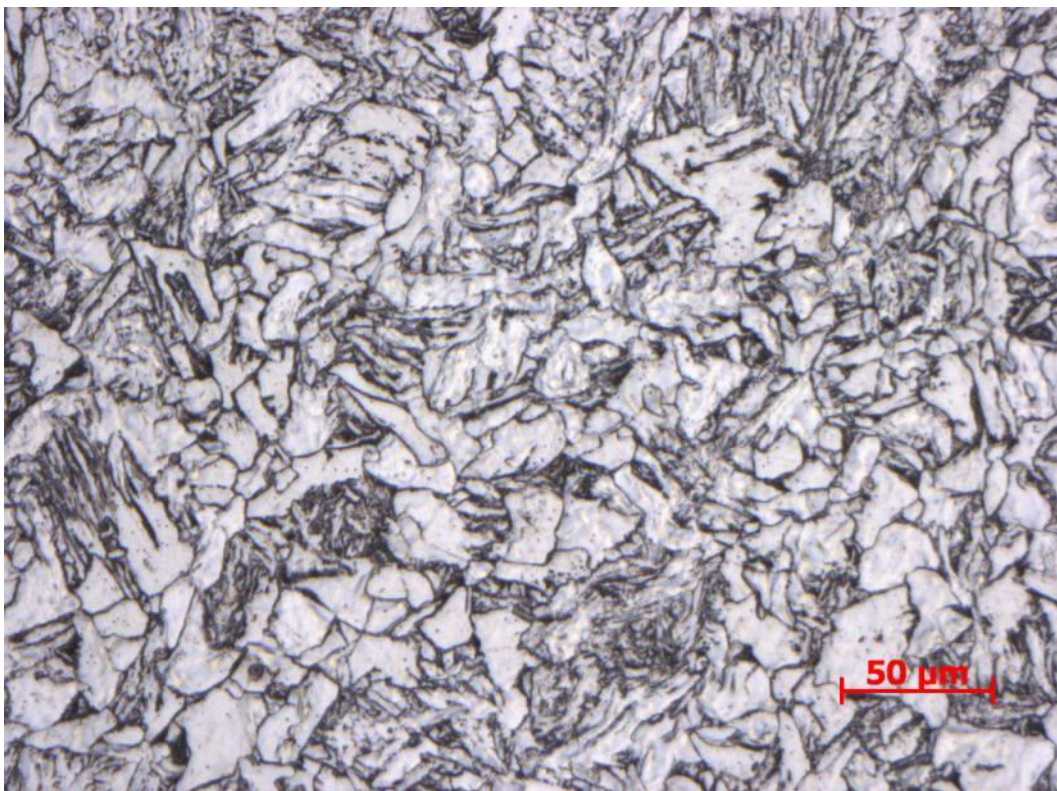
Obr. č. 40 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury



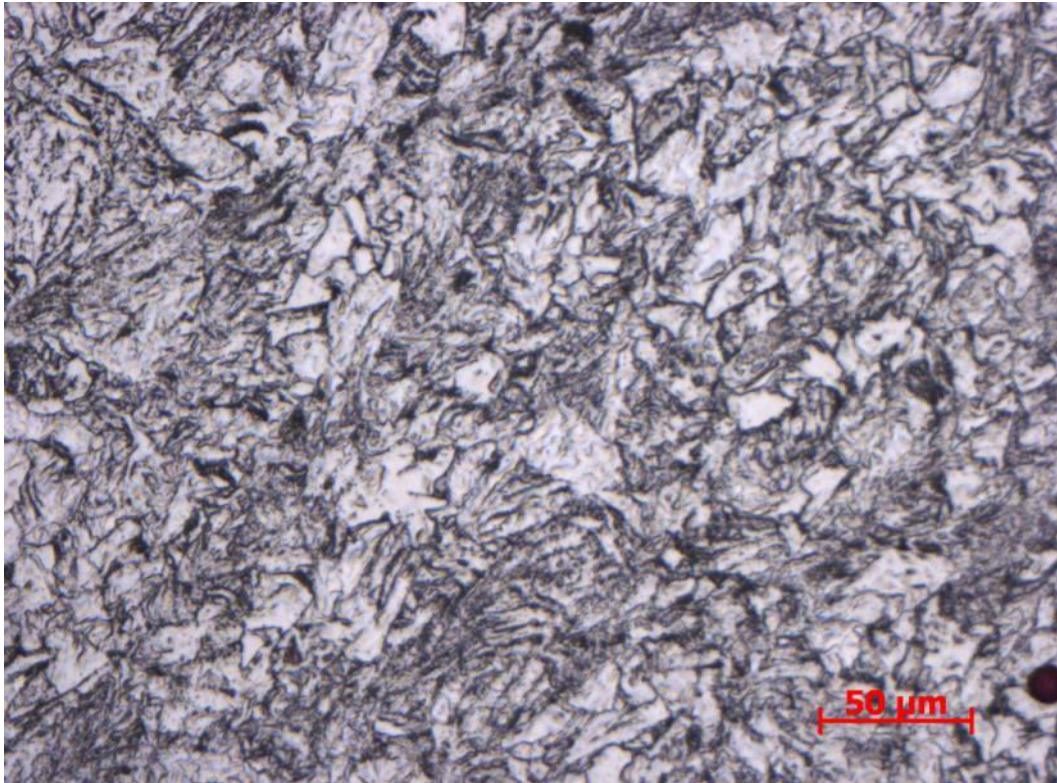
Obr. č. 41 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIB-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, ferit silně převažuje, zhrublé původní austenitické zrna



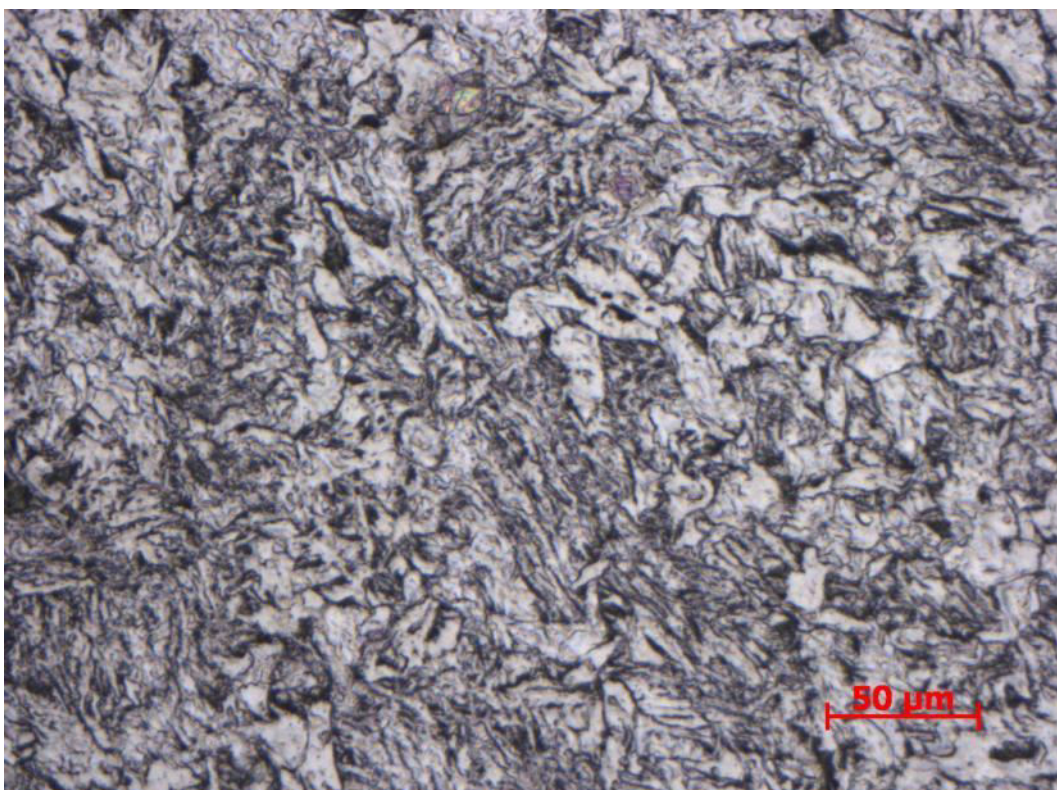
Obr. č. 42 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIB-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 43 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIB-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 44 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIB-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 45 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIB-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výraznější podíl perlitické struktury

8.4.1.2 Mechanické Vlastnosti zk. bloku z HR18101

Mechanické vlastnosti ze zkušebního bloku HR18101 jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech. Jak je patrné na rozřezovém plánu pro vzorky na tahovou zkoušku dle EN 6892-1 byly použity vzorky č. 4 a č. 8. Na zkoušku rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 byly pak použity vzorky č. 3 a č. 7.

Vzorky pro tahovou zkoušku a zkoušku rázem v ohybu.

Vzhledem k rozměrové omezenosti přilítných zkušebních bloků byly pro zkoušku tahem použity zkušební tělesa o délce $l = 60$ mm a průměrem $d = 6$ mm. Pro zkoušku rázem v ohybu byly použity zkušební vzorky s průřezem 10×10 mm a délce 55 mm s V vrubem s hloubkou 2 mm. Vzorky pro obě dvě zkoušky jsou zobrazeny na obr. č. 46.



Obr. č. 46 - Zkušební vzorky pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu

Výsledné grafy pro vzorek č. 4 a vzorek č. 3

Graf č. 5 (tab. č. 8) - Mez kluzu $R_{p0,2}$

Graf č. 6 (tab. č. 8) - Meze pevnosti R_m

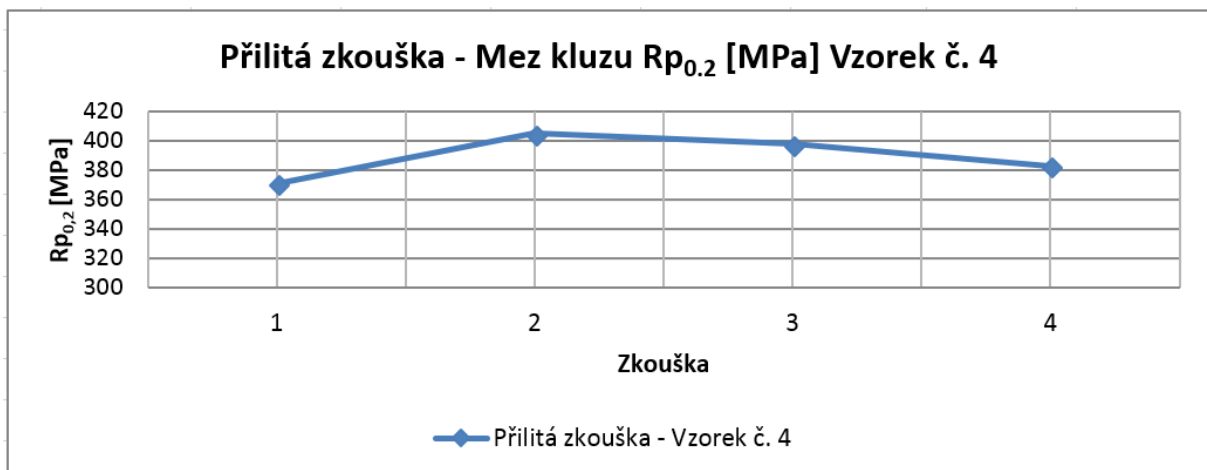
Graf č. 7 (tab. č. 8) - Tažnost A_5

Graf č. 8 (tab. č. 8) - Kontrakce Z

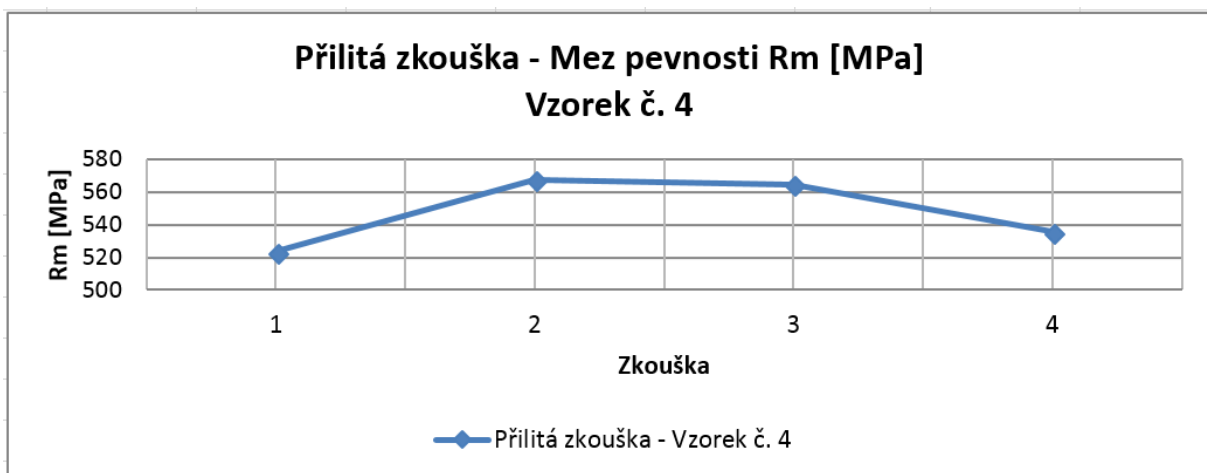
Graf č. 9 (tab. č. 9) - Vrubová houževnatost KV

Zkouška tahem dle EN 6892-1 - Vzorek č. 4				
HR 18101				
Číslo zkoušky	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A [%]	Z [%]
1	371,3	523,4	31,5	73,5
2	405	567,9	21,8	41
3	398	564,8	23,7	58,4
4	383,1	535,6	35,1	74
Min.	300	510	20	0

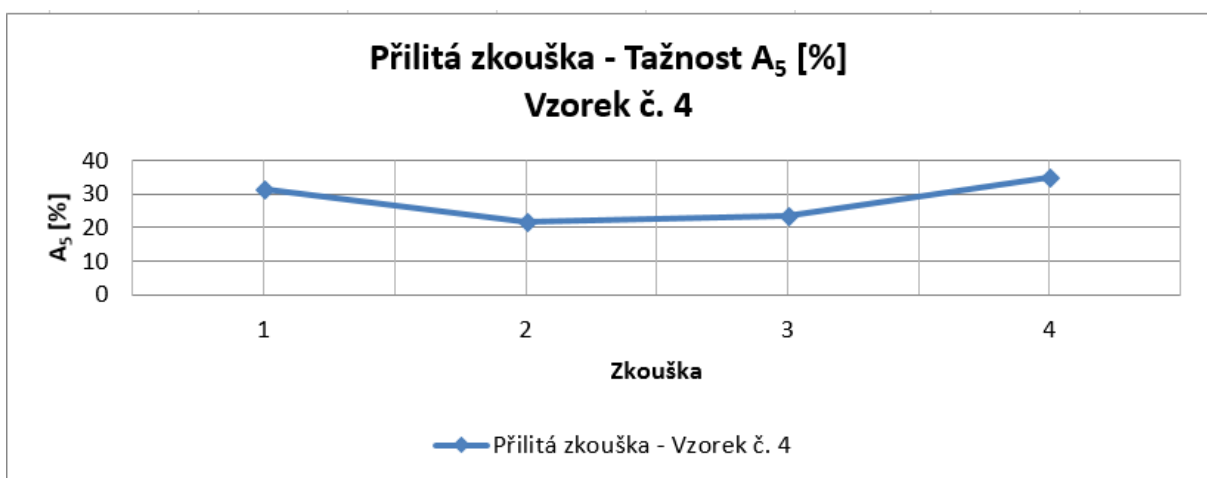
Tab. č. 8 - Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR18101



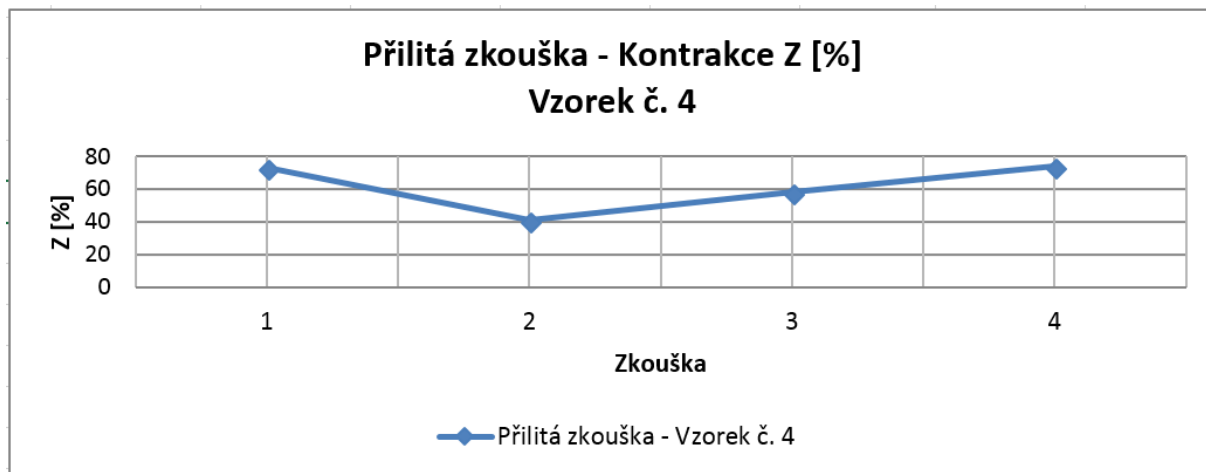
Graf č. 5 - Dosažené hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ u zk. bloku z HR18101



Graf č. 6 - Dosažené hodnoty meze pevnosti R_m u zk. bloku z HR18101



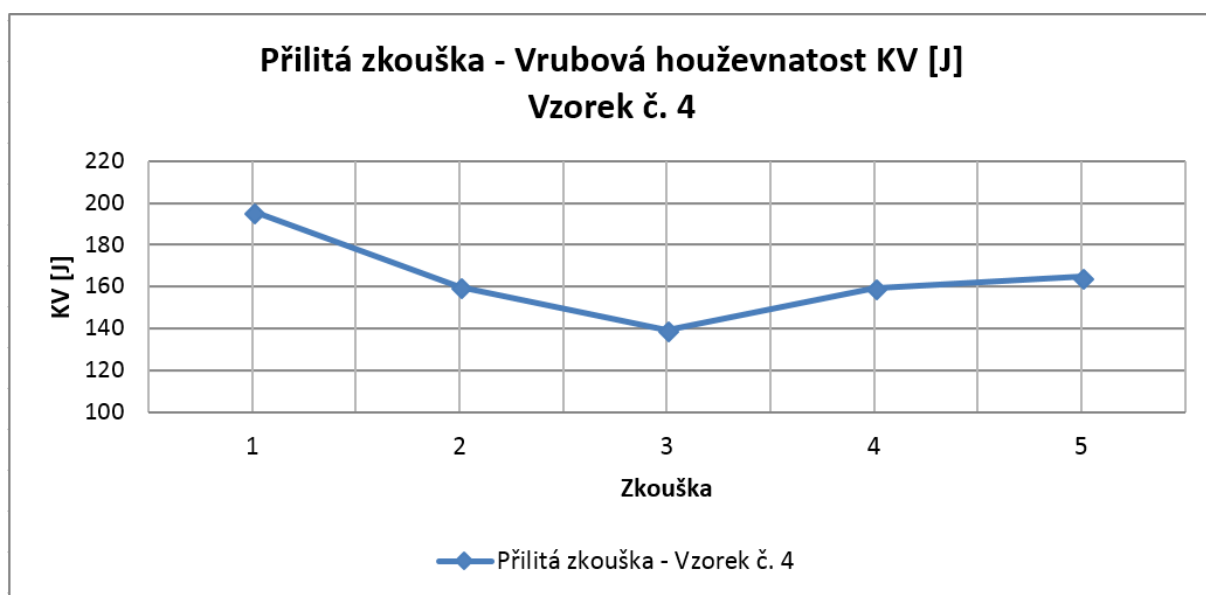
Graf č. 7 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku HR18101



Graf č. 8 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR18101

Zkouška rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 - Vzorek č. 3		
HR 18101		
Číslo zkoušky	KV [J]	KCV [J/cm ²]
1	196	245
2	160	200
3	139,4	174,3
4	159,5	199,4
5	164,9	206,1
Min.	40	40

Tab. č. 9 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR18101



Graf č. 9 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR18101

Výsledné grafy pro vzorek č. 8 a vzorek č. 7

Graf č. 10 (tab. č. 10) - Mez kluzu $R_{p0,2}$

Graf č. 11 (tab. č. 10) - Meze pevnosti R_m

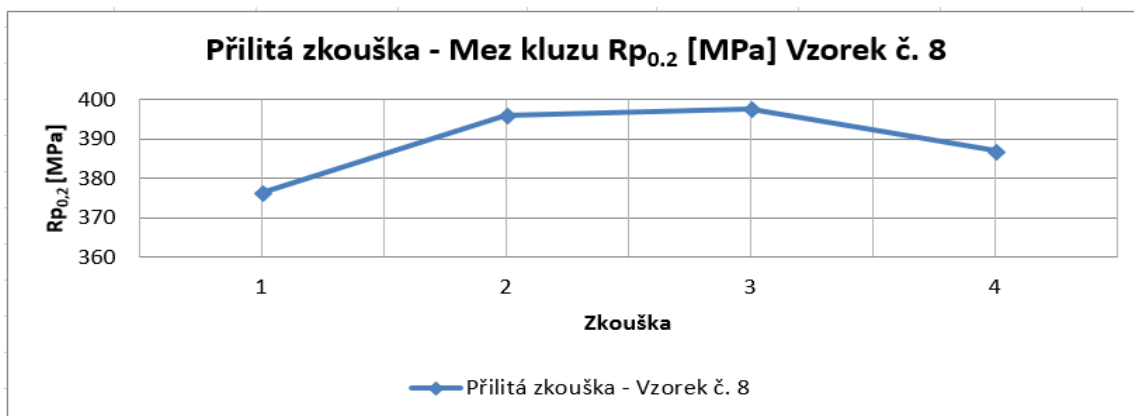
Graf č. 12 (tab. č. 10) - Tažnost A_5

Graf č. 13 (tab. č. 10) - Kontrakce Z

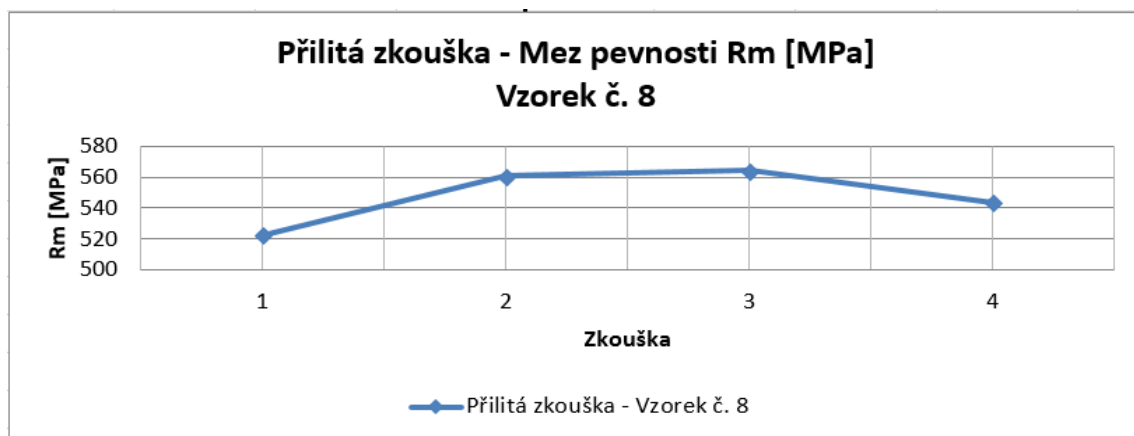
Graf č. 14 (tab. č. 11) - Vrubová houževnatost KV

Zkouška tahem dle EN 6892-1 - Vzorek č. 8				
HR 18101				
Číslo zkoušky	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A [%]	Z [%]
1	376,4	522,3	32,1	70,8
2	396	560,6	32,2	71,9
3	397,6	564,4	31,2	70,5
4	386,9	543,4	32,4	75,5
Min.	300	510	20	0

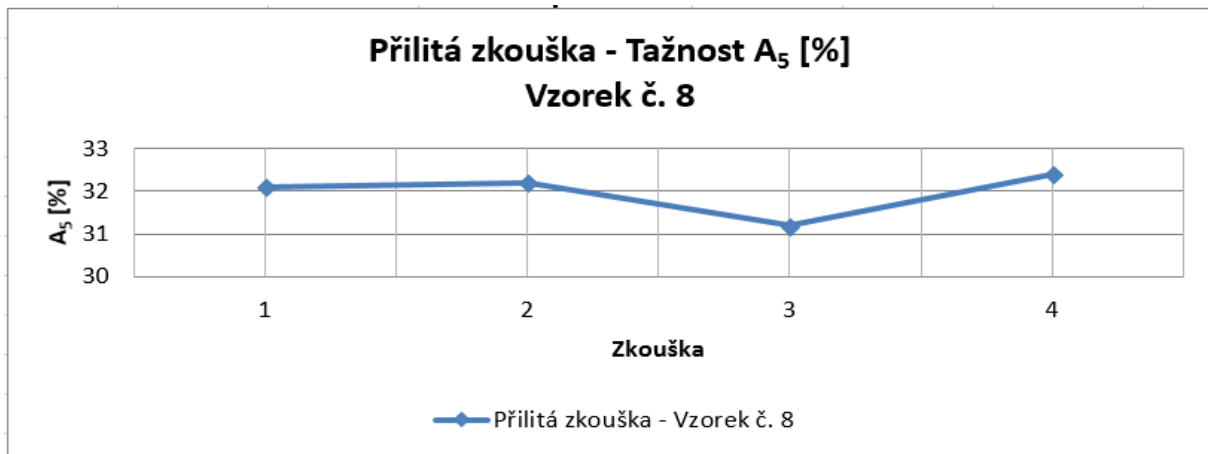
Tab. č. 10- Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR18101



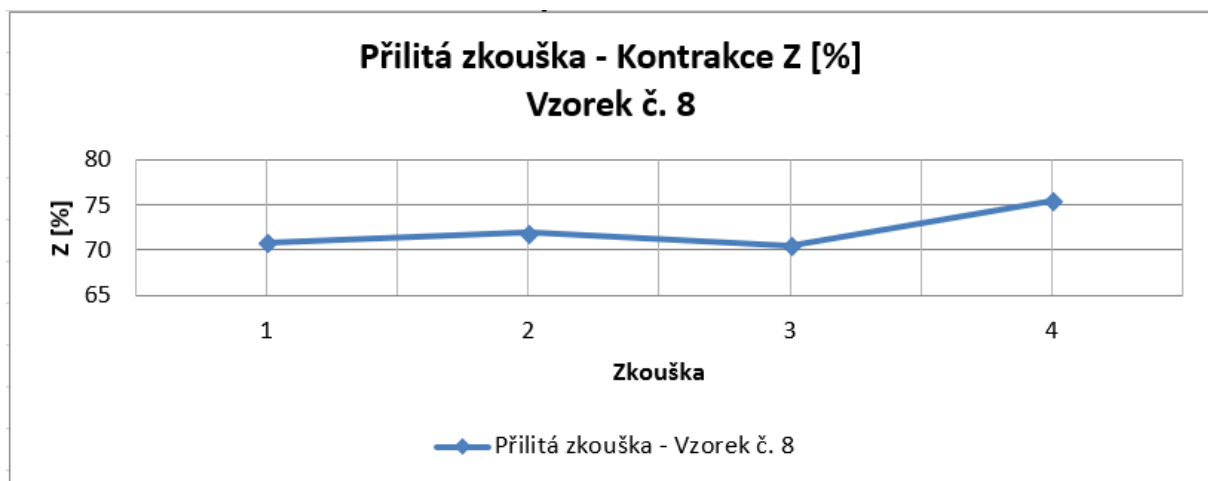
Graf č. 10 - Dosažené hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ u zk. bloku z HR18101



Graf č. 11 - Dosažené hodnoty meze pevnosti R_m u zk. bloku z HR18101



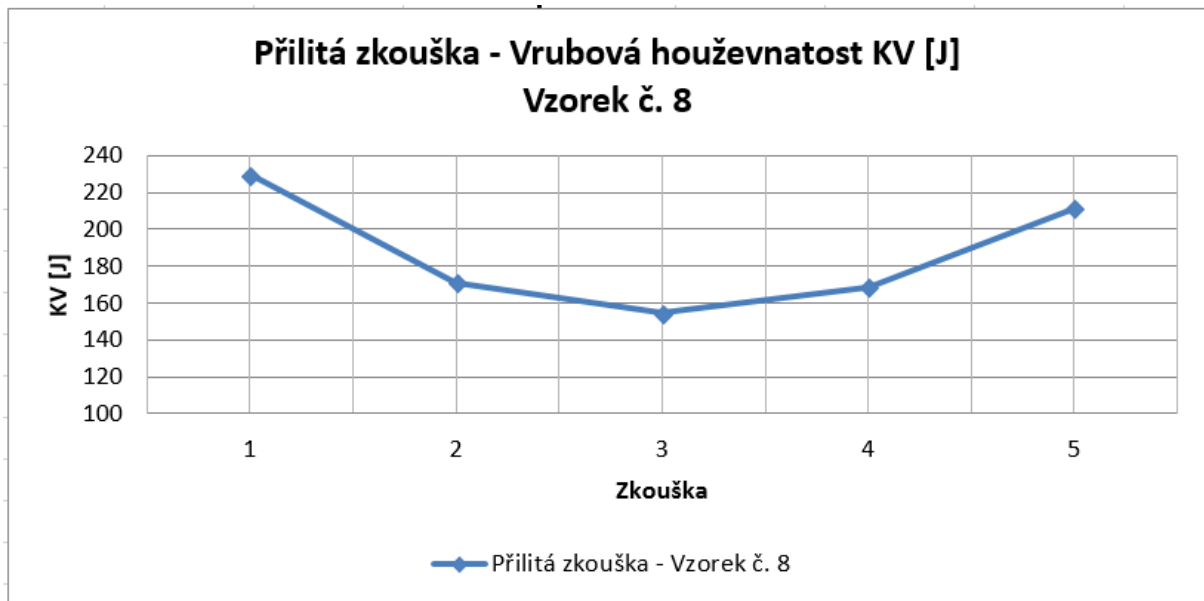
Graf č.12 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku HR18101



Graf č. 13 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR18101

Zkouška rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 - Vzorek č. 7		
HR 18101		
Číslo zkoušky	KV [J]	KCV [J/cm ²]
1	229,6	287
2	171,1	213,9
3	154,7	193,4
4	168,6	210,7
5	211,3	264,2
Min.	40	40

Tab. č. 11 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR18101

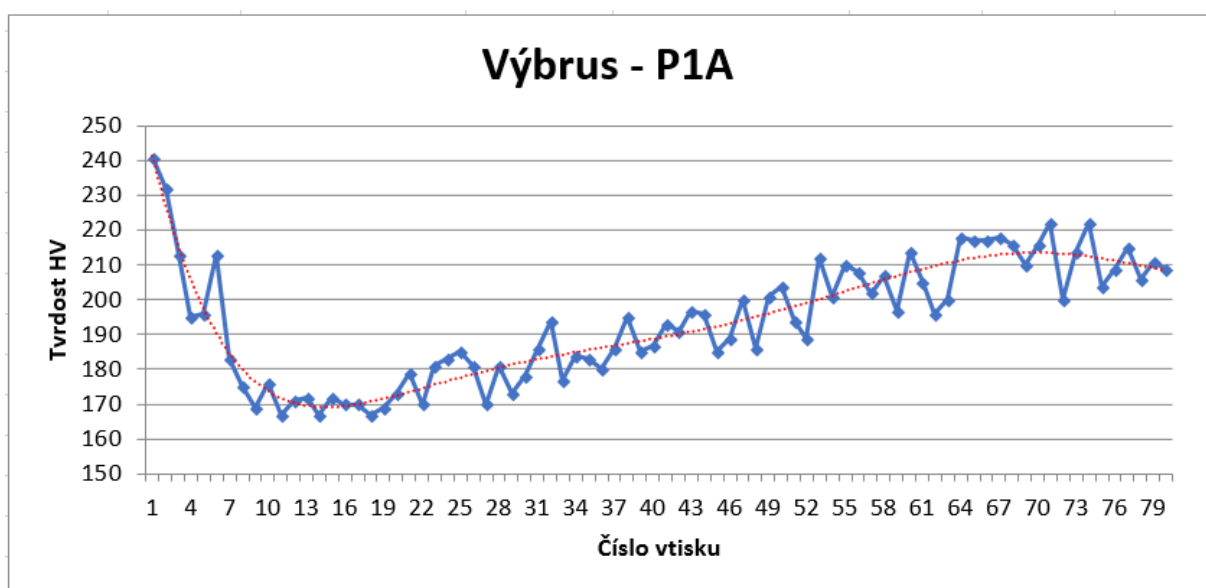


Graf č. 14 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR18101

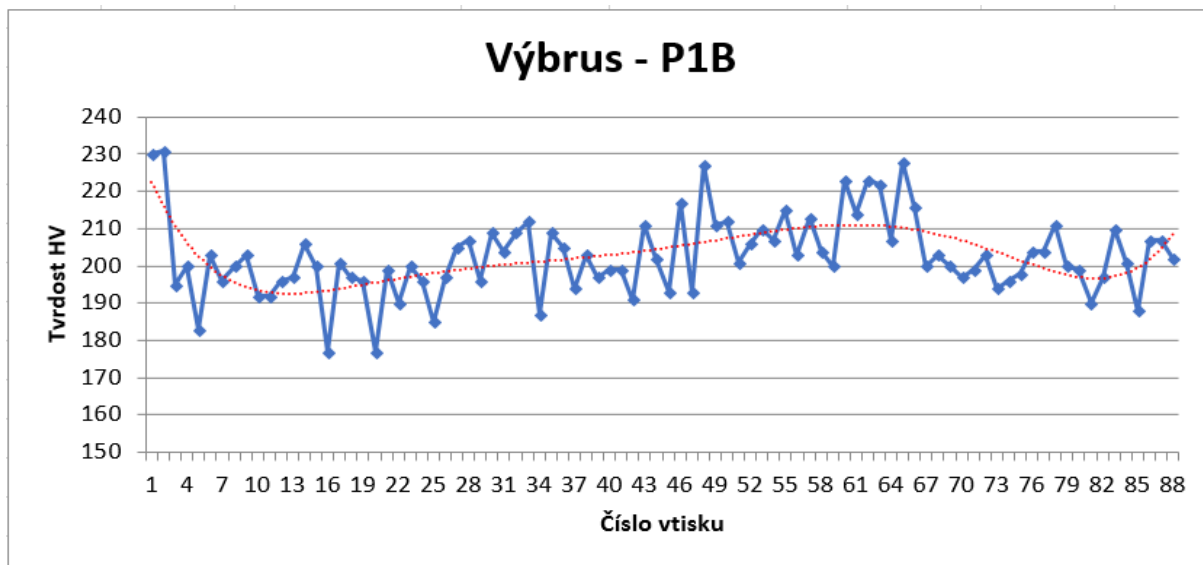
8.4.1.3 Výsledné hodnoty mikrotvrdości u zk. bloku HR18101

Pro zjištění hodnot mikrotvrdości byly použity vzorky metalografických výbrusů tj. P1A, P1B, P1C a vzorky P5A, P5B, P5C. Mikrotvrdość byla měřena směrem od povrchu zkušebního bloku ke středu v horizontálním směru (rovnoběžném s povrchem odlitku). Mikrotvrdość podle Vickerse byla měřena s krokem 0,2 mm a zatížením HV0,1.

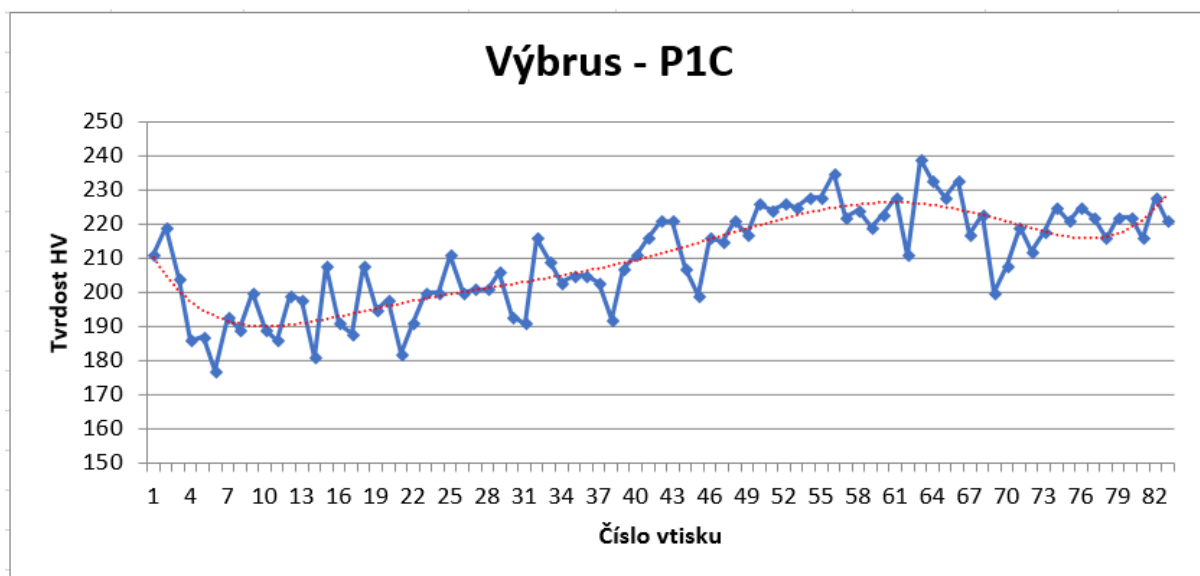
Výsledné závislosti mikrotvrdości jsou zobrazeny na grafech č. 15 až č. 17 pro krajní část zk. bloku (vzorek. č. 1) a na grafech č. 18 - č. 20 pro střední část zk. bloku.



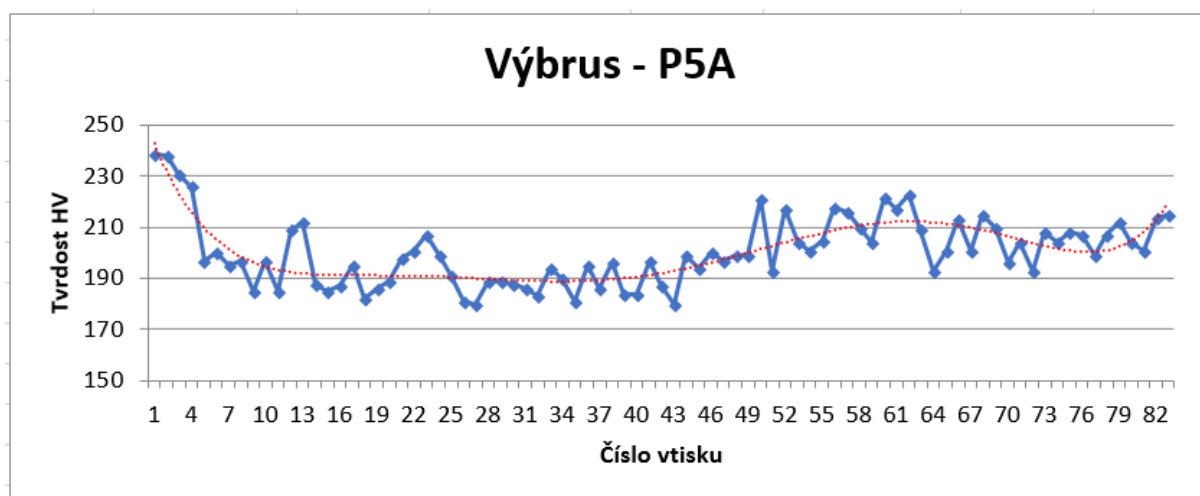
Graf č. 15 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P1A ze zk. bloku z HR18101



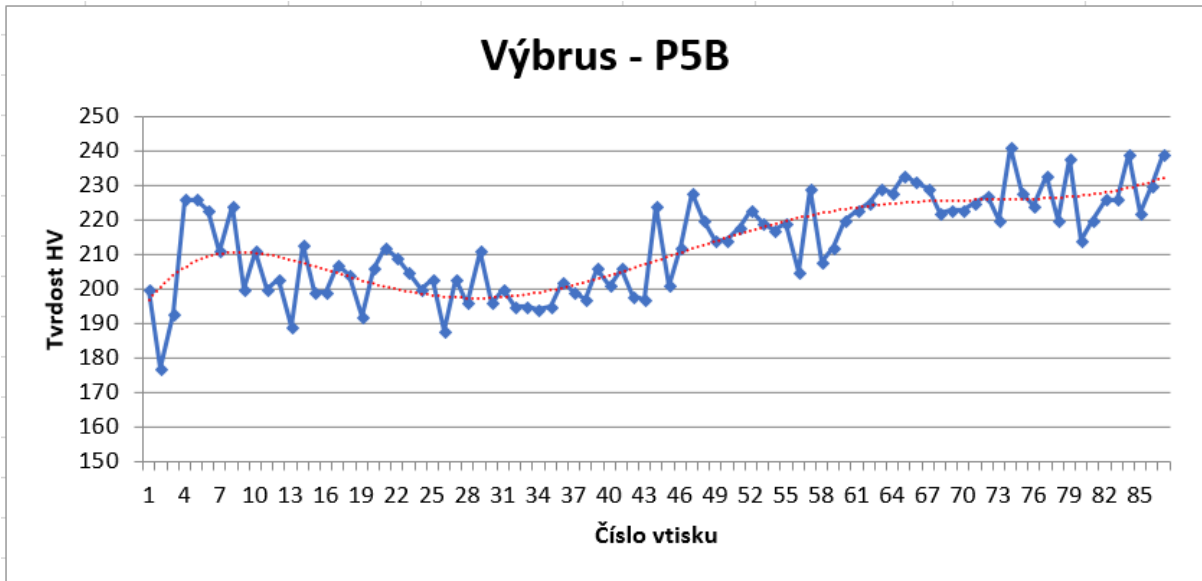
Graf. č. 16 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P1B ze zk. bloku z HR18101



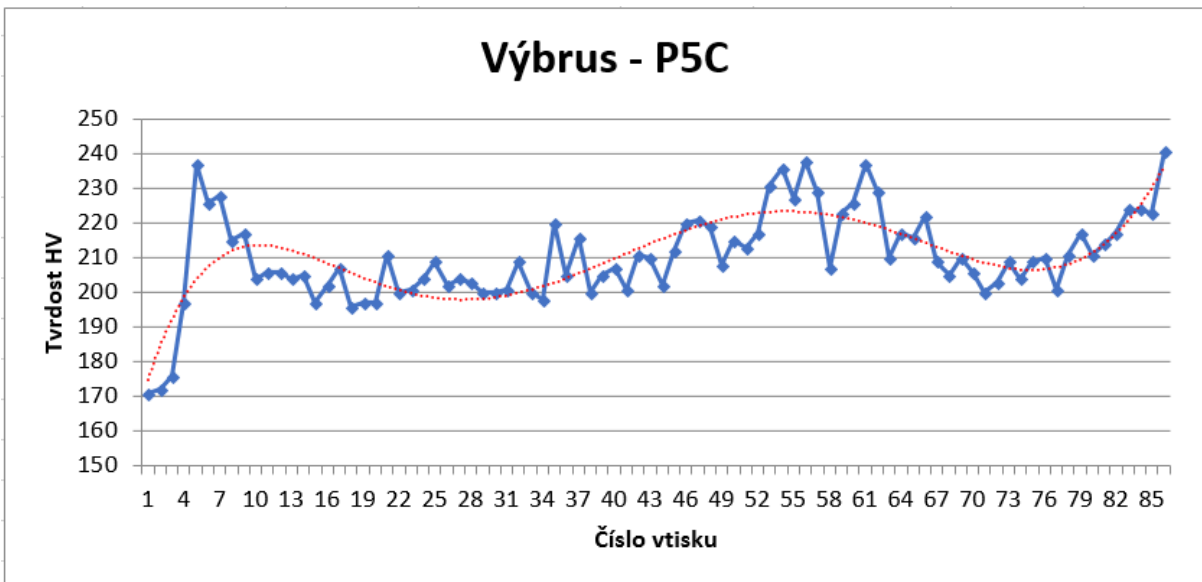
Graf. č. 17 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P1C ze zk. bloku z HR18101



Graf. č. 18 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P5A ze zk. bloku z HR18101



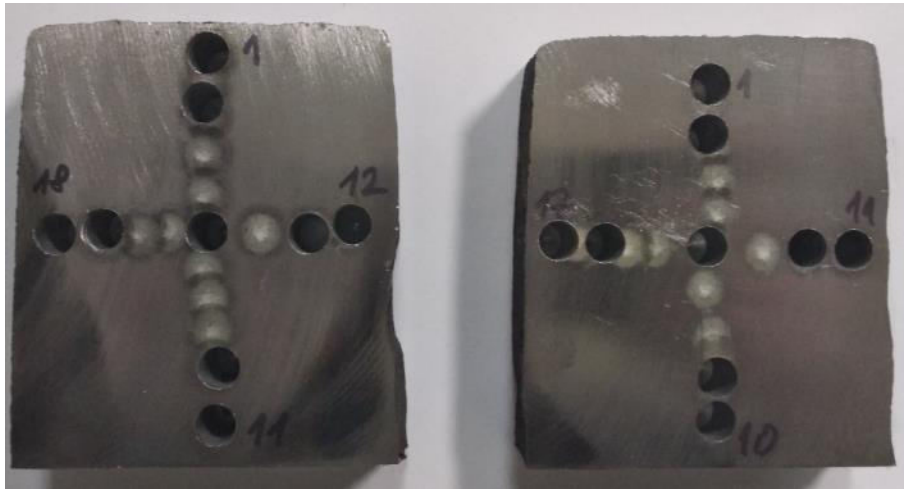
Graf č. 19 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P5B ze zk. bloku z HR18101



Graf č. 20 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P5C ze zk. bloku z HR18101

8.4.2 Odlitek spodního beranu HR17060

Přilítá zkouška byla upálena z povrchu odlitku a jako zkušební blok byla rozřezána na 10 částí v podélném rozměru stejně jako tomu bylo u předchozí zkoušky z HR18101. Následně všechny vzorky byly podrobeny spektrální chemické analýze ve směru od povrchu zkušebního bloku k tělu odlitku a ve směru rovnoběžném (horizontálním) s povrchem odlitku (viz obr. č 47). U vzorků č. 2 a č.6 byla pro kontrolu oduhličení použita přesná spalovací metoda Leco (výsledky jsou uvedeny v příloze práce). Výsledky analýzy reprezentují rozložení chemických prvků v jednotlivých vrstvách zkušebního bloku v závislosti na jejich segregaci při tuhnutí a difuzi při tepelném zpracování, pozornost je zde kladena právě na obsah uhlíku. Dle rozřezového plánu pak vzorek č. 1 a č. 5 byl použit pro získání metalografických výbrusů a zjištění hodnot mikrotvrdości od povrchu zk. bloku. Dále vzorky č. 4 a č. 8 byly použity pro výrobu vzorků pro tahovou zkoušku. Vzorky č. 3 a č. 7 byly pak použity pro výrobu vzorků pro zkoušku rázem v ohybu.



Obr. č. 47 - Detail značení chemických analýz na vzorcích ze zk. bloku z HR17060

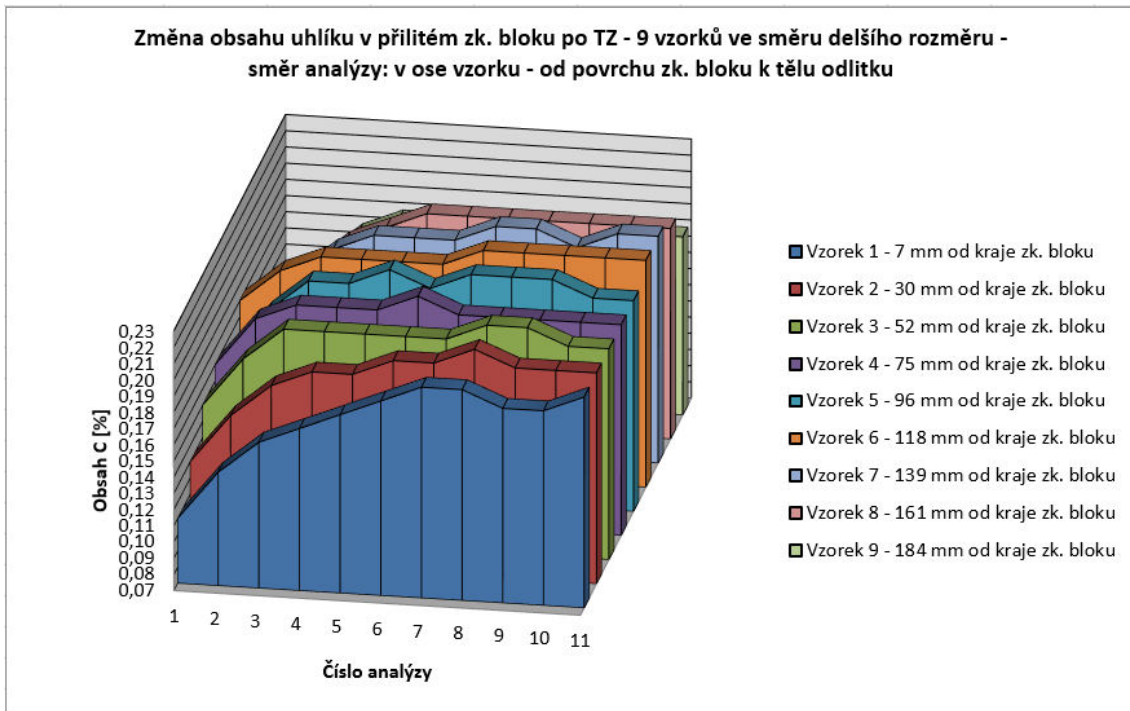
Výsledné grafy pro vzorky č. 1 - 9

Graf č. 22 - Obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.

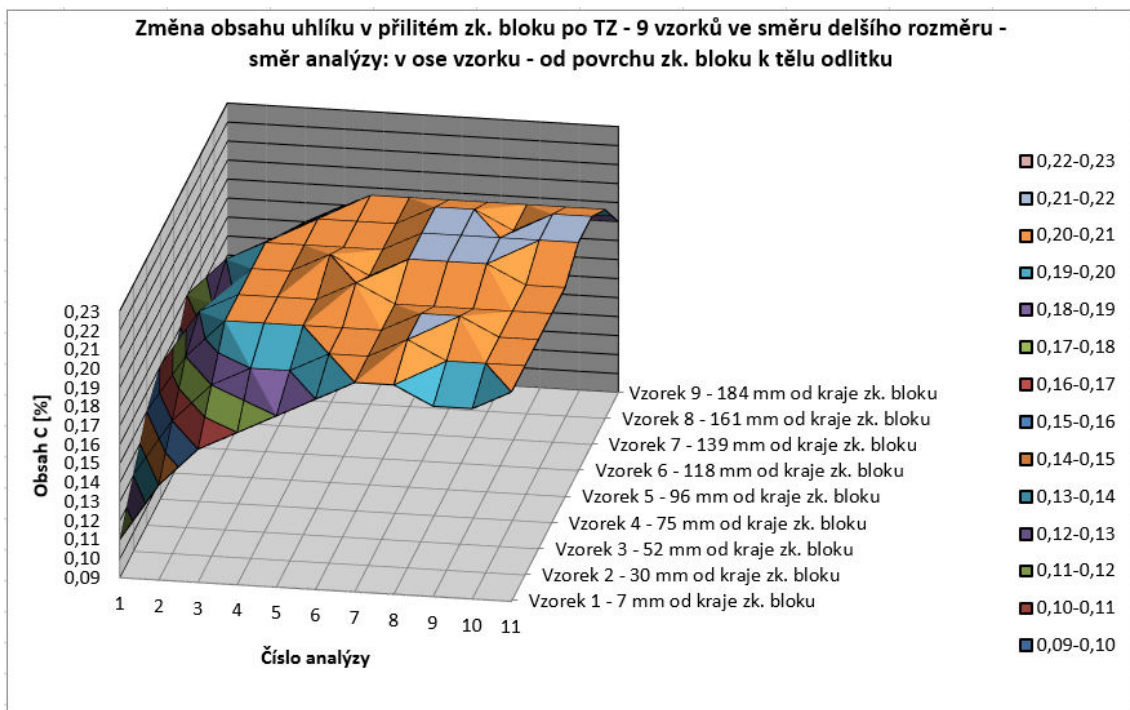
Graf č. 23 - Obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.

Graf č. 24 - Obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.

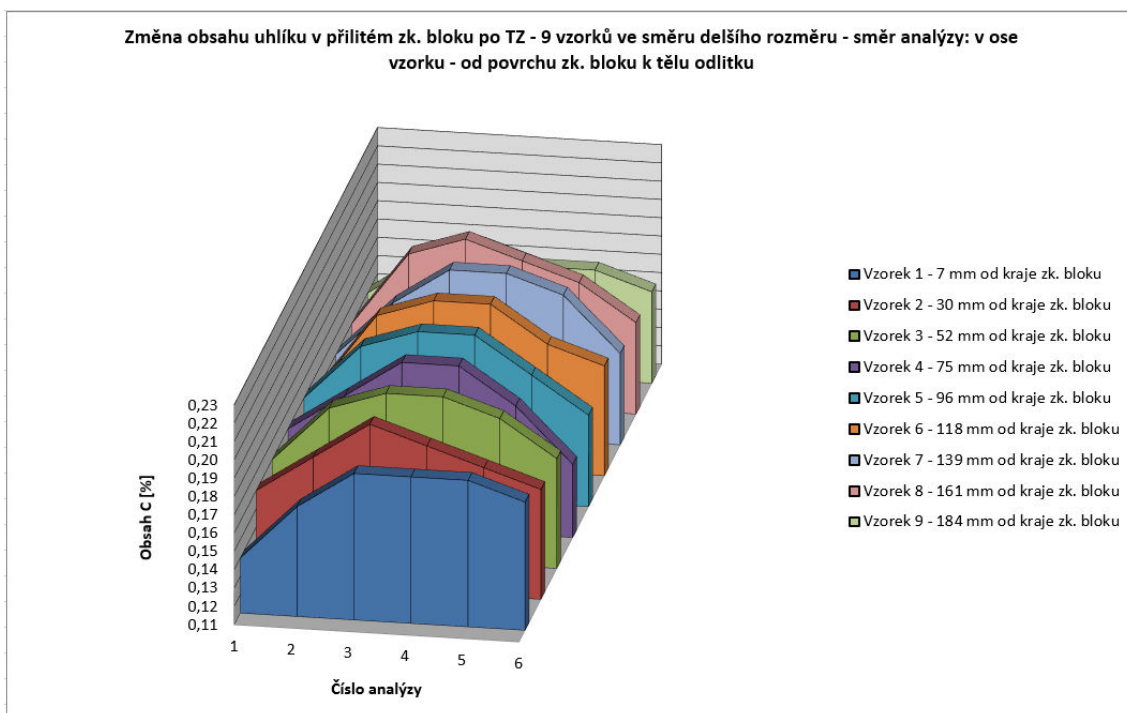
Graf č. 25 - Obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.



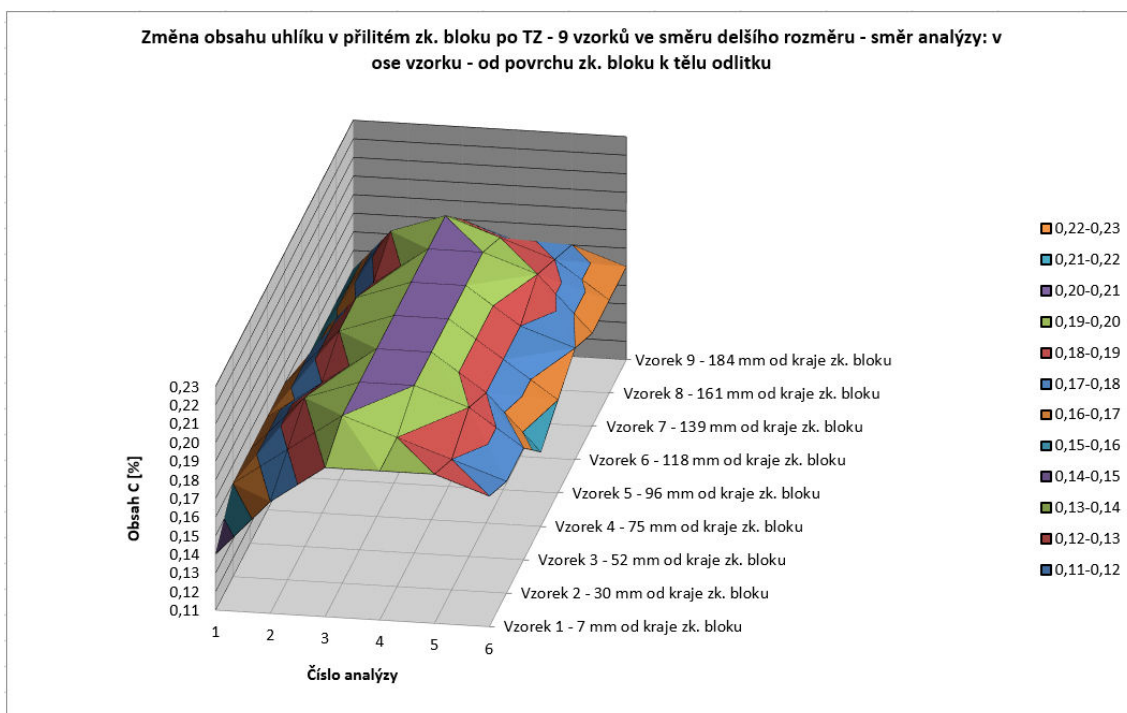
Graf č. 21 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku



Graf č. 22 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku



Graf č. 23 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku



Graf č. 24 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku

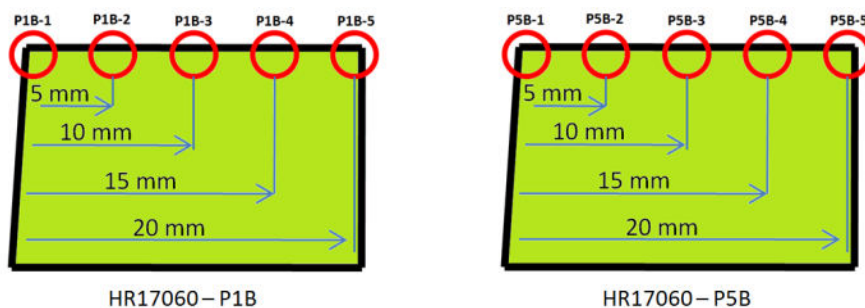
8.4.2.1 Metalografický rozbor

Pro hodnocení stavu povrchové vrstvy zkušební bloku byl proveden rozbor mikrostruktury na vybraných místech zobrazených na rozřezovém plánu, viz obr. č. 31.

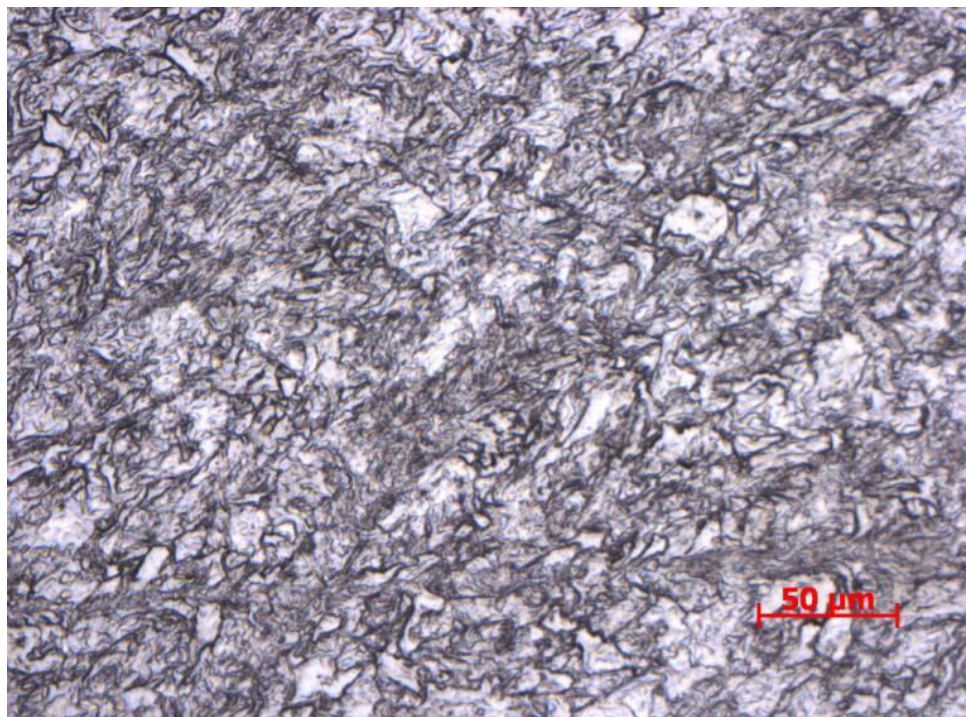
Pro vyhodnocení byly zvoleny vzorky č. 1 a č. 5 tj. kraj a prostřední část zkušební bloku. Vzorky byly rozřezány na laboratorní kotoučové pile Struers Discotom-6 (obr. č. 34) a následně vyleštěny na automatické leštiče stejnojmenné značky. Leptání výsledných částí bylo provedeno 2% roztokem leptadla Nital (kyselina dusičná na alkoholové bázi pro nelegované a nízkolegované oceli) .

Vyhodnocované vzorky ze zk. bloku z HR17060

Na vybraných vzorcích P1B a P5B (krajní, prostřední část zk. bloku viz rozřezový plán obr. č. 31) byla mikrostruktura zkoumána ve čtyřech vzdálenostech od povrchu (obr. č. 48). Mikrostruktura pro ostatní metalografické výbrusy (P1A,P1C,P5A,P5C) je uvedena v příloze pod obr. č. 80 až obr. č. 99.



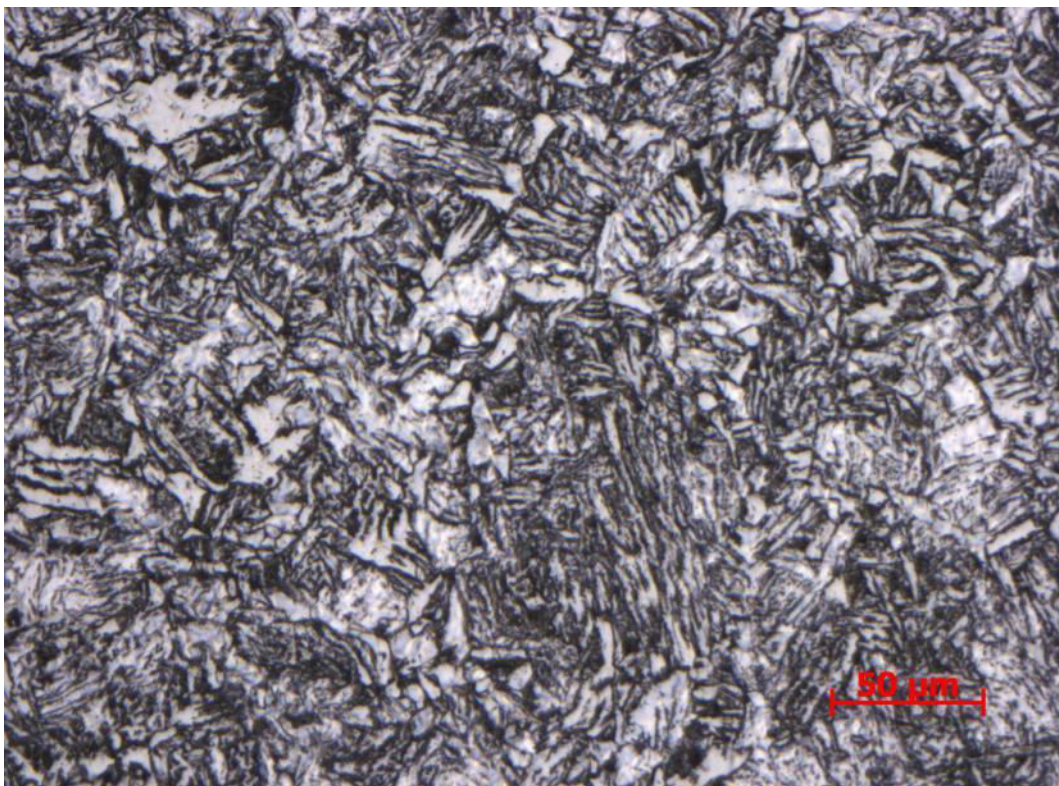
Obr. č. 48 - Schematické znázornění vzdálenosti pro pořízení mikrostruktur od povrchu zkušební vzorku (přilitého zk. bloku)



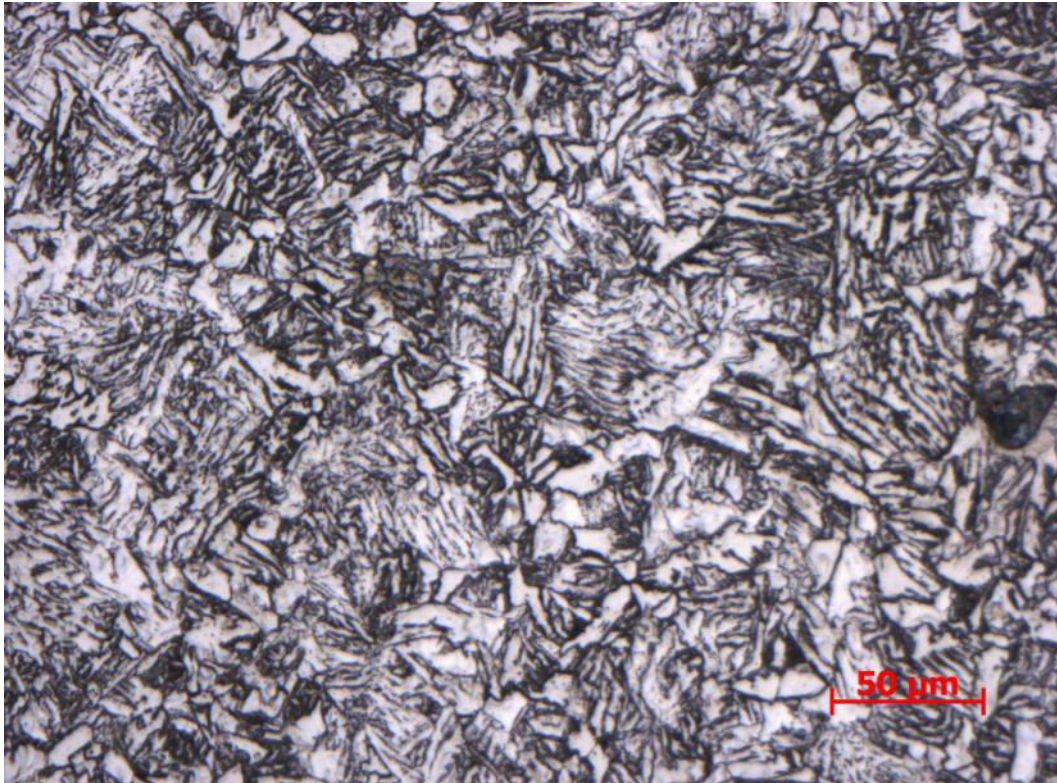
Obr. č. 49 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x. Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



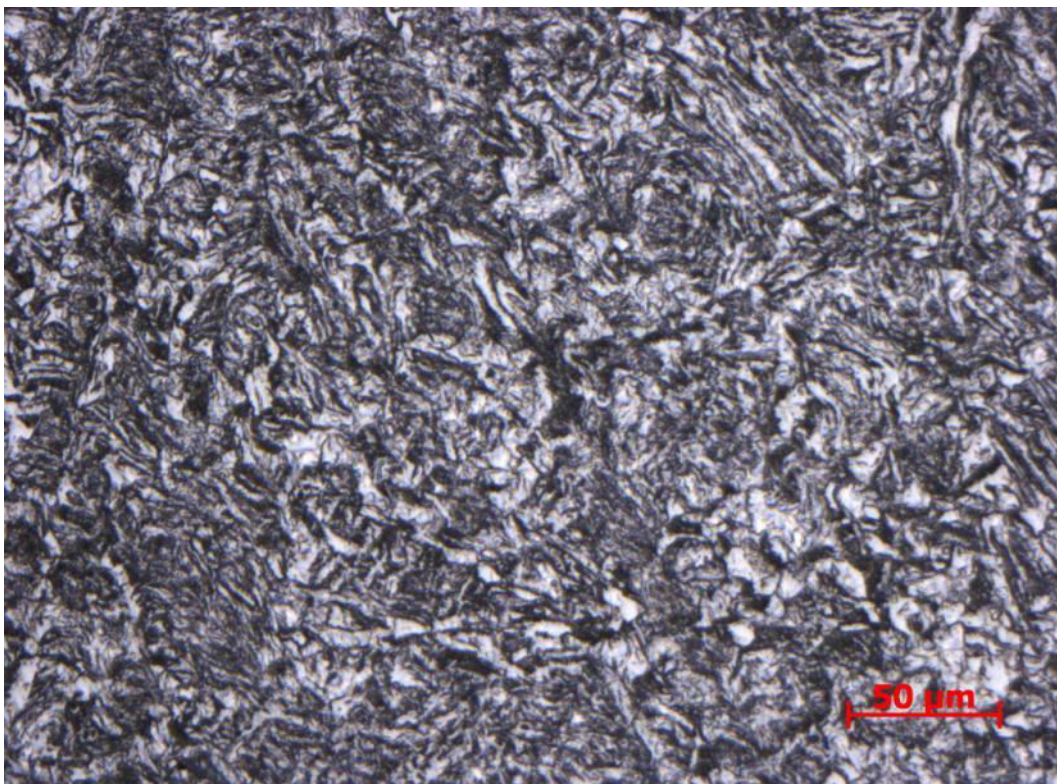
Obr. č. 50 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



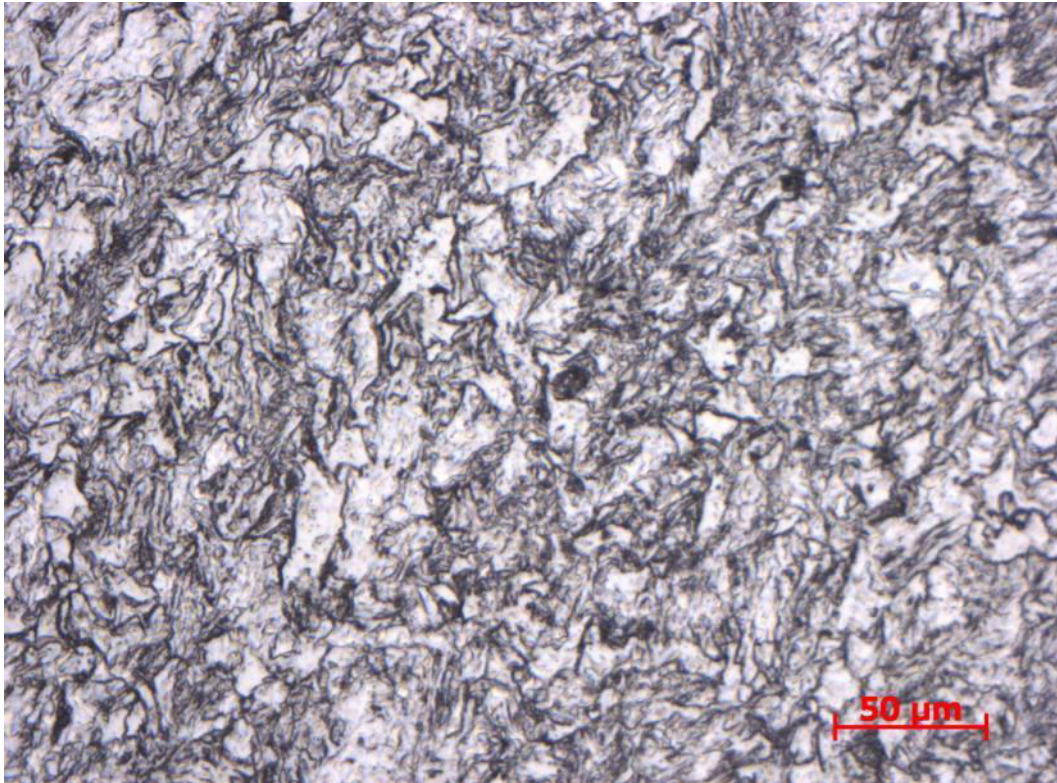
Obr. č. 51 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



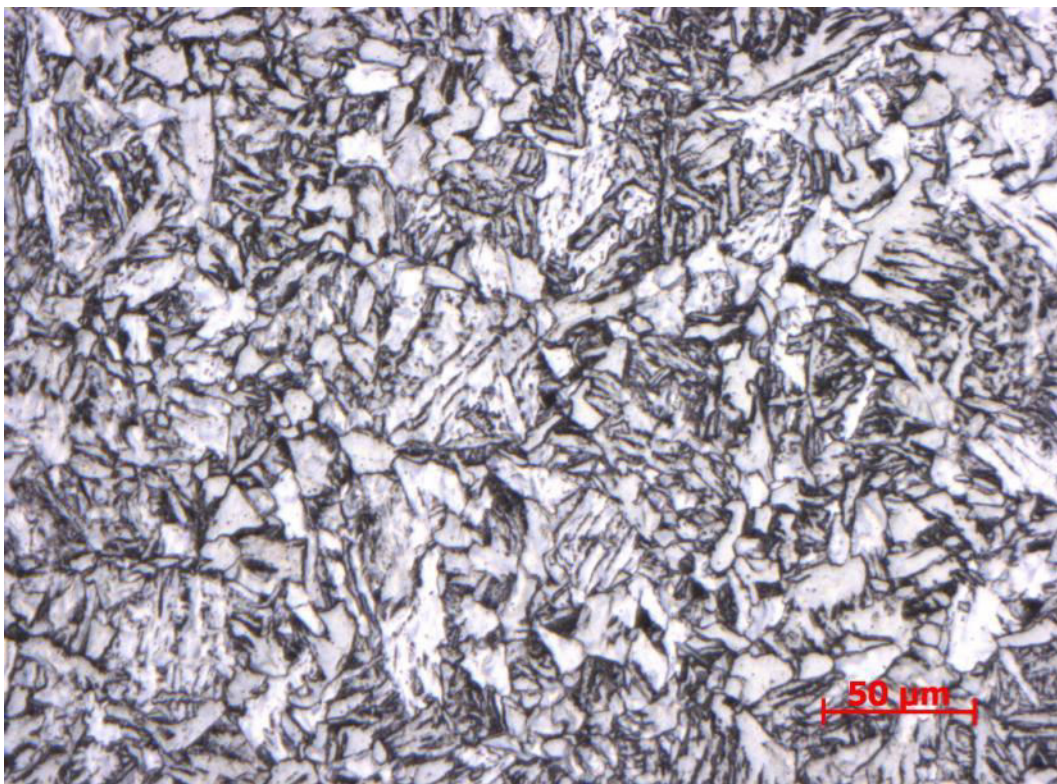
Obr. č. 52 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



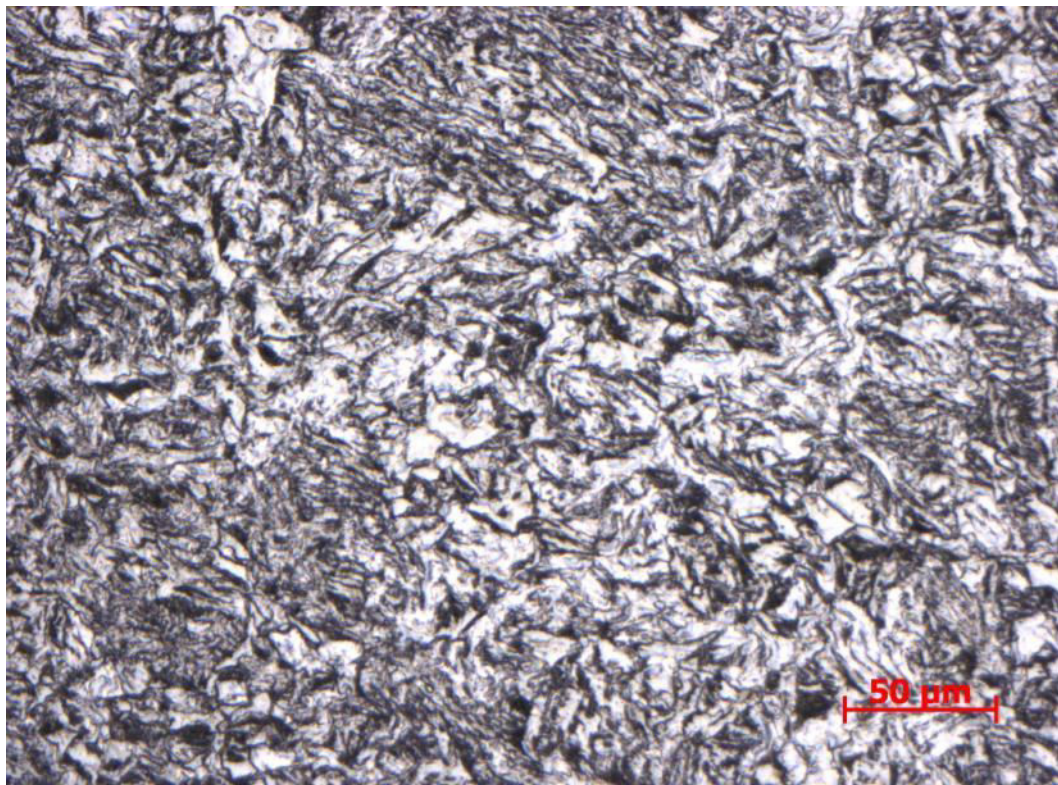
Obr. č. 53 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury



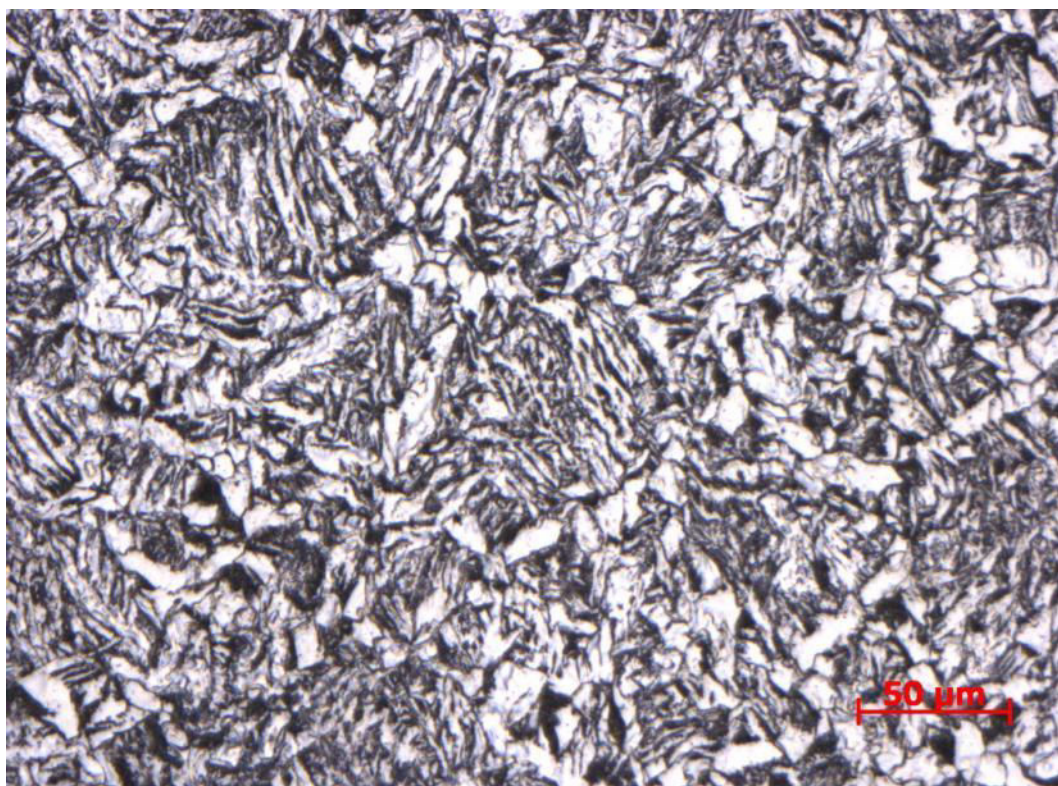
Obr. č. 54 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIB-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



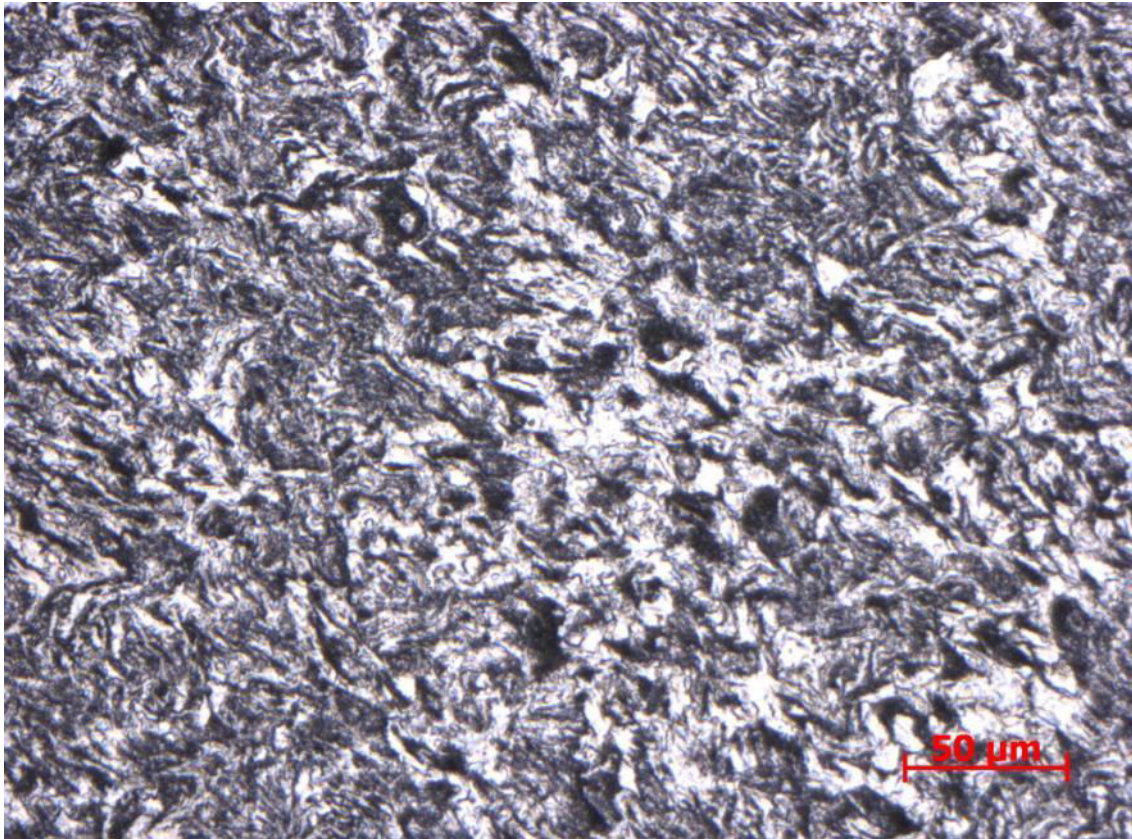
Obr. č. 55- Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIB-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 56 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIB-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 57 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIB-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 58 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIB-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.

Feriticko - perlitická struktura, výraznější podíl perlitické struktury

8.4.2.2 Mechanické Vlastnosti zk. bloku z HR17060

Mechanické vlastnosti ze zkušebního bloku HR17060 jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech. Jak je patrné na rozřezovém plánu pro vzorky na tahovou zkoušku dle EN 6892-1 byly použity vzorky č. 4 a č. 8. Na zkoušku rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 byly pak použity vzorky č. 3 a č. 7.

Vzorky pro tahovou zkoušku a zkoušku rázem v ohybu.

Vzhledem k rozměrové omezenosti přilítých zkušebních bloků byly pro zkoušku tahem použity zkušební tělesa o délce $l = 60$ mm a průměrem $d = 6$ mm. Pro zkoušku rázem v ohybu byly použity zkušební vzorky s průřezem 10x10 mm a délce 55 mm s V vrubem s hloubkou 2 mm. Vzorky pro obě dvě zkoušky jsou zobrazeny na obr. č. 59.



Obr. č. 59 - Zkušební vzorky pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu

Výsledné grafy pro vzorek č. 4 a vzorek č. 3

Graf č. 25 (tab. č. 12) - Mez kluzu $R_{p0,2}$

Graf č. 26 (tab. č. 12) - Meze pevnosti R_m

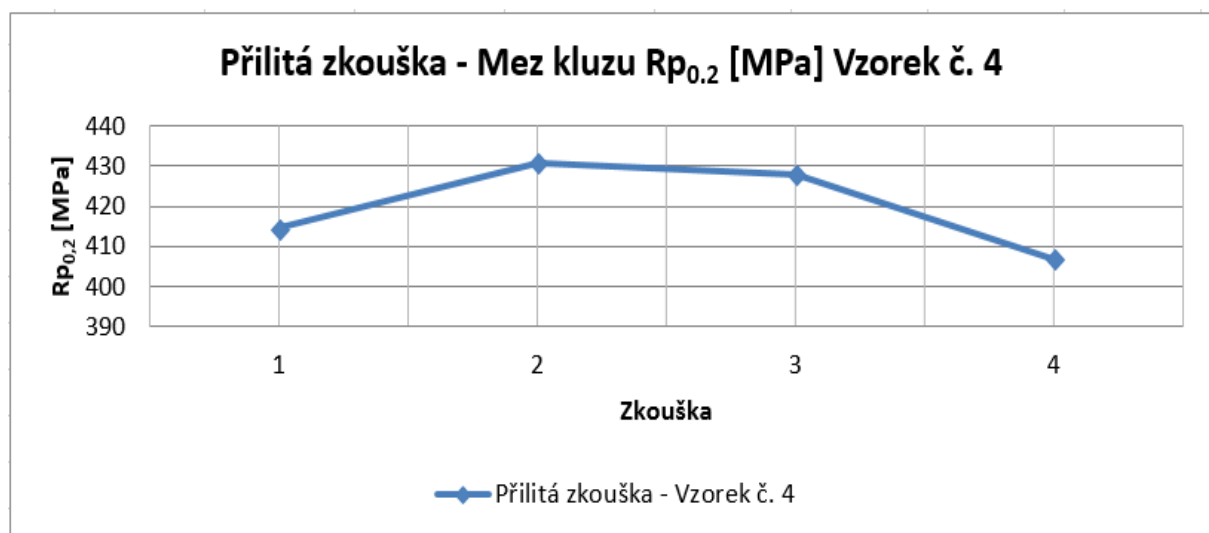
Graf č. 27 (tab. č. 12) - Tažnost A_5

Graf č. 28 (tab. č. 12) - Kontrakce Z

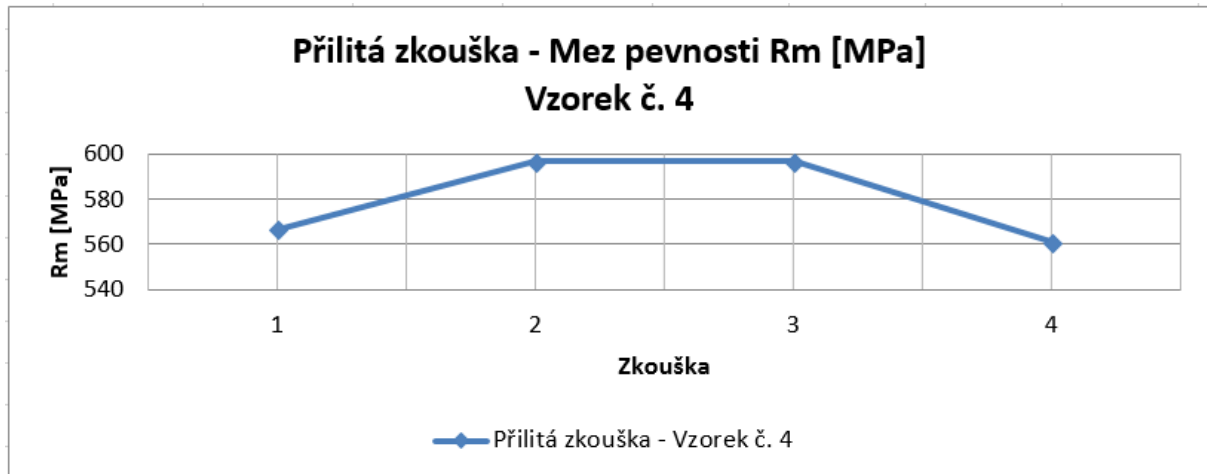
Graf č. 29 (tab. č. 13) - Vrubová houževnatost KV

Zkouška tahem dle EN 6892-1 - Vzorek č. 4				
HR 17060				
Číslo zkoušky	$R_{p0,2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A [%]	Z [%]
1	414,6	566,5	29,4	67,7
2	430,9	596,7	27,7	67,1
3	428	596,7	26,9	68,3
4	406,9	560,9	31,2	68,8
Min.	300	510	20	0

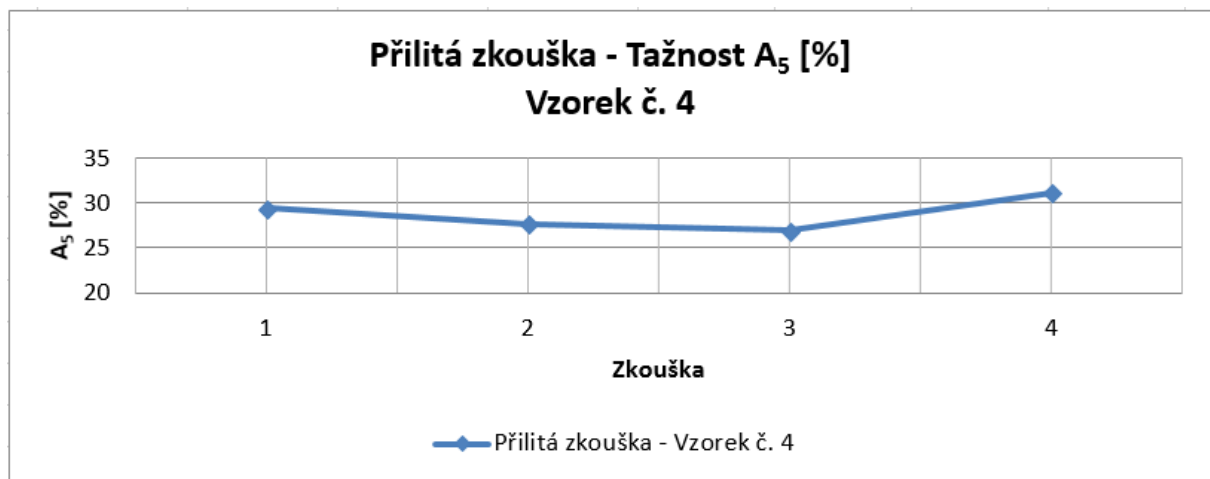
Tab. č. 12 - Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR17060



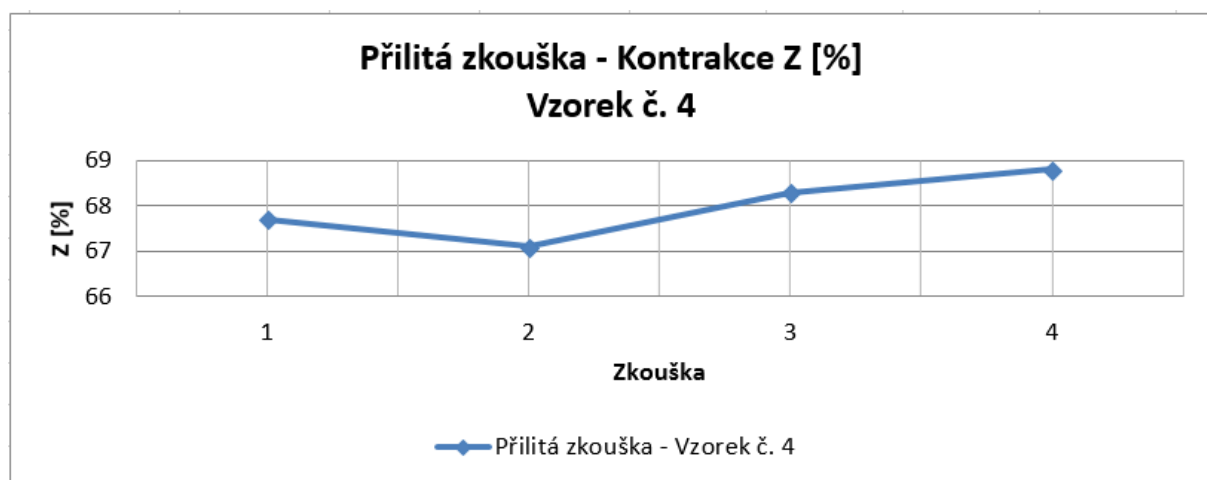
Graf č. 25 - Dosažené hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ u zk. bloku z HR17060



Graf č. 26 - Dosažené hodnoty meze pevnosti R_m u zk. bloku z HR17060



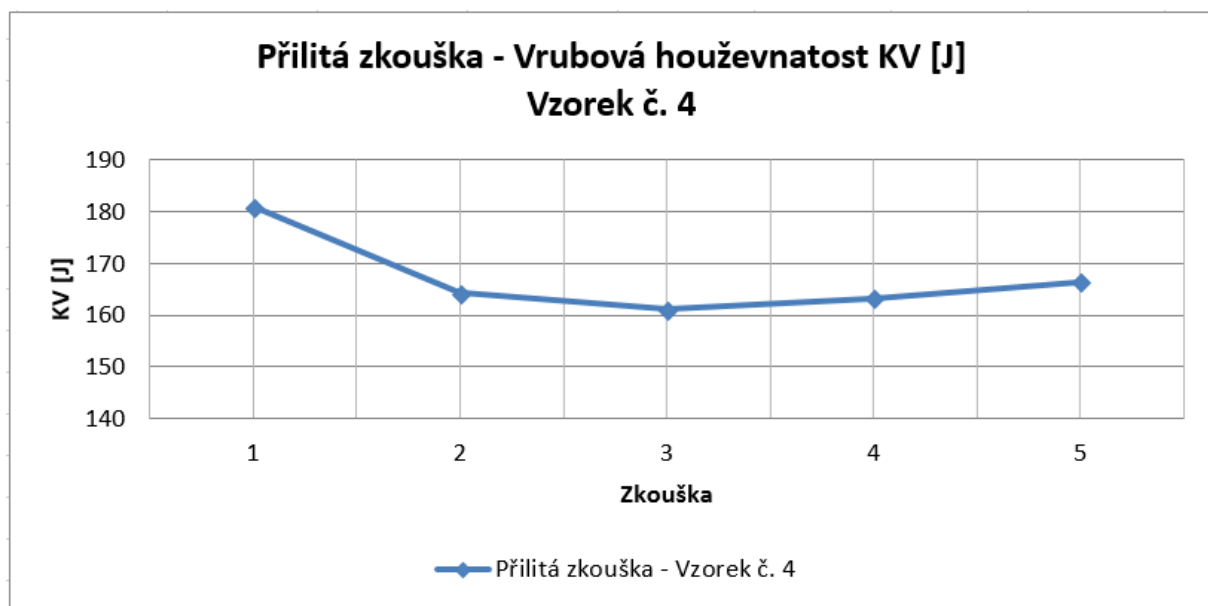
Graf č. 27 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku z HR17060



Graf č. 28 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR17060

Zkouška rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 - Vzorek č. 3		
HR 17060		
Číslo zkoušky	KV [J]	KCV [J/cm ²]
1	181	226,2
2	164,3	205,3
3	161,1	201,4
4	163,3	204,1
5	166,4	207,9
Min.	40	40

Tab. č. 13 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR17060



Graf č. 29 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR17060

Výsledné grafy pro vzorek č. 8 a vzorek č. 7

Graf č. 30 (tab. č. 14) - Mez kluzu $R_{p0,2}$

Graf č. 31 (tab. č. 14) - Meze pevnosti R_m

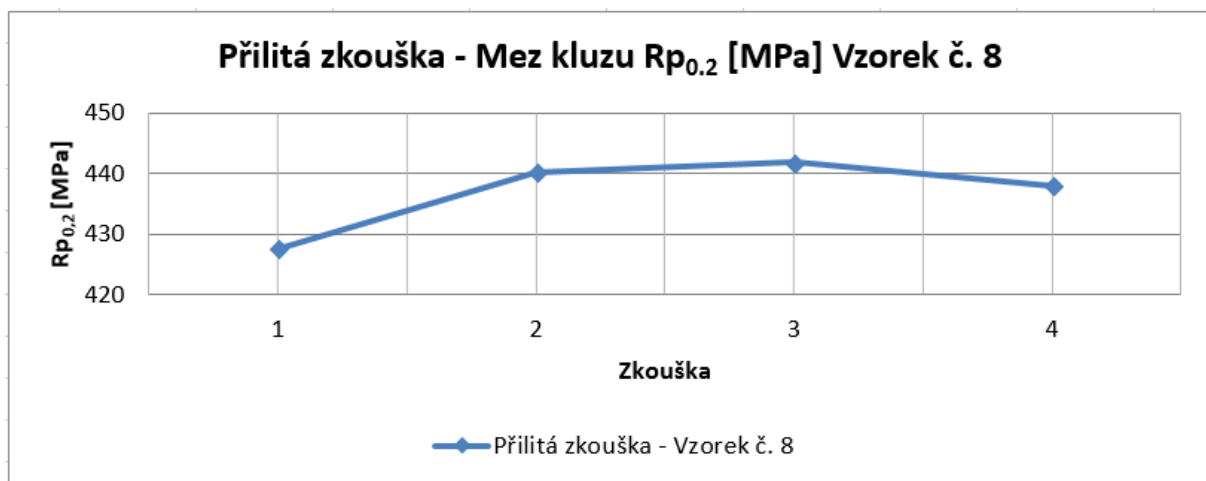
Graf č. 32 (tab. č. 14) - Tažnost A_5

Graf č. 33 (tab. č. 14) - Kontrakce Z

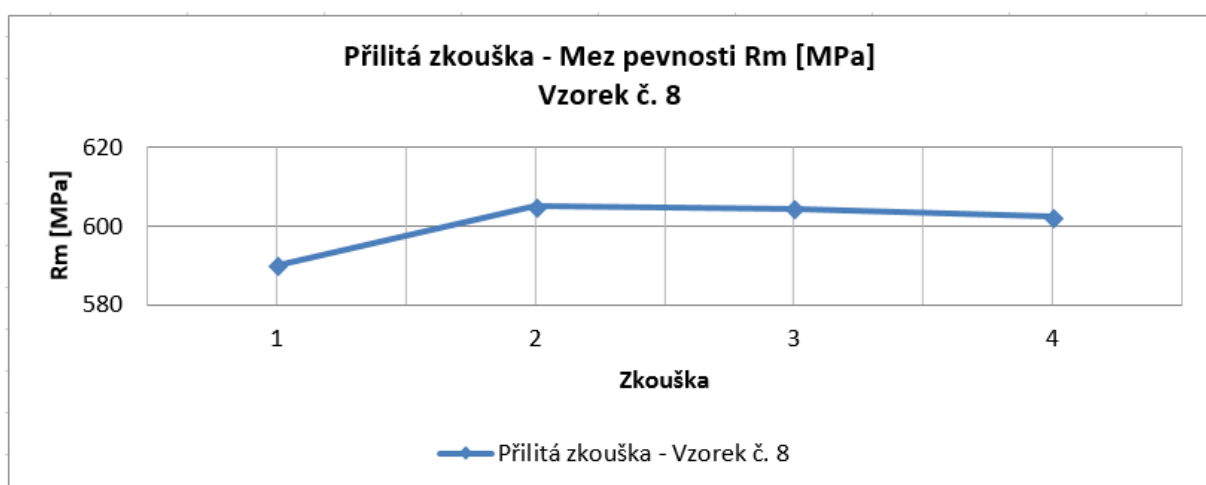
Graf č. 34 (tab. č. 15) - Vrbová houževnatost KV

Zkouška tahem dle EN 6892-1 - Vzorek č. 8				
HR 17060				
Číslo zkoušky	Rp _{0,2} [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]	Z [%]
1	427,6	590	26,1	62
2	440,2	605,1	25,1	65,8
3	441,8	604,4	21,4	58,8
4	438	602,3	20,3	54
Min.	300	510	20	0

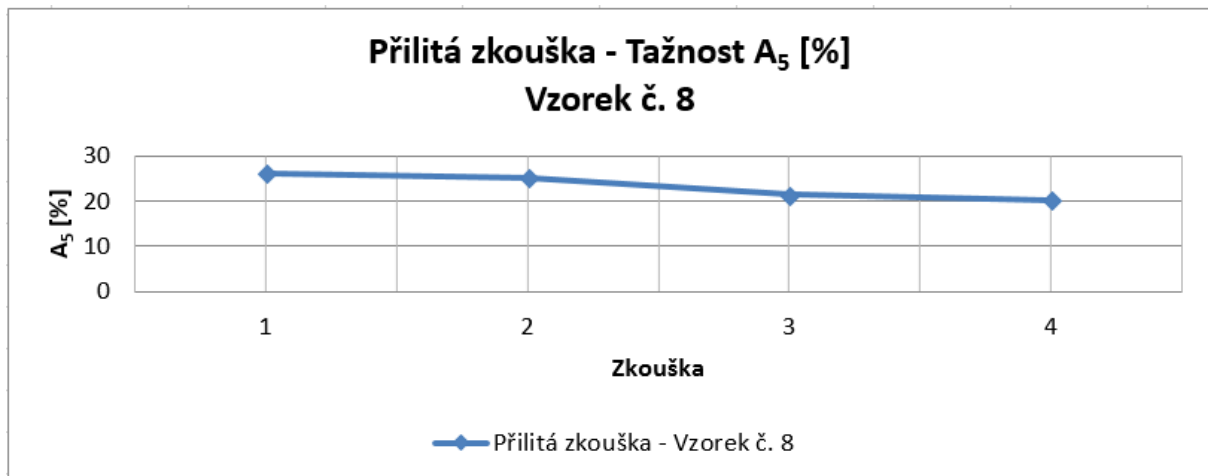
Tab. č. 14 - Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR17060



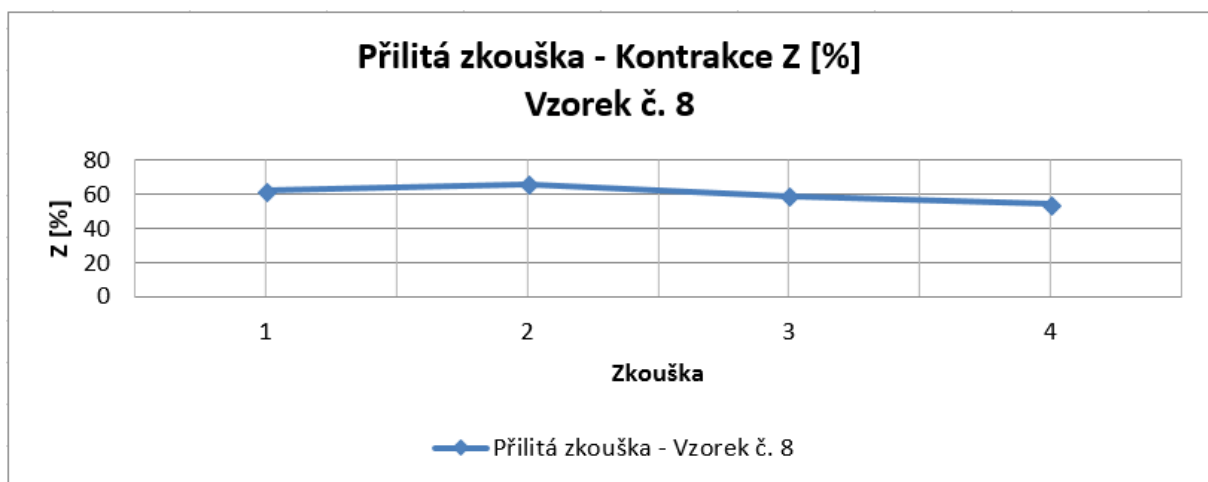
Graf č. 30 - Dosažené hodnoty meze pevnosti Rp_{0,2} u zk. bloku z HR17060



Graf č. 31 - Dosažené hodnoty meze pevnosti Rm u zk. bloku z HR17060



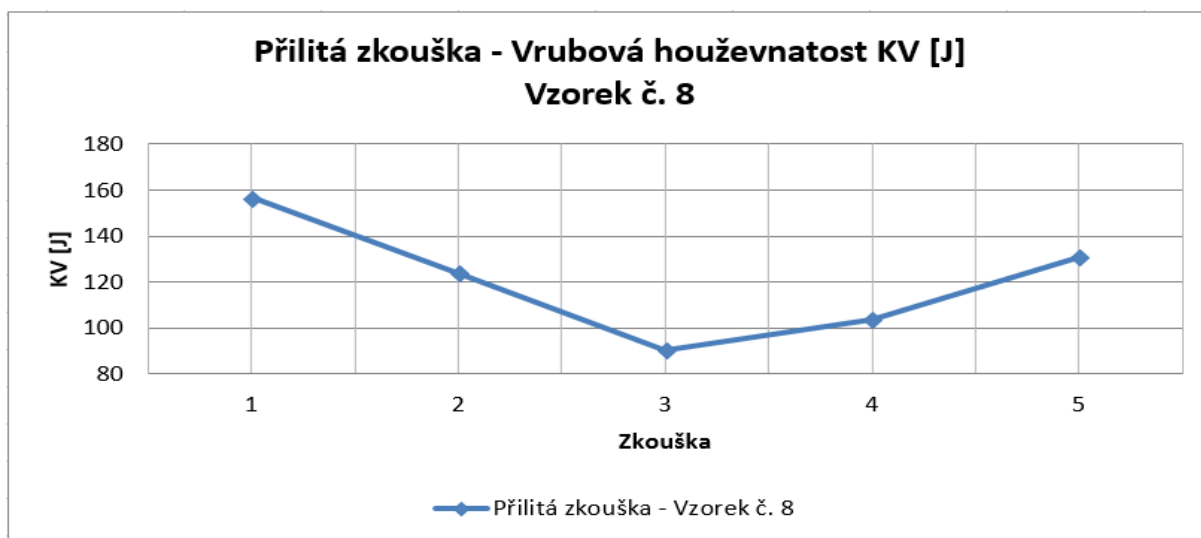
Graf č. 32 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku z HR17060



Graf č.33 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR17060

Zkouška rázem v ohybu dle ČSN ISO 148-1 - Vzorek č. 7		
HR 17060		
Číslo zkoušky	KV [J]	KCV [J/cm^2]
1	156,6	195,7
2	123,9	154,9
3	90,5	113,1
4	103,8	129,8
5	130,9	163,6
Min.	40	40

Tab. č. 15 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR17060

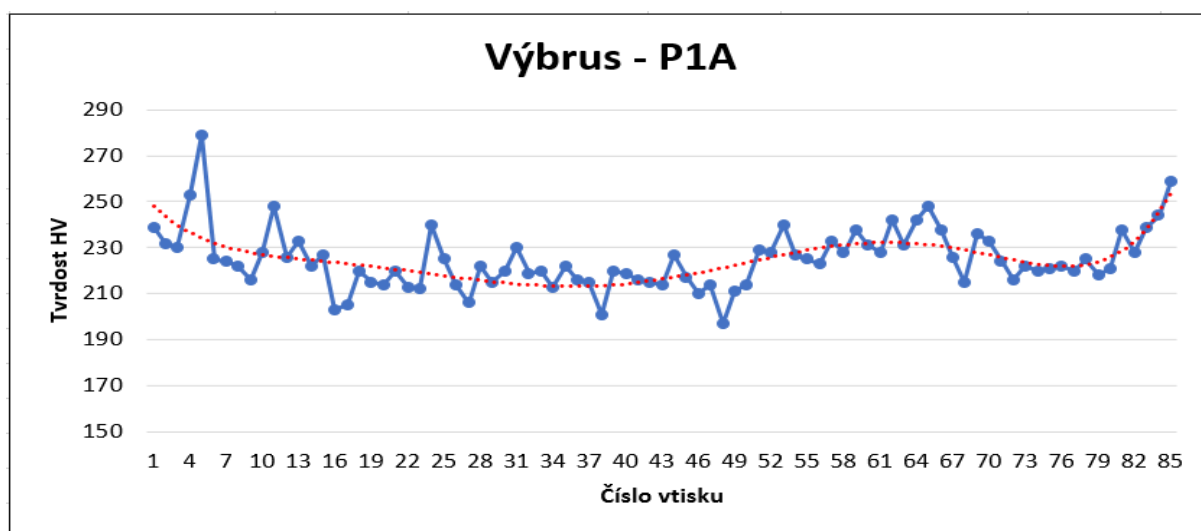


Graf č. 34 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR17060

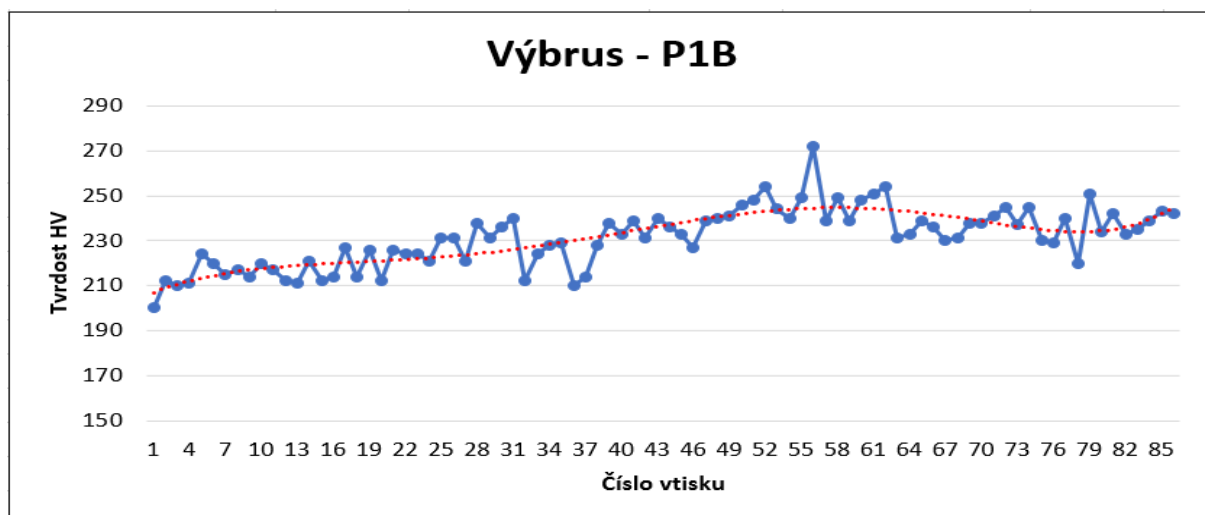
8.4.2.3 Výsledné hodnoty mikrotvrdości u zk. bloku HR17060

Pro zjištění hodnot mikrotvrdości byly použity vzorky metalografických výbrusů tj. P1A, P1B, P1C a vzorky P5A, P5B, P5C. Mikrotvrdość byla měřena směrem od povrchu zkušebního bloku ke středu v horizontálním směru (rovnoběžném s povrchem odlitku). Mikrotvrdość podle Vickerse byla měřena s krokem 0,2 mm a zatížením HV0,1 (stejně parametry jako pro předchozí metalografické výbrusy z HR18101).

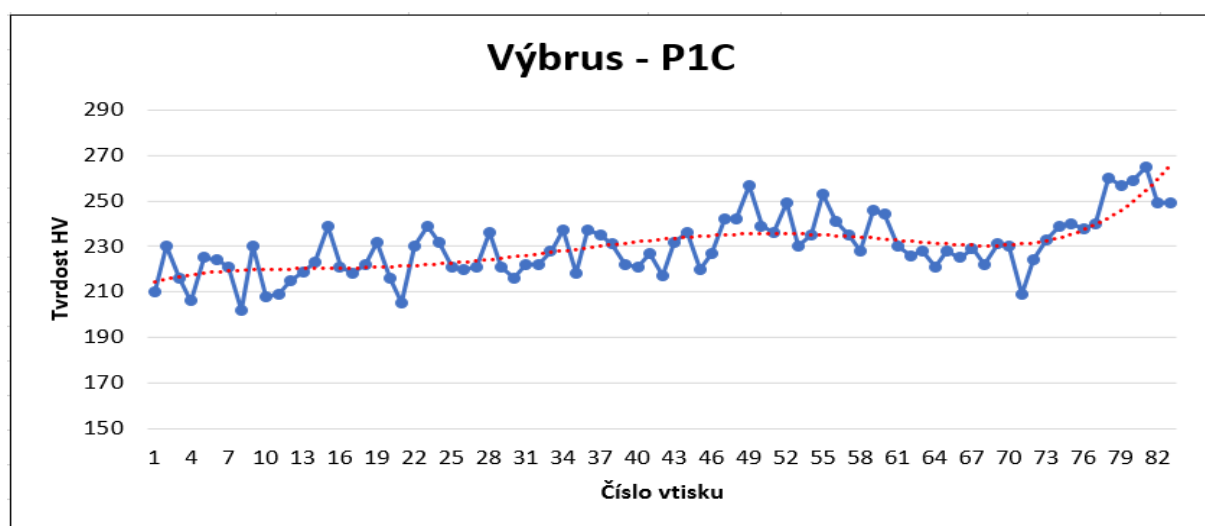
Výsledné závislosti mikrotvrdości jsou zobrazeny na grafech č. 35 až č. 37 pro krajní část zk. bloku (vzorek. č. 1) a na grafech č. 38- č. 40 pro střední část zk. bloku.



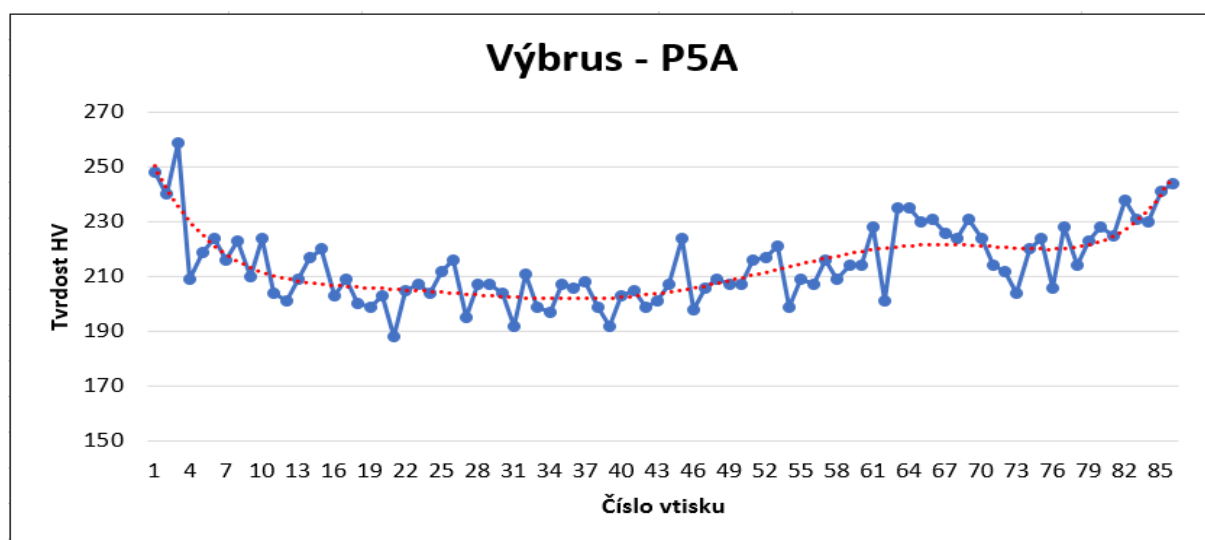
Graf č. 35 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P1A ze zk. bloku z HR17060



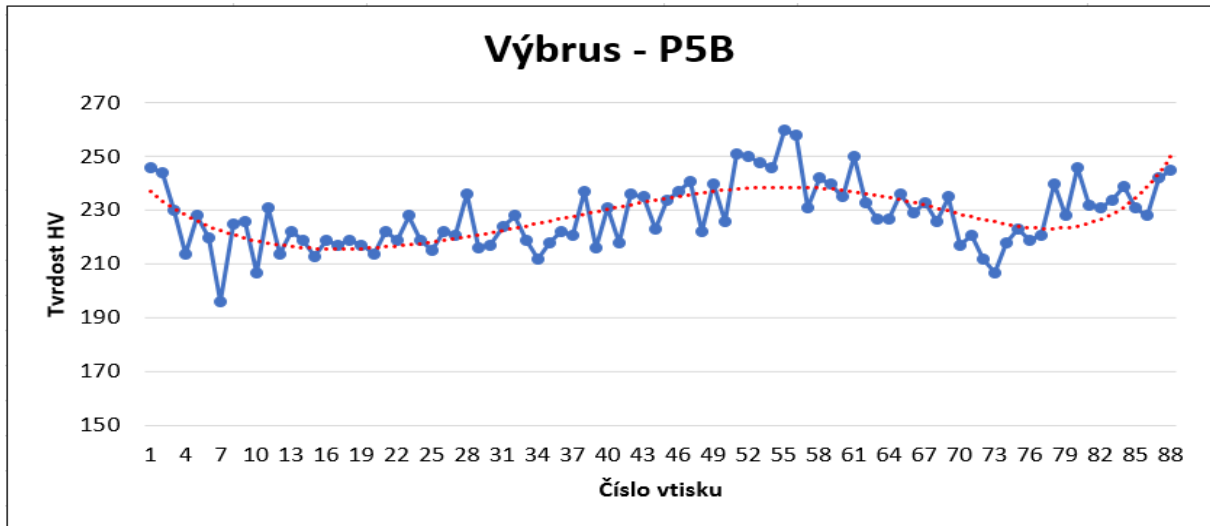
Graf č. 36 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P1B ze zk. bloku z HR17060



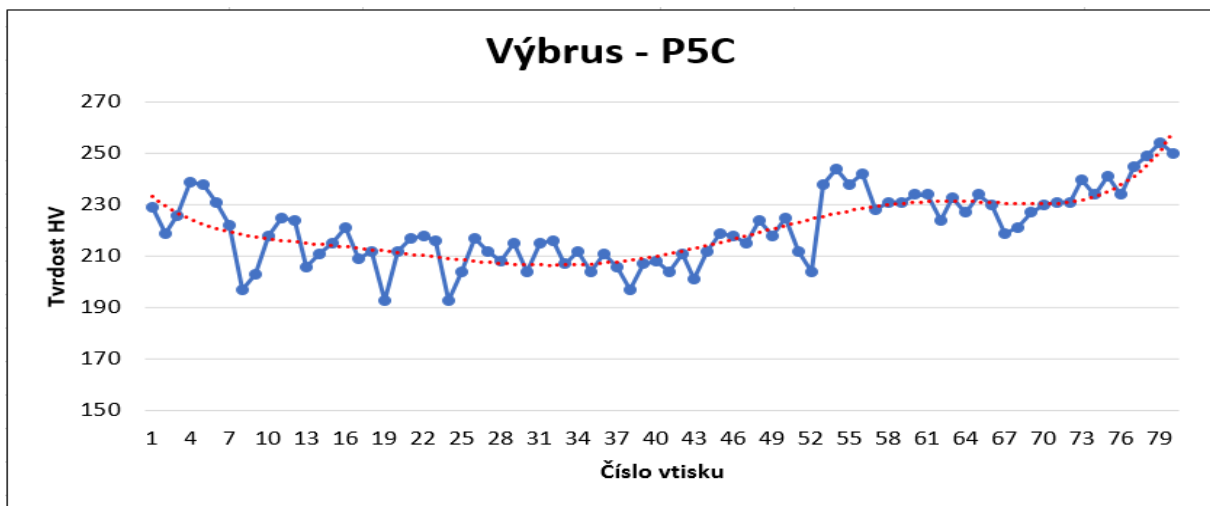
Graf č. 37 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P1C ze zk. bloku z HR17060



Graf č. 38 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P5A ze zk. bloku z HR17060



Graf č. 39 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P5B ze zk. bloku z HR17060



Graf č.40 - Závislost mikrotvrdości výbrusu P5C ze zk. bloku z HR17060

Vyhodnocení cílů práce

Vyhodnocení práce je provedeno v níže uvedených bodech:

➤ *Chemická analýza přilíých zkoušek*

Na zkušebních blocích HR18101 a HR17060 ošetřené ochranným nátěrem Kalsen byly rozbořeny určeny nejvíce oduhličené části. Pokud se podíváme na výsledné rozložení uhlíku zkoumaném ve vertikálním směru zkušebního bloku (graf. č. 2 a č.22) můžeme říci, že k největšímu oduhličení dochází až do vzdálenosti přibližně 30 mm od litého povrchu. Tyto oblasti pak mohou vykazovat zhoršené mechanické vlastnosti proti ostatním částem zkušebního bloku, i když je důležité poznamenat, že i kvalita provedení tepelného zpracování bude mít na mechanické vlastnosti vliv. Pokud se podíváme na rozložení uhlíku zkoumaném v horizontálním směru zkušebního bloku (rovina rovnoběžná s povrchem odlitku), nelze pouze na základě tohoto rozboru určit přesnou hloubku použitelnosti krajních oblastí a však lze konstatovat, že opět tyto oblasti jsou nevhodné pro získávání mechanických vlastností.

➤ *Mechanické vlastnosti*

Rozložení mechanických vlastností po průřezu zkušebního bloku bylo ověřeno na zkušebních vzorcích č. 4 a č. 8 (resp. č. 3 a č. 7). Získané výsledky mechanických vlastností ukazují, že nejvyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti jsou dosahovány ve středové části zkušebního bloku, oproti tomu hodnoty vrubové houževnatosti, tažnosti a kontrakce jsou v této oblasti sniženy. Opačný trend je dosahován u výsledků dosažených při zkoumání krajů zkušebního bloku.

Z výše zmíněného je patrné, jak důležité je určení místa výroby zkušebních vzorků na uříznutém plátu ze zkušebního bloku.

➤ *Metalografické výbrusy*

○ *Zkoumání mikrostruktury*

Mikrostruktura byla zkoumána na metalografických výbrusech P1A, P1B a P1C což odpovídá krajní oblasti zkušebního bloku (myšleno v podélném směru) a na vzorcích P5A, P5B a P5C ze středové oblasti zkušebního bloku. Pro každý metalografický výbrus byly provedeny vzhledy mikrostruktur od litého povrchu ke středové části (myšleno v příčném směru) zkušebního bloku. Výsledná feriticko - perlitická struktura se velmi lišila podílem perlitu. V povrchových oblastech zkušebního bloku byla téměř výhradně zastoupena pouze feritická struktura a to z důvodu silného oduhličení. S přibývajícím hloubkou a s rostoucím obsahem uhlíku je pozorována přibývajícím perlitická struktura. Na základě výsledných mikrostruktur můžeme říci, že oblast do vzdálenosti 20 mm od litého povrchu je vzhledem k velkému oduhličení nepoužitelná a pro další použití je třeba ji odstranit.

○ *Zkoumání mikrotvrdosti*

Pro zjištění hodnot mikrotvrdosti byly použity stejné metalografické výbrusy jak pro vzhled mikrostruktur. Výsledné grafické závislosti lze vidět na grafech č. 15 až č. 20 pro zkušební blok z HR18101 (resp. č. 35 až č. 40 pro zkušební blok z HR17060). Tato zkouška byla provedena jako rozšíření zkoumání dané problematiky, nic méně se nepodařila určit podobnost průběhu s ničím výše zmíněným. Výsledné průběhy hodnot mikrotvrdosti jsou tak pravděpodobně odražené v chemické nestejnorodosti materiálu.

Závěr

Tato práce věnuje velkou pozornost týkající se oduhličených oblastí přilítých zkoušek na povrchcích odlitků, které slouží následně jako výchozí materiál pro mechanické a chemické vlastnosti dodávané zákazníkovi spolu s požadovaným odlitkem.

Pro stanovení nejvhodnější oblasti materiálu pro danou zkoušku, můžeme říci, že po odebrání povrchové vrstvy materiálu stanovené na základně oduhličení a vzhledu mikrostruktur metalografických výbrusů, je vhodné použít středové části přilítých zkoušek (zkušebních bloků) pro získání hodnot meze kluzu a meze pevnosti a části vnější pak pro získání hodnot vrubové houževnatosti, tažnosti a kontrakce.

Díky výsledkům z této práce lze předejít zhoršeným mechanickým vlastnostem z důvodu použití nevhodné části (oblasti) z přilítých zkoušek.

Citovaná literatura

- [1] MORÁVEK, Otakar a Vladislav BABOROVSKÝ. Základy tepelného zpracování oceli. 3. upr. vyd. Praha: SNTL, 1969, 239 s.
- [2] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [3] KRAUS, Václav. Tepelné zpracování a slinování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1999, 274 s. ISBN 80-7082-582-0.
- [4] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. ISBN 80-7183-265-0.
- [5] KORECKÝ, Jan. Tepelné zpracování kovů. Vyd. 2. upr. Praha: SNTL, 1965, 88 s.
- [6] PLUHAŘ, Jaroslav. Nauka o materiálech. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
- [7] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. Tepelné úpravy kovových materiálů. Praha: ČVUT, 1993, 84 s. ISBN 80-01-01002-3.
- [8] MAZANCOVÁ, Eva. Technické materiály I. Kovové materiály, vydání první, Ostrava, 2012, ISBN 978-80-248-2577-9
- [9] HYSPECKÁ, Ludmila. Teorie tepelného zpracování. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě, 1975, 154 s.
- [10] KRAUS, Václav. Technologie tepelného zpracování. Část 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1992.
- [11] Kovové materiály a jejich zpracování, dostupné na: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/4_1_kovove-materialy-a-jejich-zpracovani.pdf
- [12] PLUHAŘ, Jaroslav. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Praha: Bratislava: SNTL; Alfa, 1987, 418 s.
- [13] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka. 1. vyd. Praha: SNTL, 1969, 391 s.
- [14] MANGAN, M.A., M.V. KRAL and G. SPANOS. Correlation between the crystallography and morphology of proeutectoid Widmanst ätten cementite precipitates. *Acta Materialia*. 1999, Vol. 47, No. 17, Page 4263-4274. PII: S1359-6454(99)00323-7
- [15] DRÁPAL, Stanislav. *Teorie tepelného zpracování*. 1. vyd. SNTL, Praha, 1973, s. 114-116.

- [16] TODOROV, R.P. a Kh.G. KHRISTOV. STRUCTURAL TRANSFORMATIONS: Widmanstätten Structure of Carbon Steels . *Metal Science and Heat Treatment*. 2004, Vol. 46, No. 1-2, Page. 49-53. UDC: 669.14:620.186.
- [17] KORECKÝ, Jan. Kalení oceli: Pomůcka k výcviku kaličů v prům. 2. vyd. Praha: Prace, 1951, 191 s
- [18] OTÁHAL, Vlastislav. MetalCasting and Foundry Consult, Otáhal Vlastislav, Brno, Horská 27, Dostupné na: <http://otahalconsult.cz/soucasne-produkty/vadz-odlitku/vady-odlitku-vadz-odlitku/>
- [19] Cornell,R.,Bhadeshia,H,K.: Decarburization of Steel, Dostupné na: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/abstracts/M0.html>
- [20] Studium oduhlíčení povrchových vrstev ložiskových ocelí 100Cr6, Dostupné na: <http://konference.tanger.cz/data/metal2007/sbornik/Lists/Papers/101.pdf>
- [21] AZ Prokal - servis pro kalírny, Dostupné na WWW:
[file:///C:/Users/Jen%C3%ADk/Downloads/p%C5%99%C3%ADru%C4%8Dka%20Kalsen%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Jen%C3%ADk/Downloads/p%C5%99%C3%ADru%C4%8Dka%20Kalsen%20(2).pdf)
- [22] E. Totten, George. Steel Heat Treatment, Taylor & Francis Group,LLC, 2006

Seznam obrázků

<i>Obr. č. 1 - Rovnovážný binární diagram Fe-Fe₃C</i>	<i>8</i>
<i>Obr. č. 2 - Homogenizační žhání - pásmo žhacích teplot.....</i>	<i>9</i>
<i>Obr. č. 3 - Normalizační žhání - pásmo žhacích teplot.....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. č. 4 - Žhání na měkko - pásmo žhacích teplot.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. č. 5 - Pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. č. 6 - Průběh ochlazování při kalení do různých prostředí.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. č. 7 - Schéma průběhu martenzitického kalení.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. č. 8 - Schéma průběhu bainitického kalení (1 – izotermické zušlechťování, 2 – izotermické kalení).....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. č. 9 - a)b) - Povrch oduhličené perlitické oceli.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. č. 10 - a)b) - Přechodová oblast částečně oduhličené oceli.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. č. 11 - Koncentrační profily uhlíku dle rov(4), oduhličení.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. č. 12 - Závislost aktivity uhlíku v austenitu na jeho koncentraci.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. č. 13 - Schéma rovnovážného diagramu (a) železo - austenitotvorný prvek; (b) železo - feritotvorný prvek.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. č. 14 - Diagram IRA (a) a ARA (b) pro podeutektoidní legovanou ocel (plné čáry) a pro eutektoidní uhlíkovou ocel (čárkovaně). Pevnost strukturních složek vzniklých při IRA ve výše uvedených dvou ocelích (c).....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. č. 15 - Schéma nukleace a růst perlitu.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. č. 16 - Vliv obsahu uhlíku na teplotní oblasti výskytu horního a dolního bainitu</i>	<i>25</i>
<i>Obr. č. 17 - Struktura horního a dolního bainitu.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. č. 18 - Schéma martenzitické křivky oceli.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. č. 19 - Vliv uhlíku v austenitu na teploty M_s a M_f uhlíkových ocelí.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. č. 20 - IRA digramy, a) eutektoidní, b) podeutektoidní a c) nadeutektoidní ocel.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. č. 21 - Schematický ARA diagram.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. č. 22 - Surový odlitek spodního beranu.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. č. 23 - Vtoková soustava.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. č. 24 - Žhací pec MAERZ P91.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. č. 25 - Elektrická vozová pec.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. č. 26 - Nádoby s kalicí lázní - Voda, olej.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. č. 27 - Nádoby s kalicí lázní - Voda, olej.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. č. 28 - Grafické znázornění tepelného zpracování odlitků.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. č. 29 - Provedení rozřezu a označení zkušební bloku z HR17060.....</i>	<i>34</i>

<i>Obr. č. 30 - Provedení rozřezu a označení zkušebního bloku z HR18101</i>	<i>34</i>
<i>Obr. č. 31 - Rozřezový plán zkušebního bloku.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. č. 32 - Ukázka provedení chemické analýzy na vzorcích ze zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. č. 33 - Detail značení chemických analýz na vzorcích ze zk. bloku z HR18101</i>	<i>36</i>
<i>Obr. č. 34 - Laboratorní kotoučová pila Struers Discotom-6.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. č. 35 - Schematické znázornění vzdálenosti pro pořízení mikrostruktur od povrchu zkušebního vzorku (přilitého zk. bloku).....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. č. 36 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. č. 37 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. č. 38 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. č. 39 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-4 (15 mm od povrchu zk. bloku) Zvětšení 200x.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. č. 40 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5B-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. č. 41 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1B-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. č. 42 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1B-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. č. 43 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1B-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. č. 44 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1B-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. č. 45 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1B-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. č. 46 - Zkušební vzorky pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. č. 47 - Detail značení chemických analýz na vzorcích ze zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. č. 48 - Schematické znázornění vzdálenosti pro pořízení mikrostruktur od povrchu zkušebního vzorku (přilitého zk. bloku).....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. č. 49 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. č. 50 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. č. 51 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>57</i>

<i>Obr. č. 52 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. č. 53 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5B-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. č. 54 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1B-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. č. 55 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1B-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.</i>	<i>59</i>
<i>Obr. č. 56 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1B-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.</i>	<i>60</i>
<i>Obr. č. 57 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1B-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.</i>	<i>60</i>
<i>Obr. č. 58 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1B-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.</i>	<i>61</i>
<i>Obr. č. 59 - Zkušební vzorky pro zkoušku tahem a zkoušku rázem v ohybu.....</i>	<i>61</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. č. 1 - Hodnoty tvrdosti po kalení u různých ocelí.....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. č. 2 - Hodnoty tvrdosti po popouštění u různých ocelí.....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. č. 3 - Přehled fázových transformací.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. č. 4 - Chemické složení taveb pro odlitek č. 18101.....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. č. 5 - Chemické složení taveb pro odlitek č. 17060.....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. č. 6 - Specifikace vozové pece MAERZ P91.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. č. 7 - Specifikace el. žihací pece.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. č. 8 - Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. č. 9 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. č. 10 - Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. č. 11 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. č. 12 - Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. č. 13 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. č. 14 - Mechanické hodnoty u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. č. 15 - Hodnoty vrubové houževnatosti u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>66</i>

Seznam Grafů

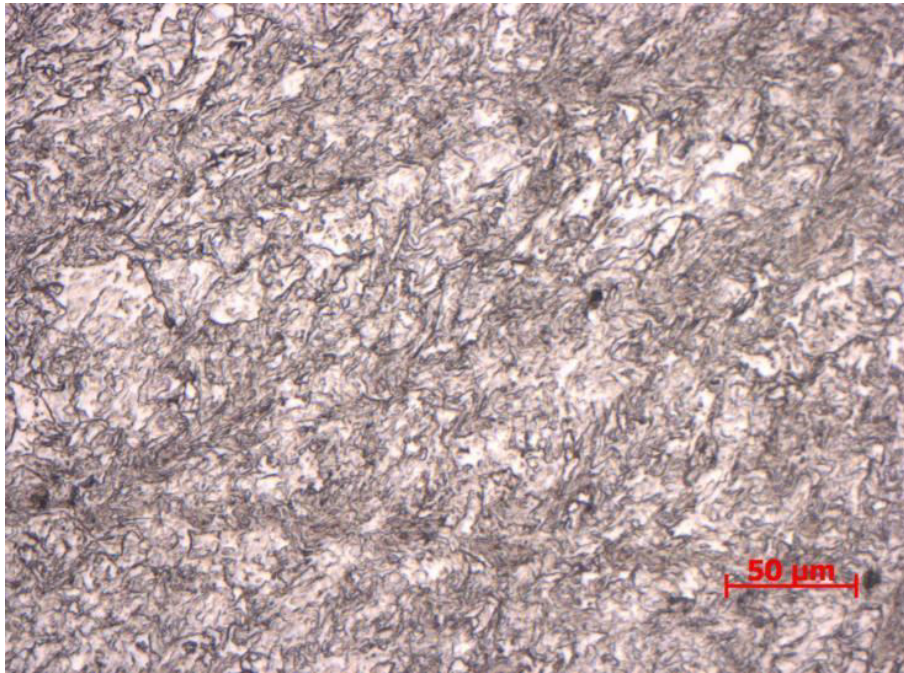
<i>Graf č. 1 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.....</i>	<i>37</i>
<i>Graf č. 2 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.....</i>	<i>37</i>
<i>Graf č. 3 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf č. 4 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf č. 5 - Dosažené hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>46</i>
<i>Graf č. 6 - Dosažené hodnoty meze pevnosti R_m u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>46</i>
<i>Graf č. 7 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku HR18101.....</i>	<i>46</i>
<i>Graf č. 8 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>47</i>
<i>Graf č. 9 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>47</i>
<i>Graf č. 10 - Dosažené hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>48</i>
<i>Graf č. 11 - Dosažené hodnoty meze pevnosti R_m u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>48</i>
<i>Graf č. 12 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku HR18101.....</i>	<i>49</i>
<i>Graf č. 13 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>49</i>
<i>Graf č. 14 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>50</i>
<i>Graf č. 15 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu $P1A$ ze zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>50</i>
<i>Graf č. 16 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu $P1B$ ze zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf č. 17 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu $P1C$ ze zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf č. 18 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu $P5A$ ze zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf č. 19 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu $P5B$ ze zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>52</i>
<i>Graf č. 20 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu $P5C$ ze zk. bloku z HR18101.....</i>	<i>52</i>
<i>Graf č. 21 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.....</i>	<i>54</i>
<i>Graf č. 22 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku.....</i>	<i>54</i>
<i>Graf č. 23 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.....</i>	<i>55</i>
<i>Graf č. 24 - Grafické znázornění obsahu uhlíku v jednotlivých vzorcích zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku.....</i>	<i>55</i>
<i>Graf č. 25 - Dosažené hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>62</i>
<i>Graf č. 26 - Dosažené hodnoty meze pevnosti R_m u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>63</i>
<i>Graf č. 27 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>63</i>

<i>Graf č. 28 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>63</i>
<i>Graf č. 29 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>64</i>
<i>Graf č. 30 - Dosažené hodnoty meze pevnosti $R_{p0,2}$ u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>65</i>
<i>Graf č. 31 - Dosažené hodnoty meze pevnosti R_m u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>65</i>
<i>Graf č. 32 - Dosažené hodnoty tažnosti A_5 u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>66</i>
<i>Graf č. 33 - Dosažené hodnoty kontrakce Z u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>66</i>
<i>Graf č. 34 - Dosažené hodnoty vrubové houževnatosti KV u zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>67</i>
<i>Graf č. 35 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu P1A ze zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>67</i>
<i>Graf č. 36 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu P1B ze zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf č. 37 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu P1C ze zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf č. 38 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu P5A ze zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf č. 39 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu P5B ze zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>69</i>
<i>Graf č. 40 - Závislost mikrotvrdosti výbrusu P5C ze zk. bloku z HR17060.....</i>	<i>69</i>

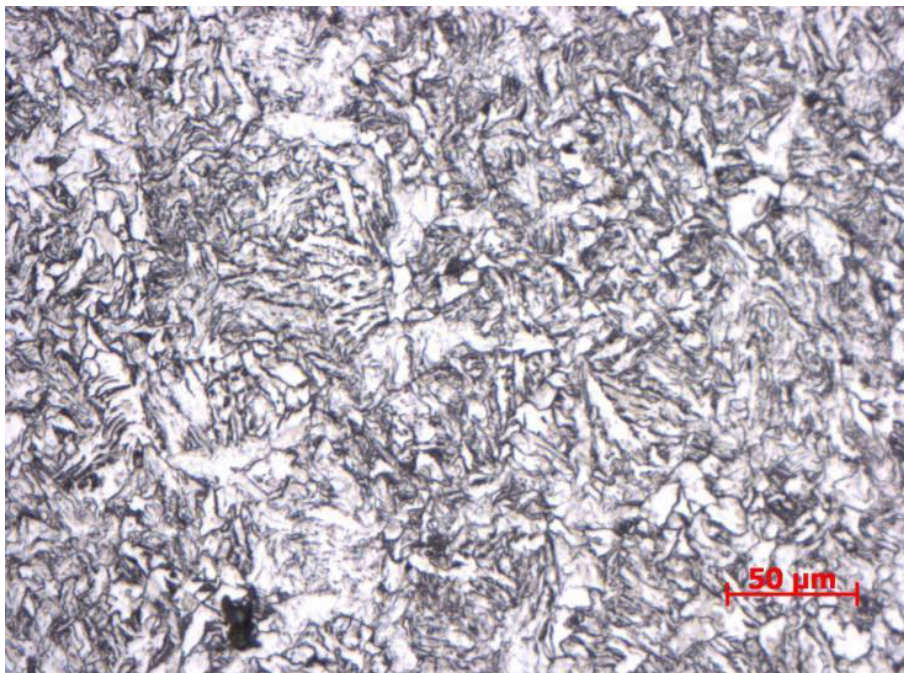
Příloha

Mikrostruktury P1A,P1C, P5A,P5C ze zkušebních bloků z HR18101 a HR17060

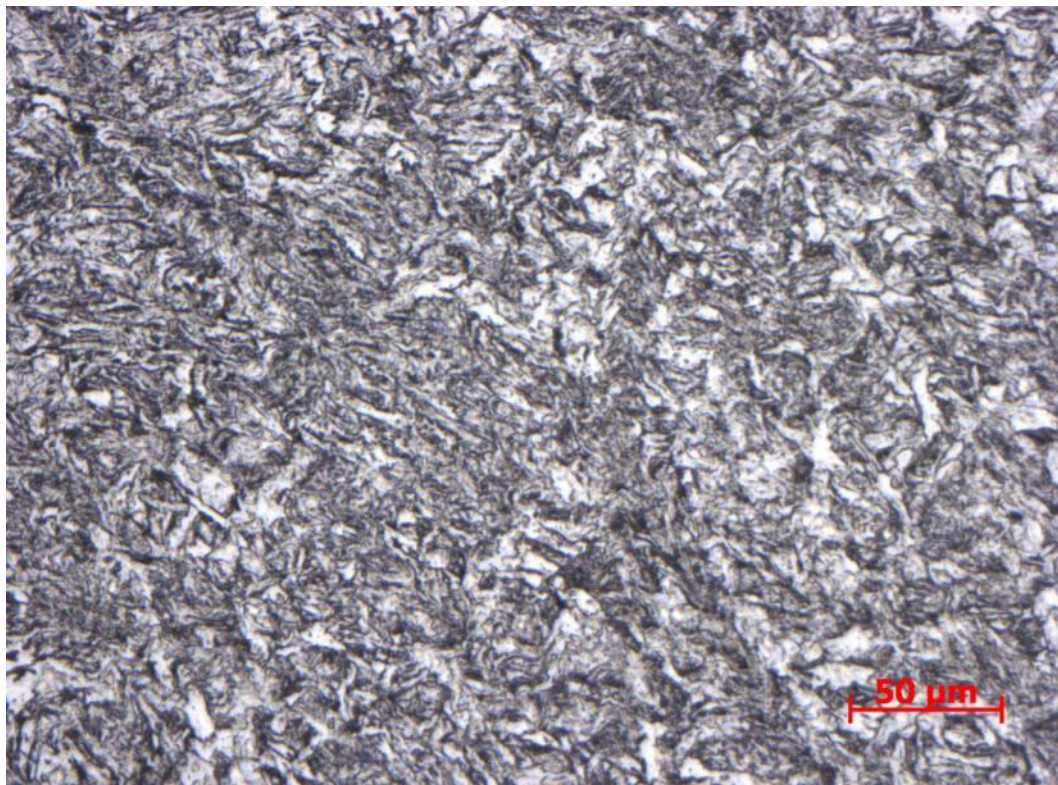
Vzorek P1A ze zkušebního bloku z HR18101



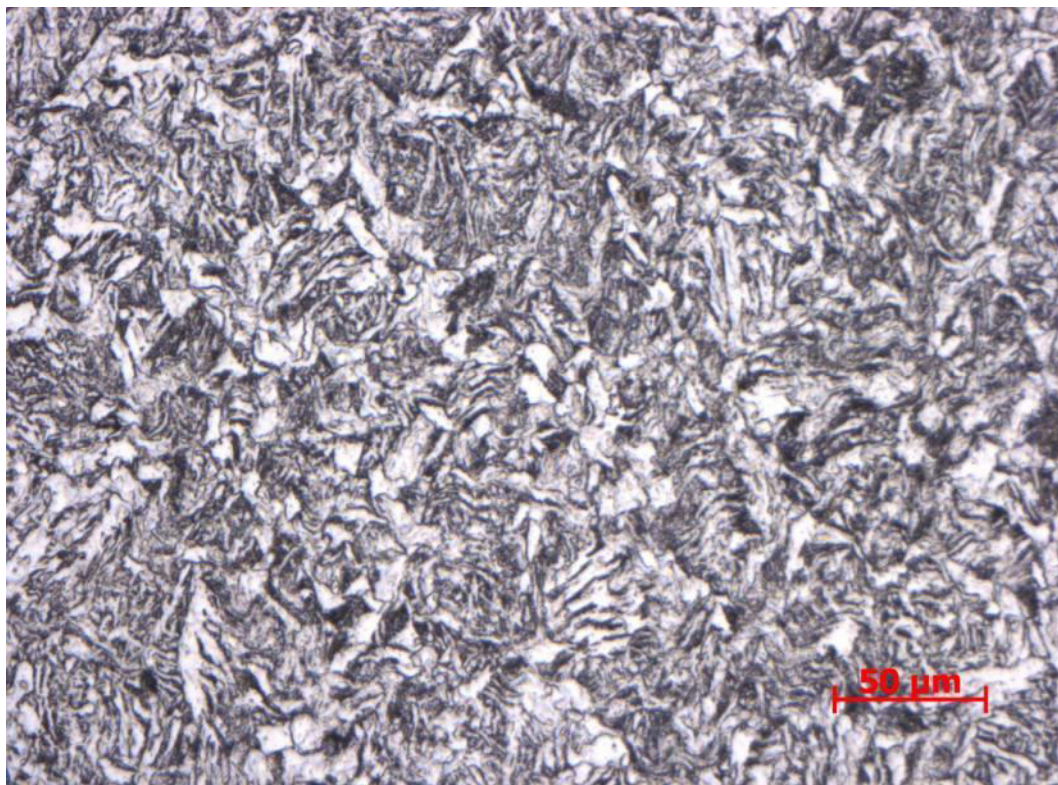
Obr. č. 60 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5A-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



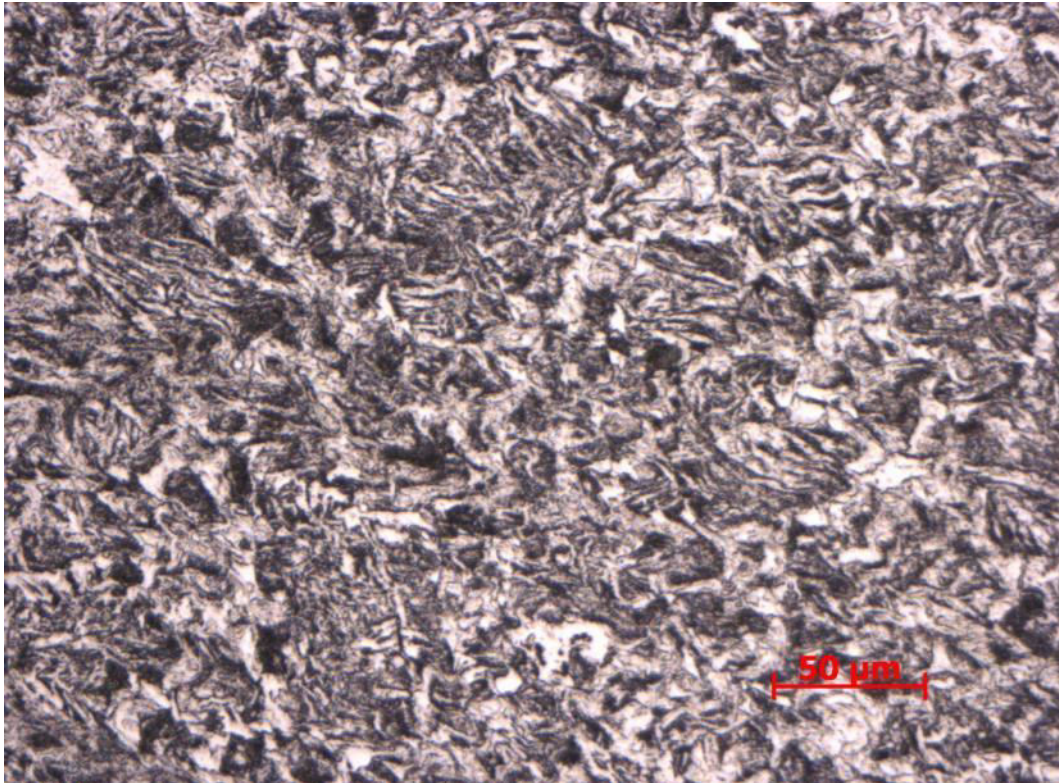
Obr. č. 61 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5A-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 62 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5A-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura

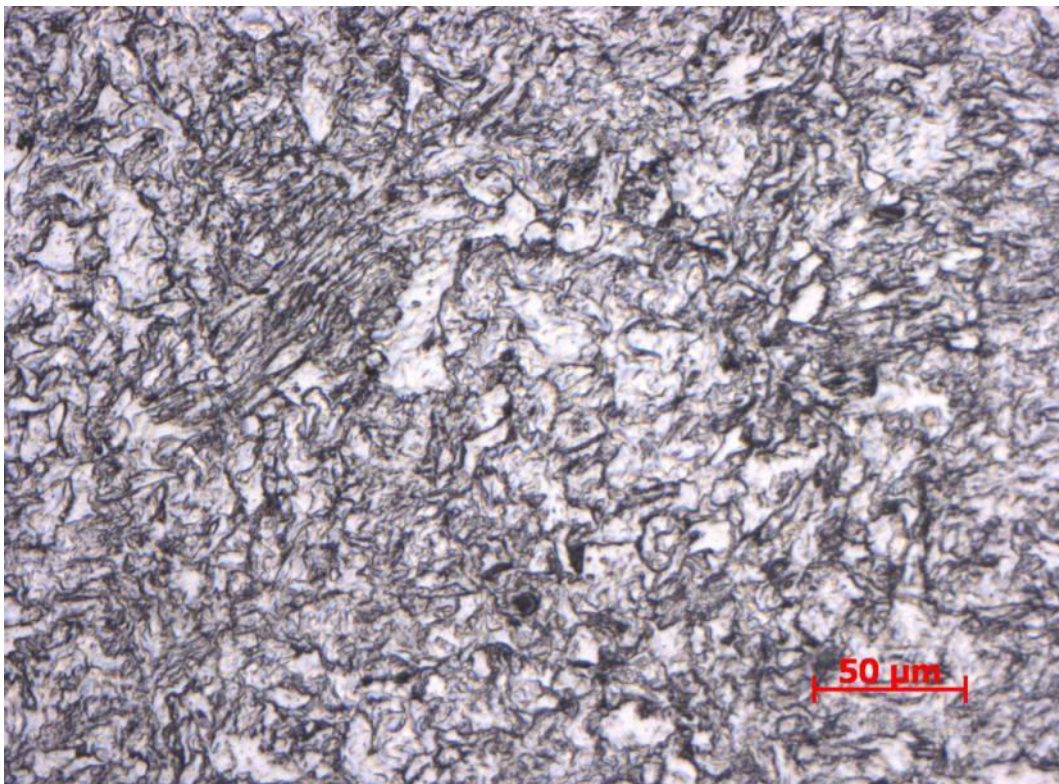


Obr. č. 63 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5A-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura

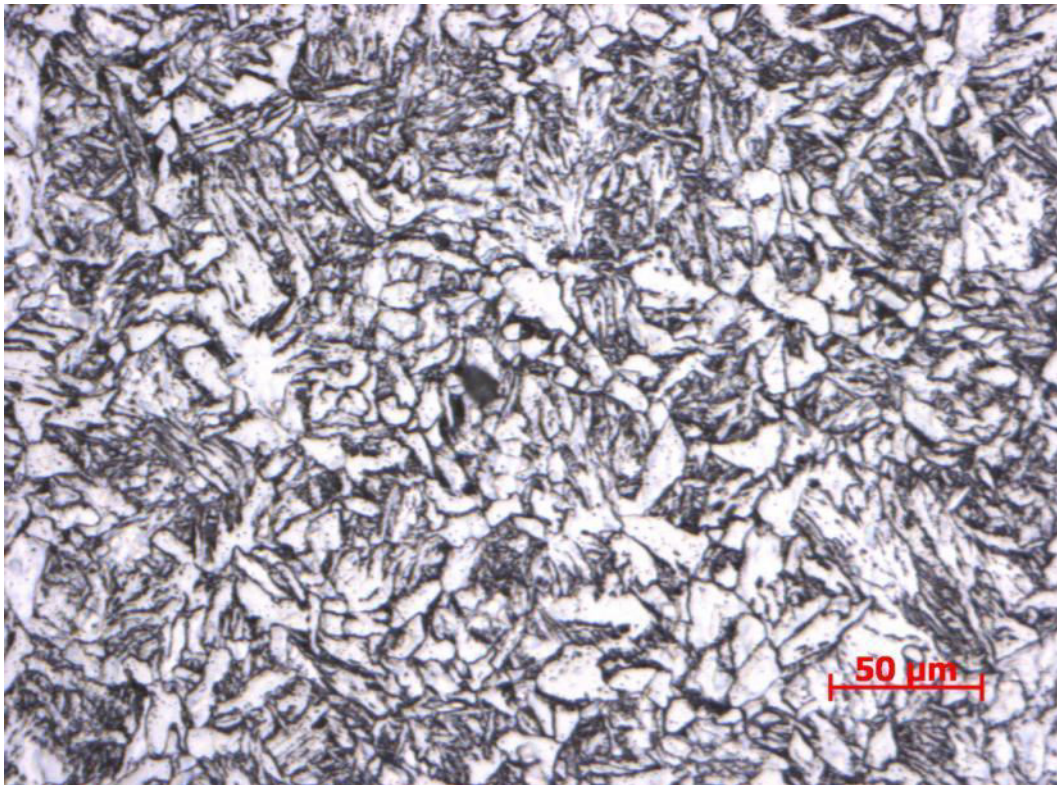


Obr. č. 64 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5A-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

Vzorek P5C ze zkušebního bloku z HR18101

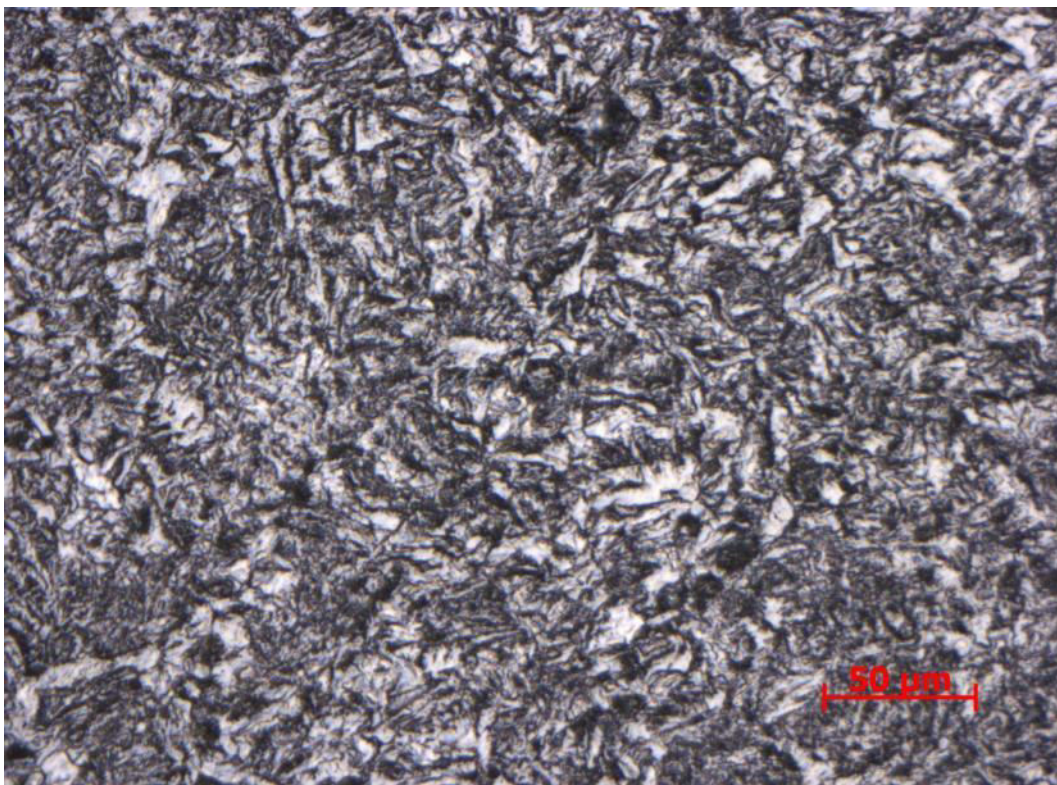


Obr. č. 65 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5C-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



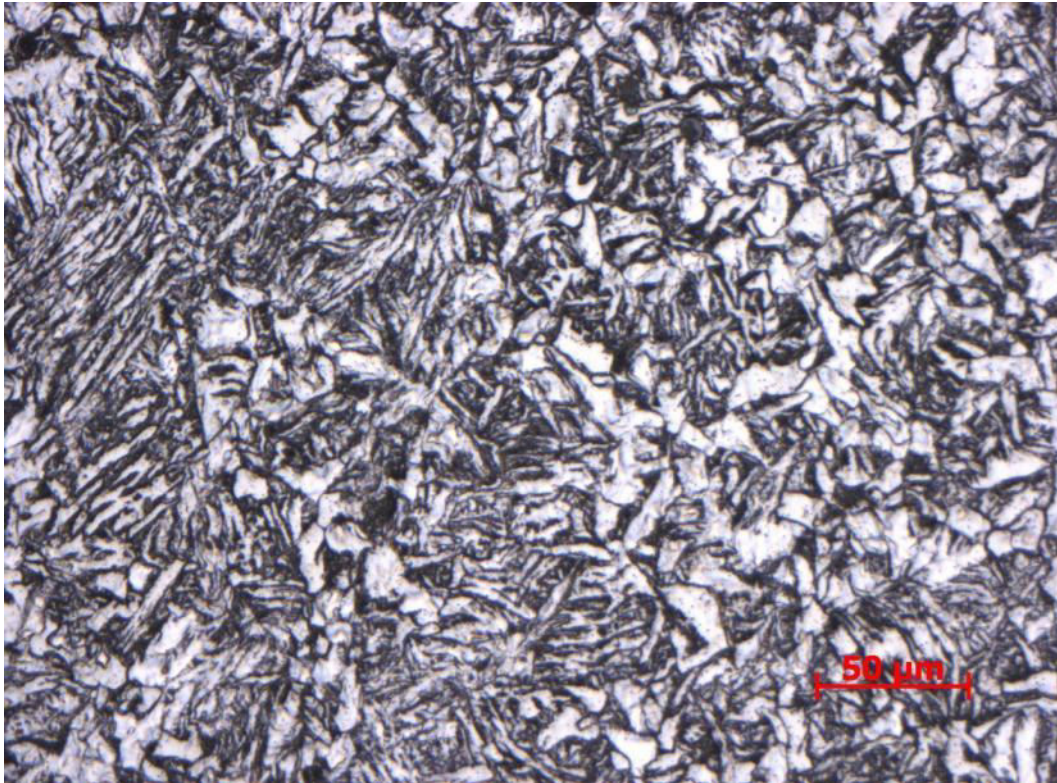
Obr. č. 66 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5C-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.

Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura

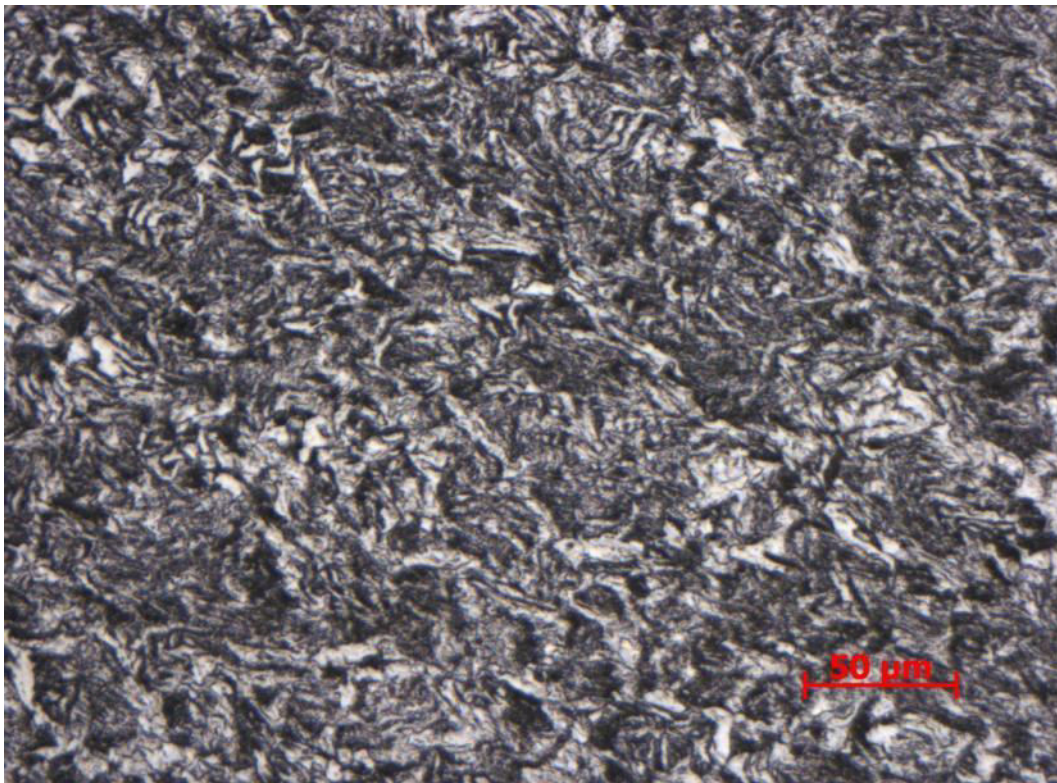


Obr. č. 67 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5C-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.

Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

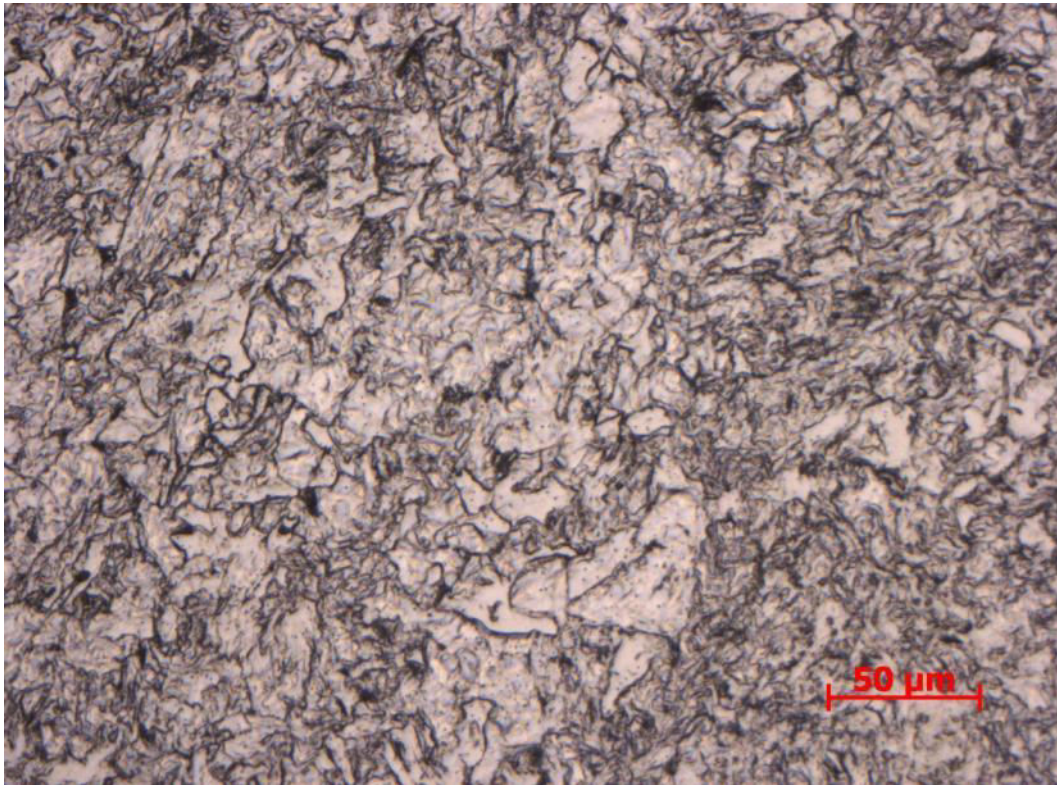


Obr. č. 68 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5C-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

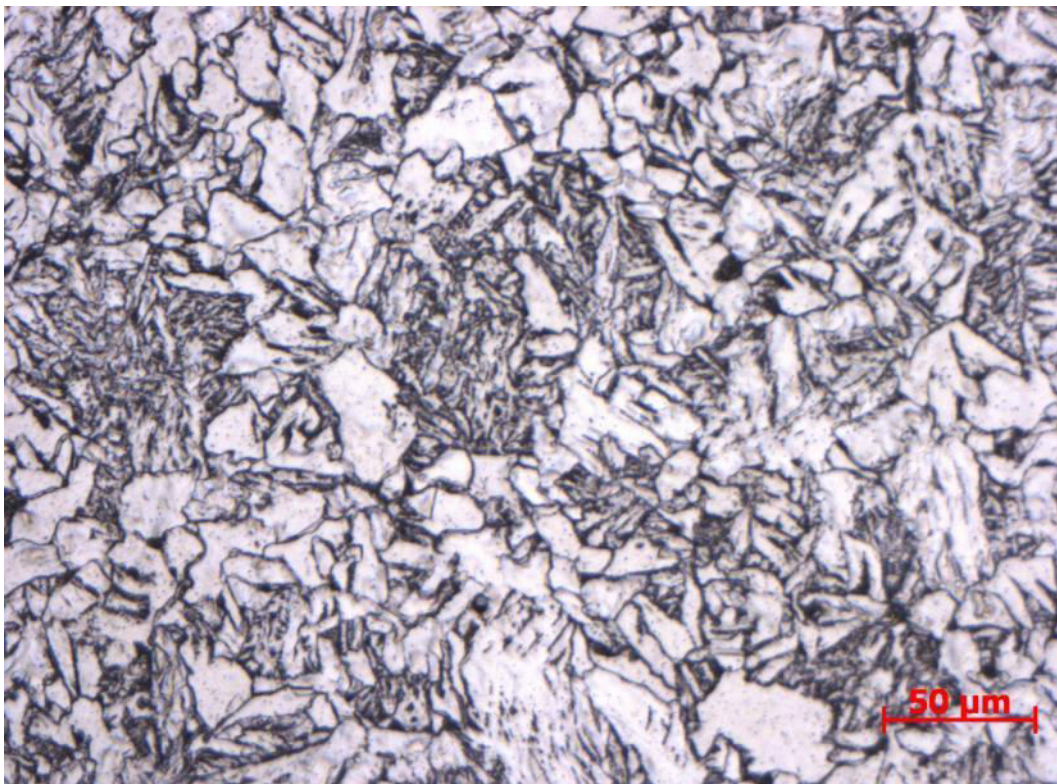


Obr. č. 69 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P5C-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

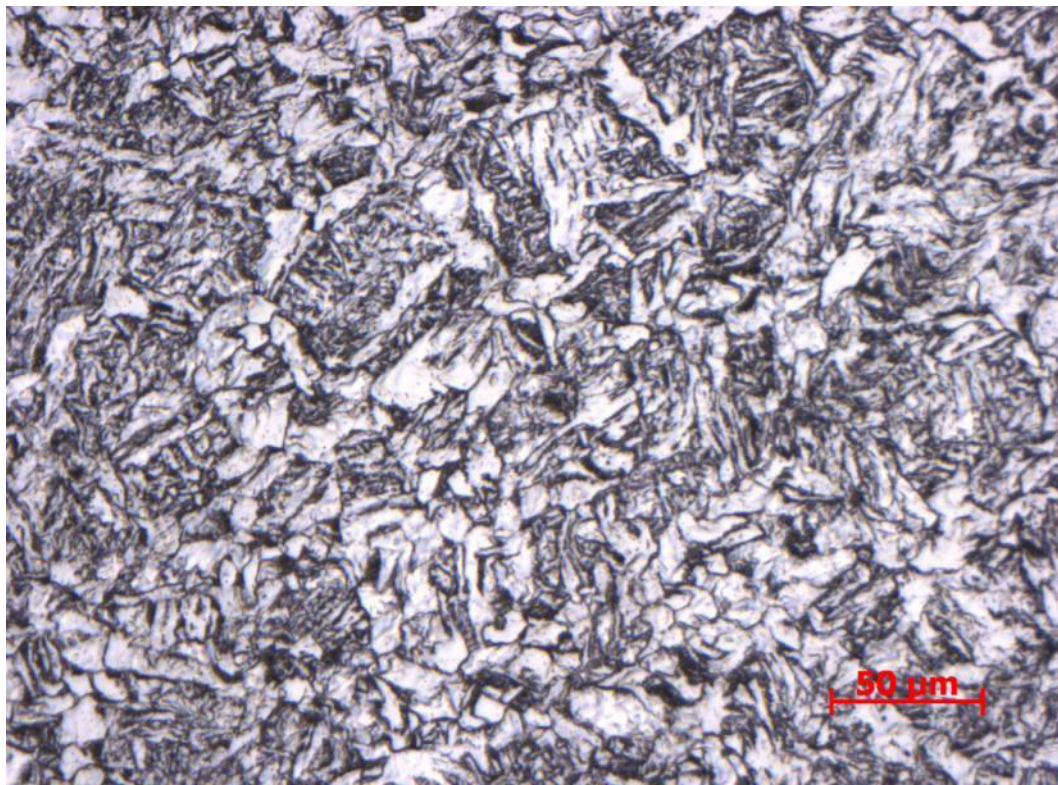
Vzorek P1A ze zkušebního bloku z HR18101



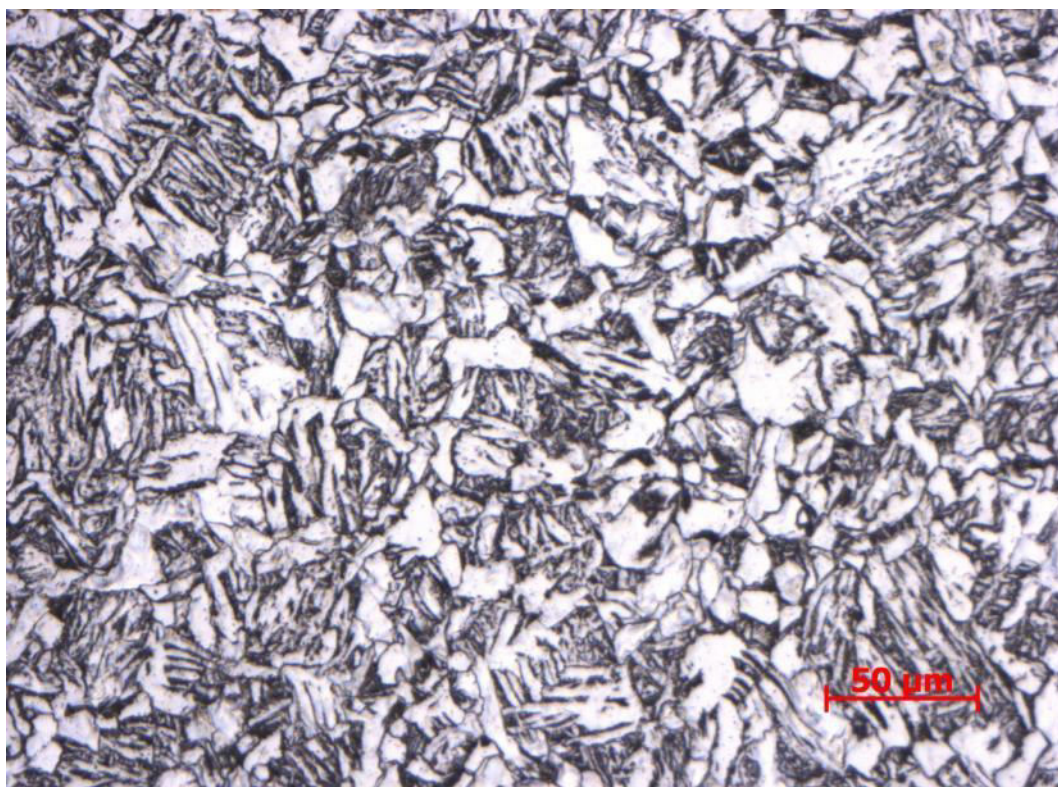
Obr. č. 70 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1A-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



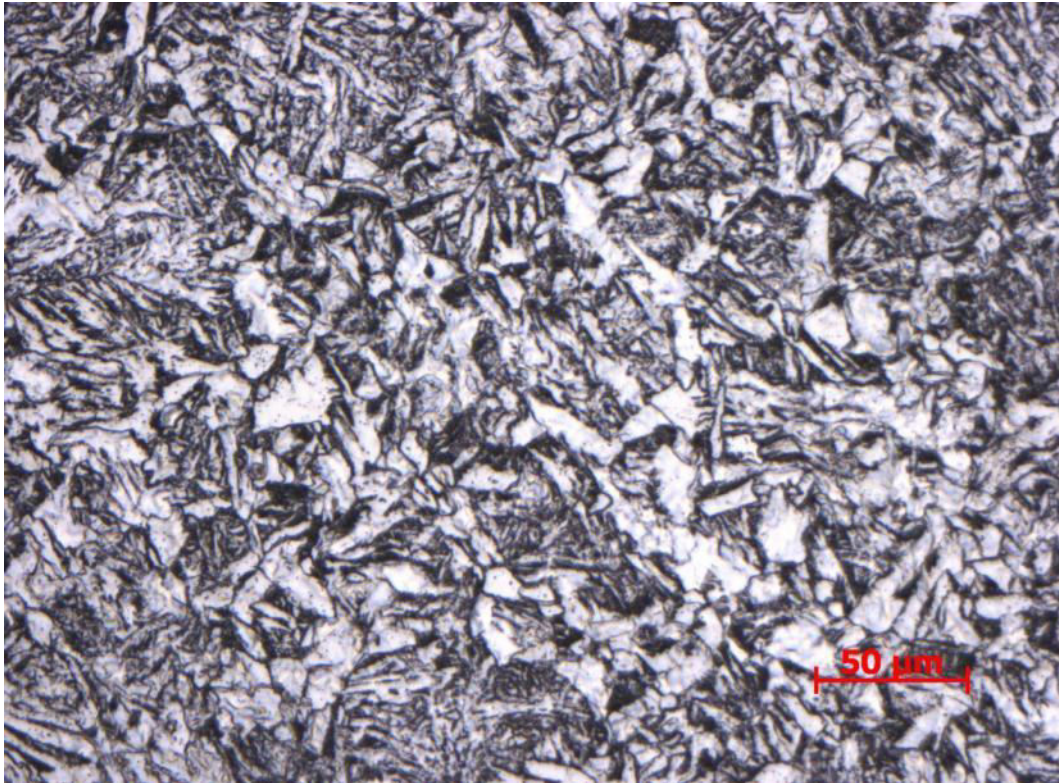
Obr. č. 71 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1A-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 72 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIA-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura

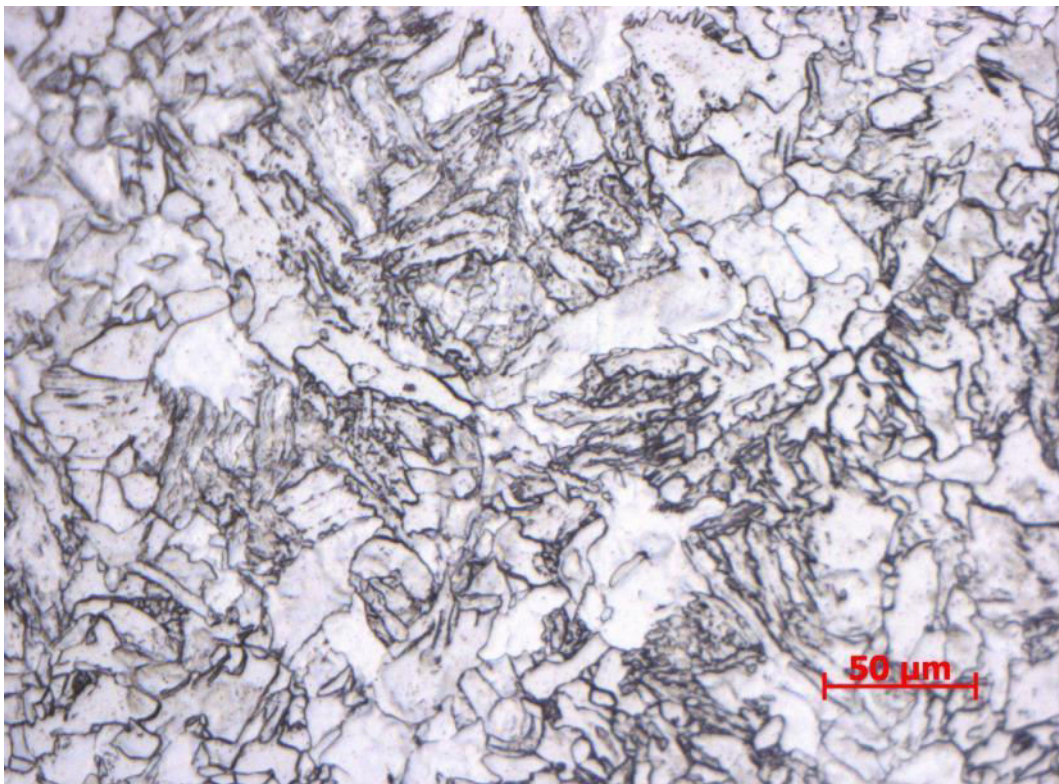


Obr. č. 73 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIA-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura

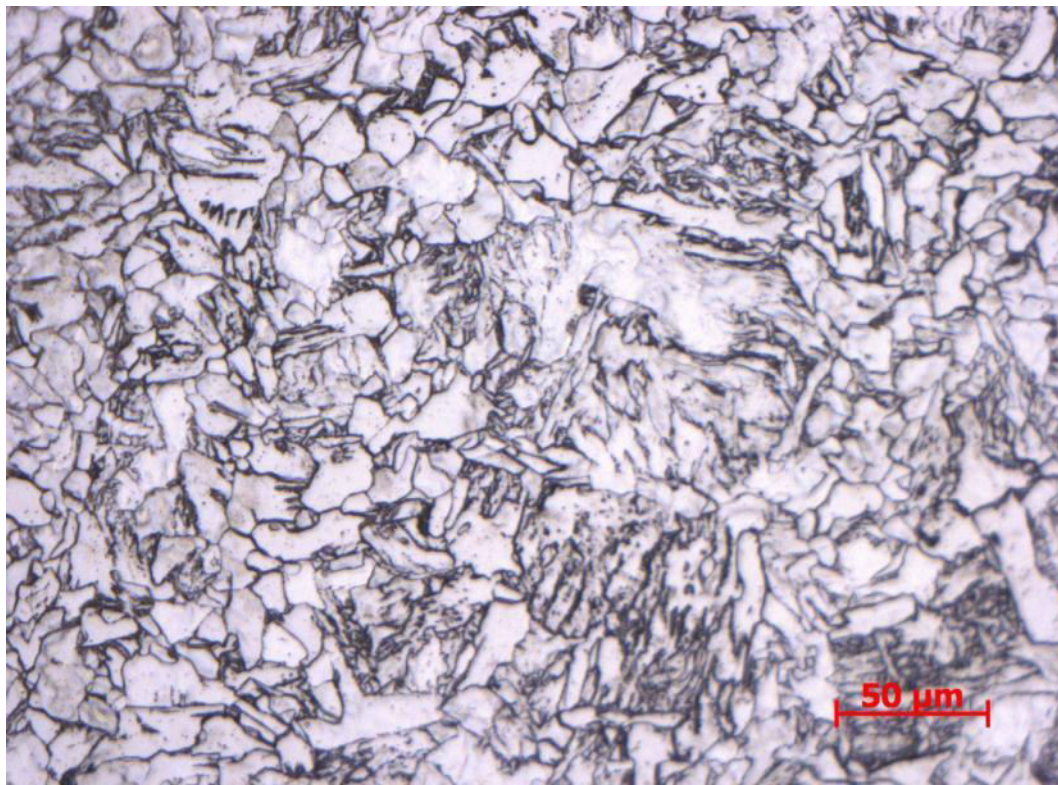


Obr. č. 74 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1A-5 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

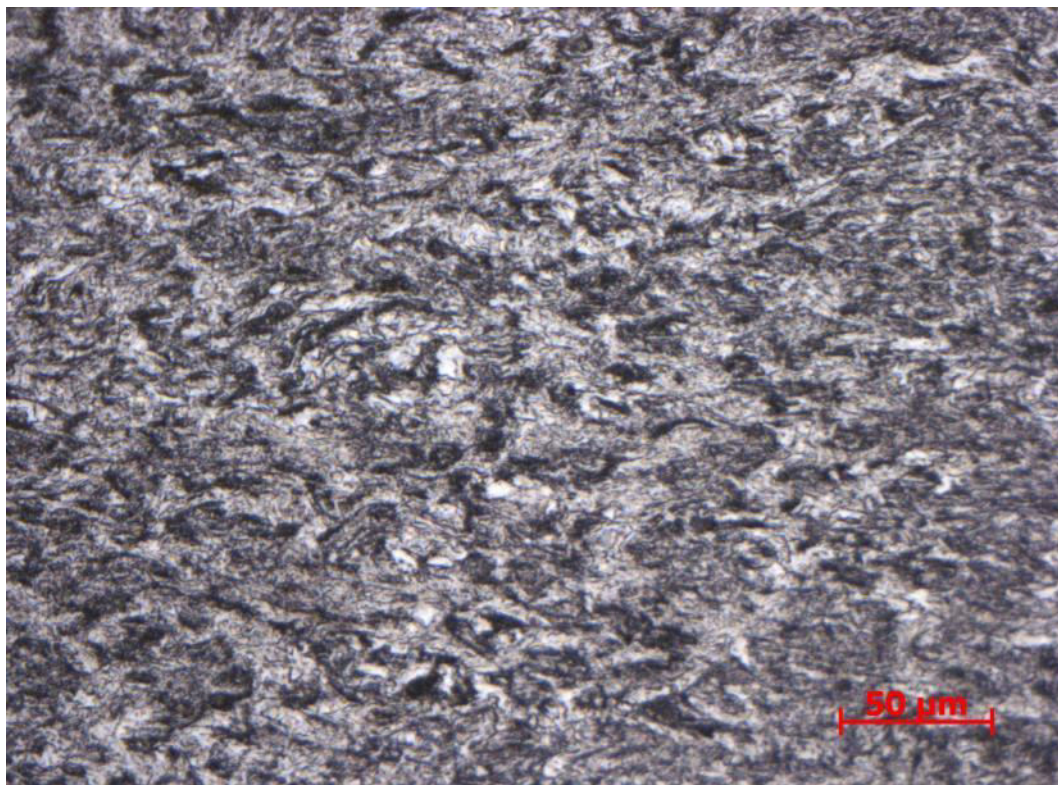
Vzorek P1C ze zkušebního bloku z HR18101



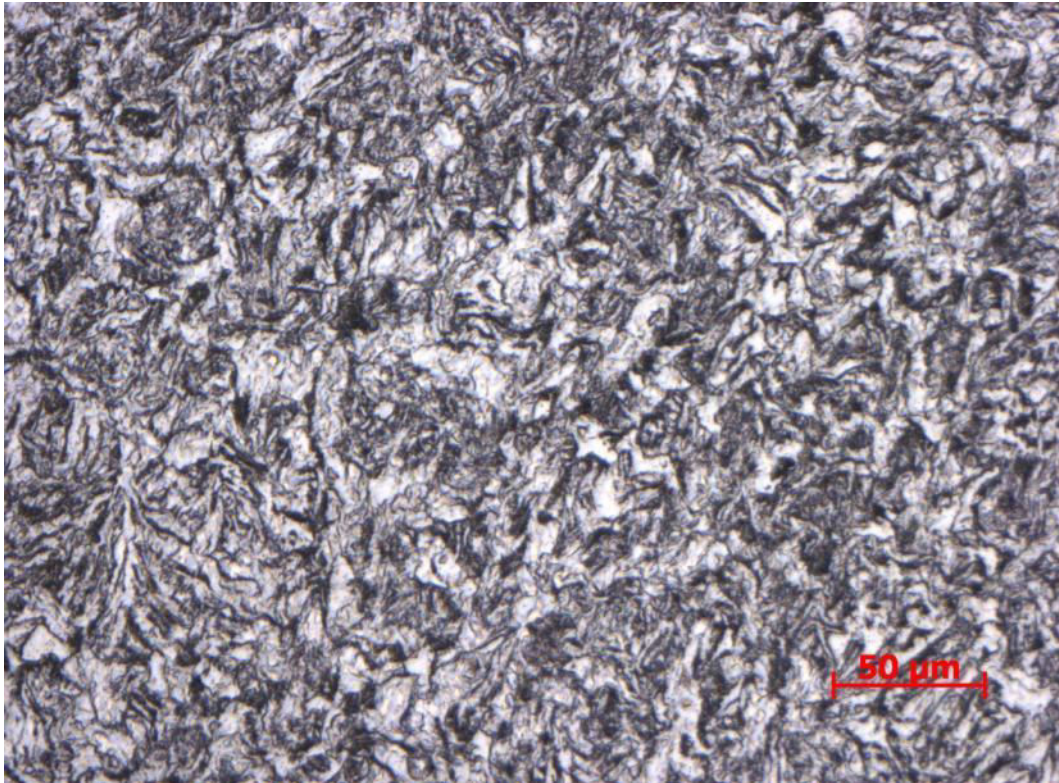
Obr. č. 75 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - P1C-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



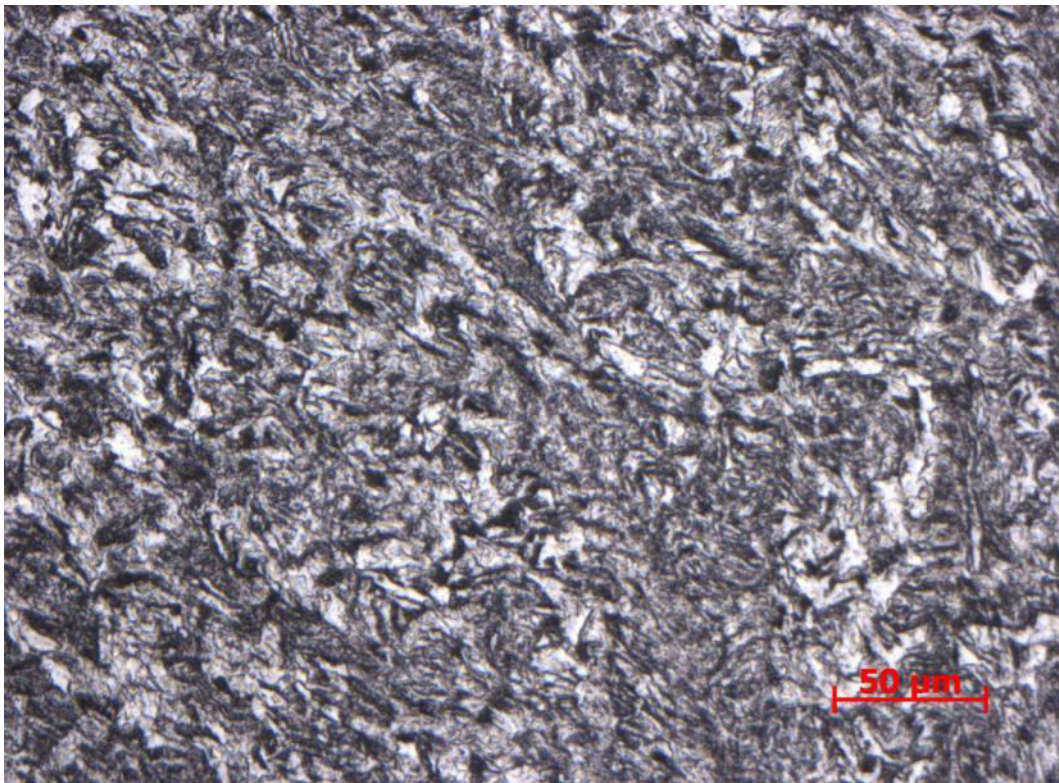
Obr. č. 76 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIC-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuj



Obr. č. 77 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIC-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

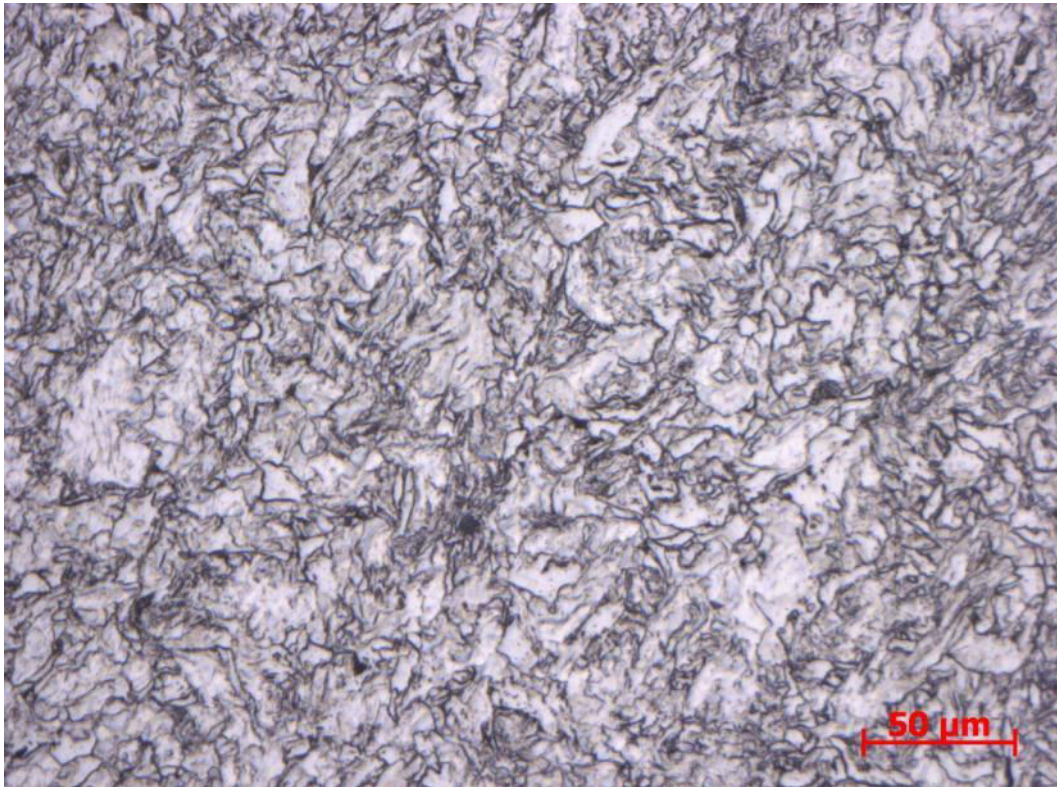


Obr. č. 78 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIC-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

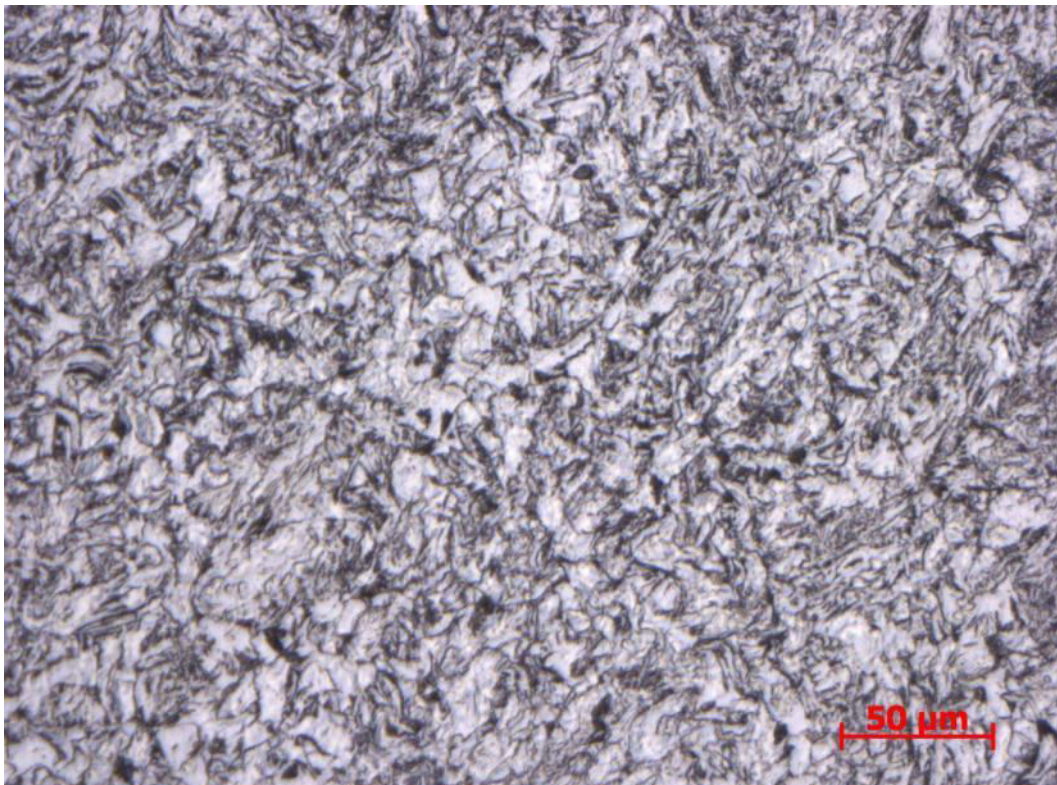


Obr. č. 79 - Mikrostruktura zk. bloku z HR18101 - PIC-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

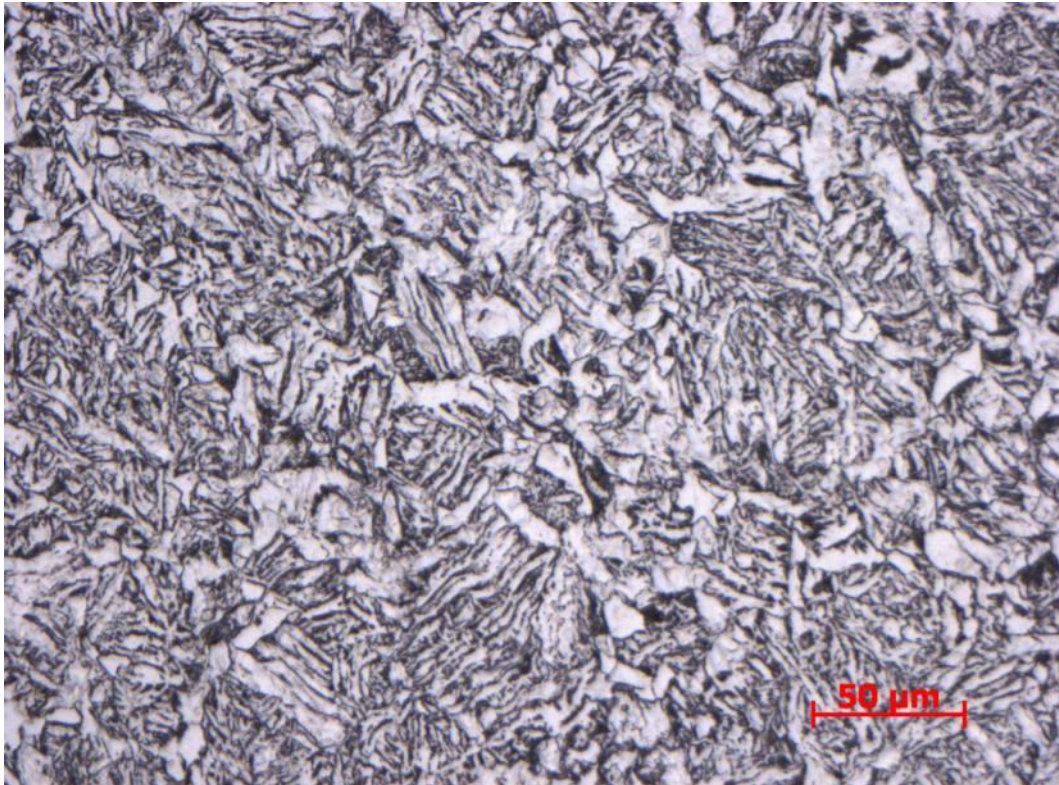
Vzorek P5A ze zkušebního bloku z HR17060



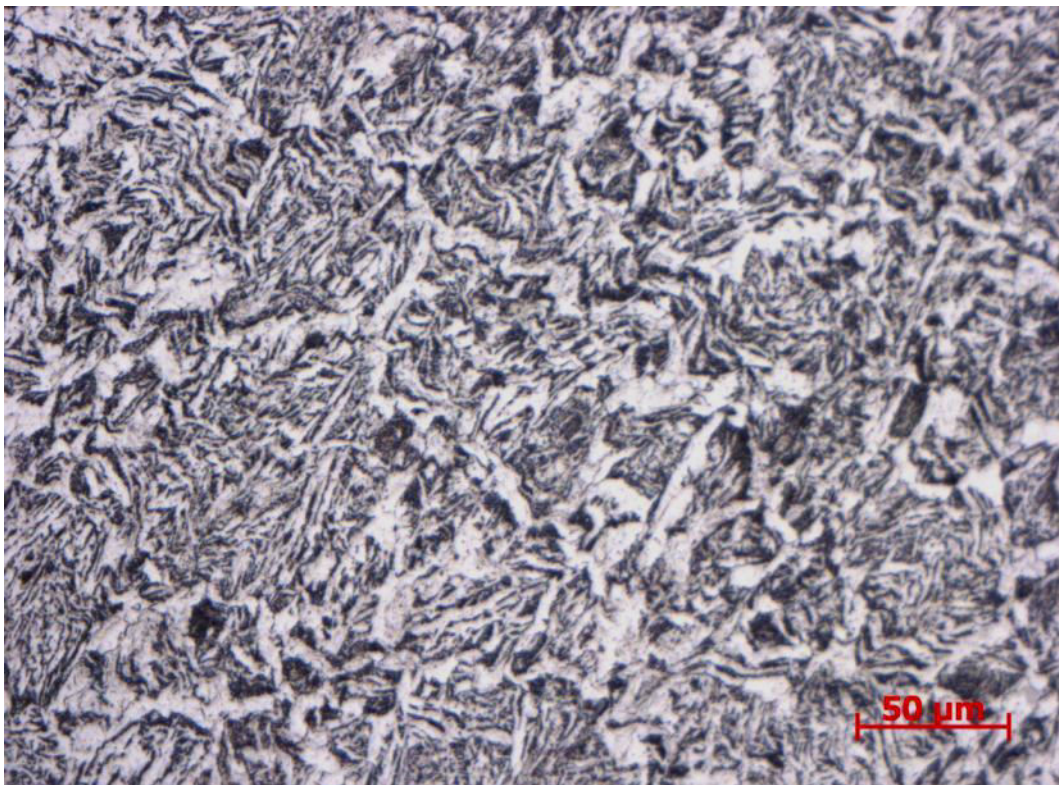
Obr. č. 80 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5A-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



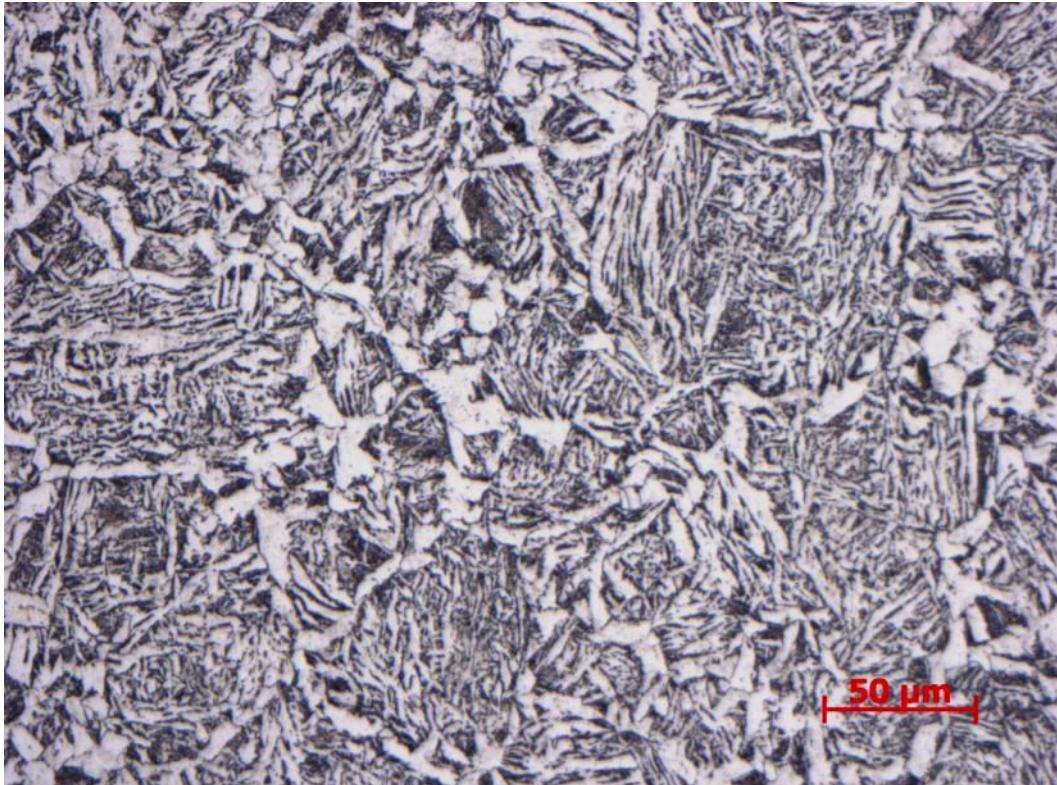
Obr. č. 81 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5A-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 82- Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5A-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



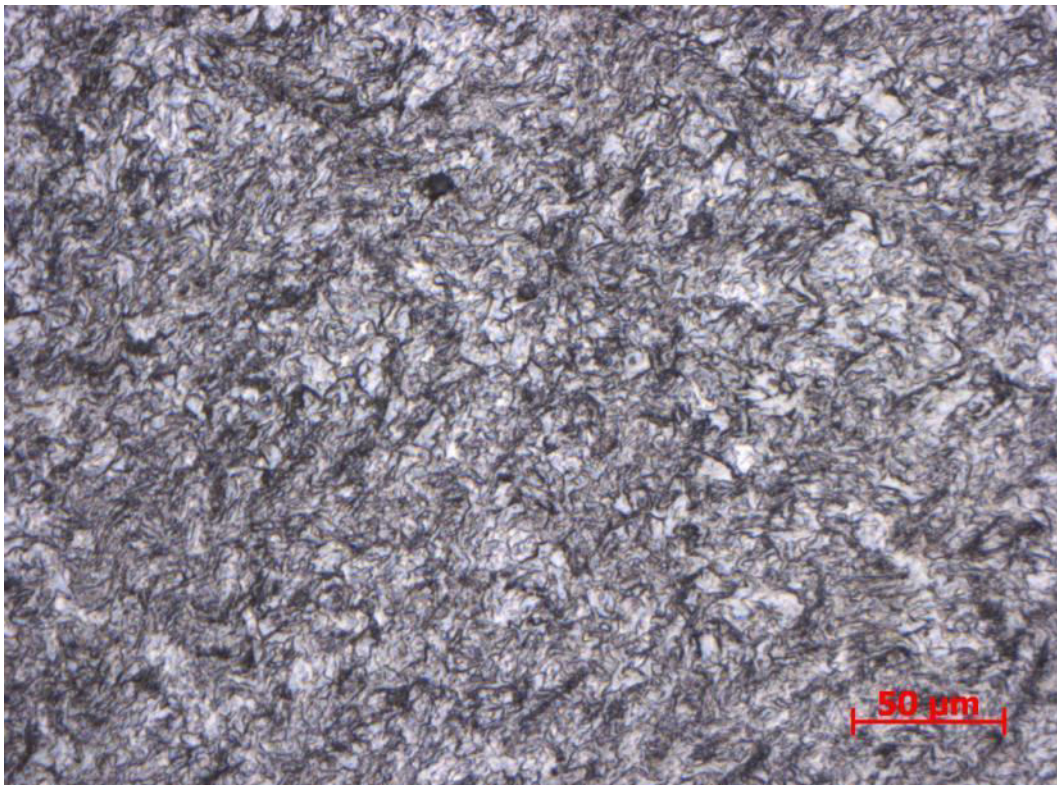
Obr. č. 83 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5A-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury



Obr. č. 84 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5A-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.

Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

Vzorek P5C ze zkušebního bloku z HR17060

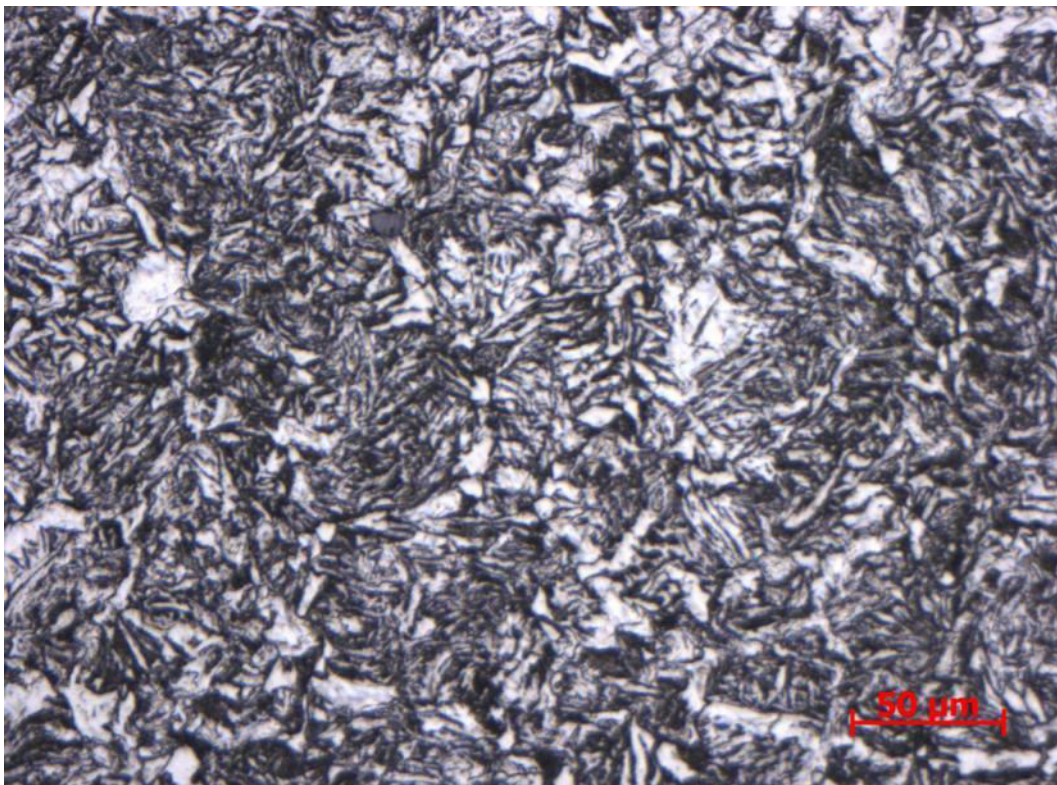


Obr. č. 85 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5C-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.

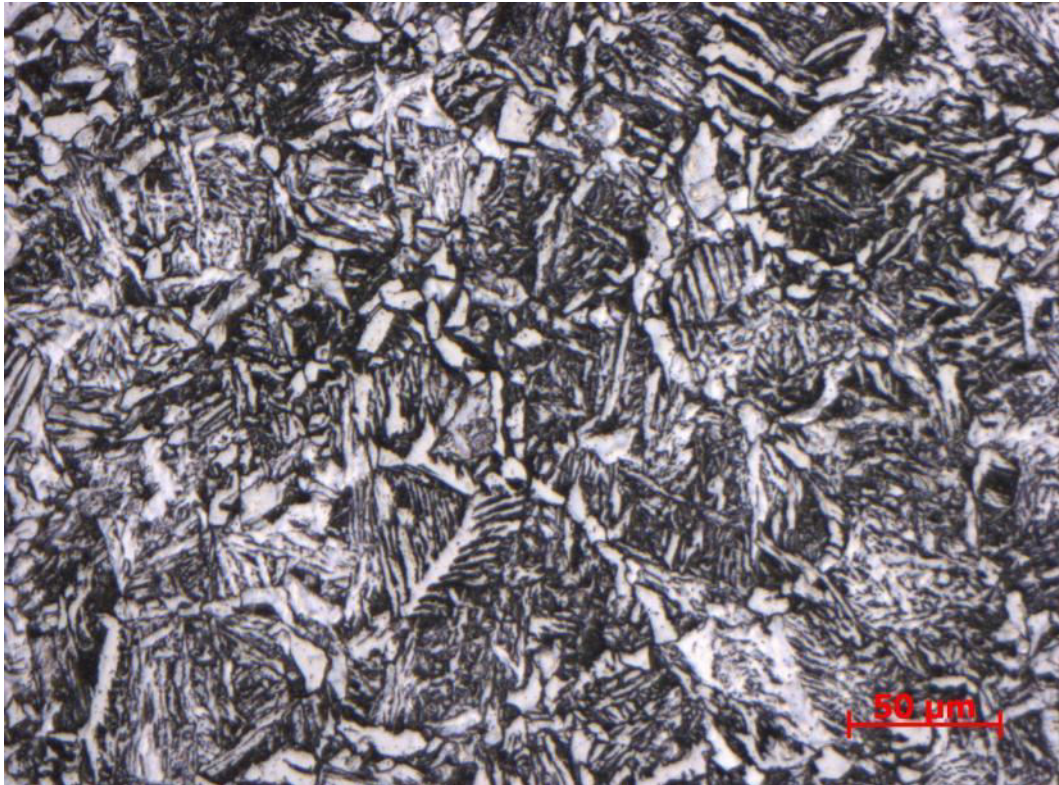
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



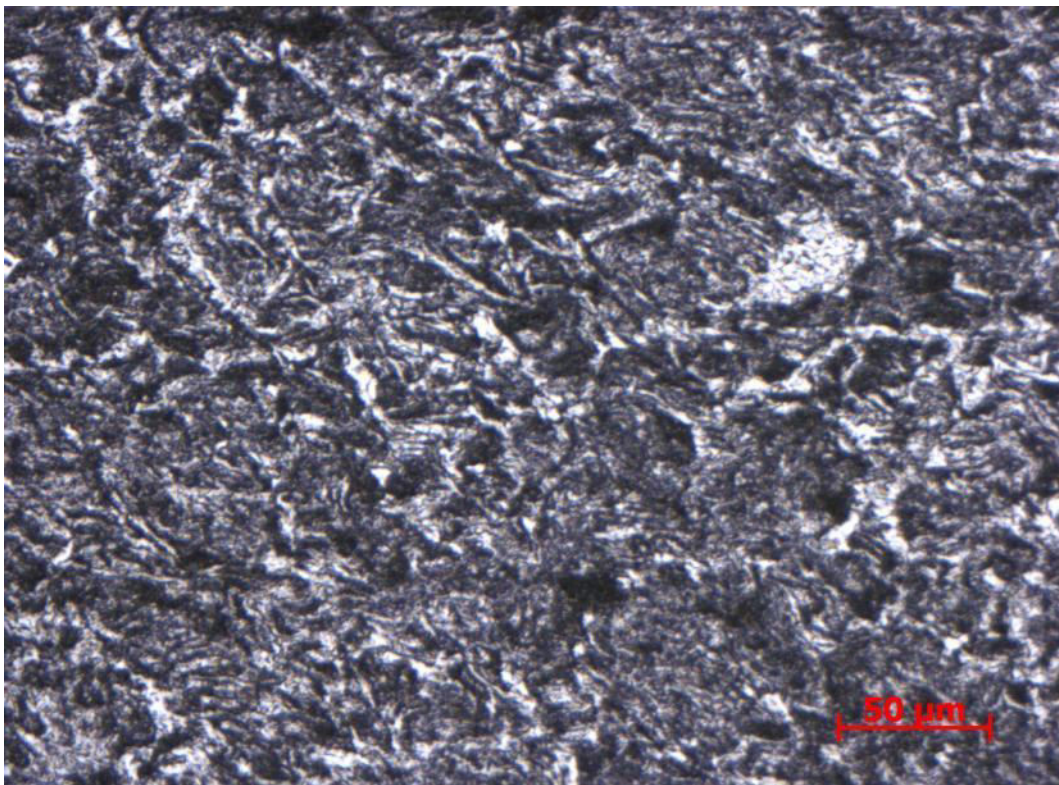
Obr. č. 86 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5C-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 87 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5C-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

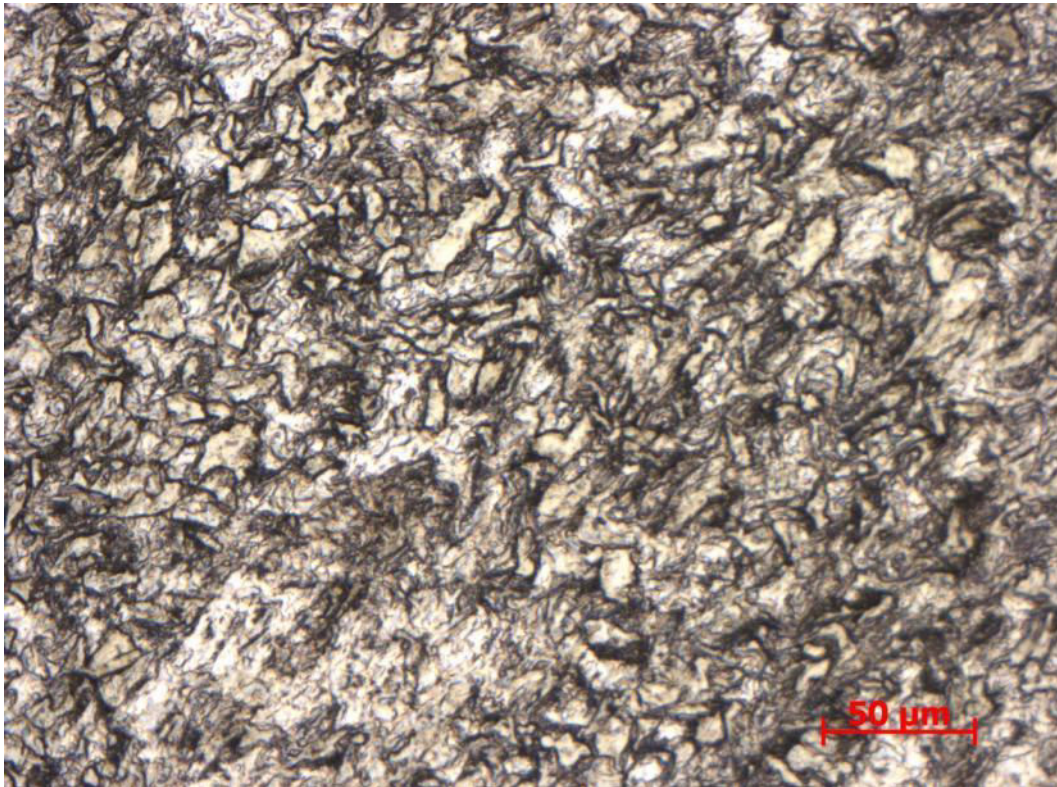


Obr. č. 88 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5C-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

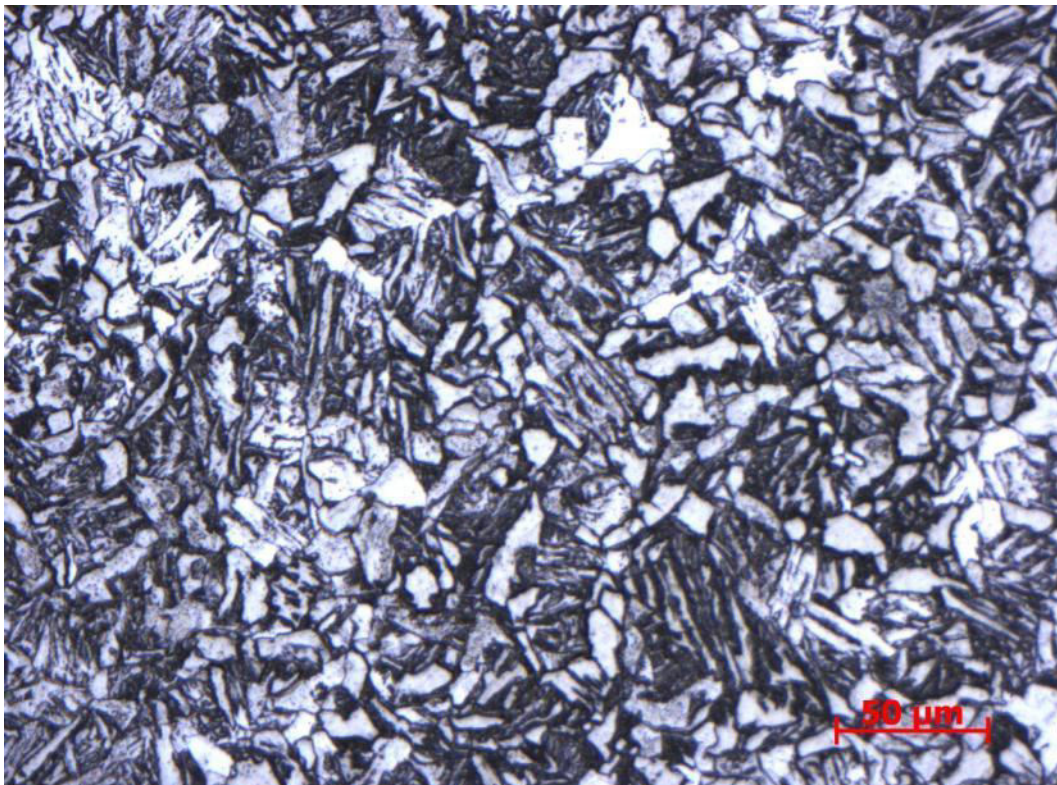


Obr. č. 89 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P5C-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

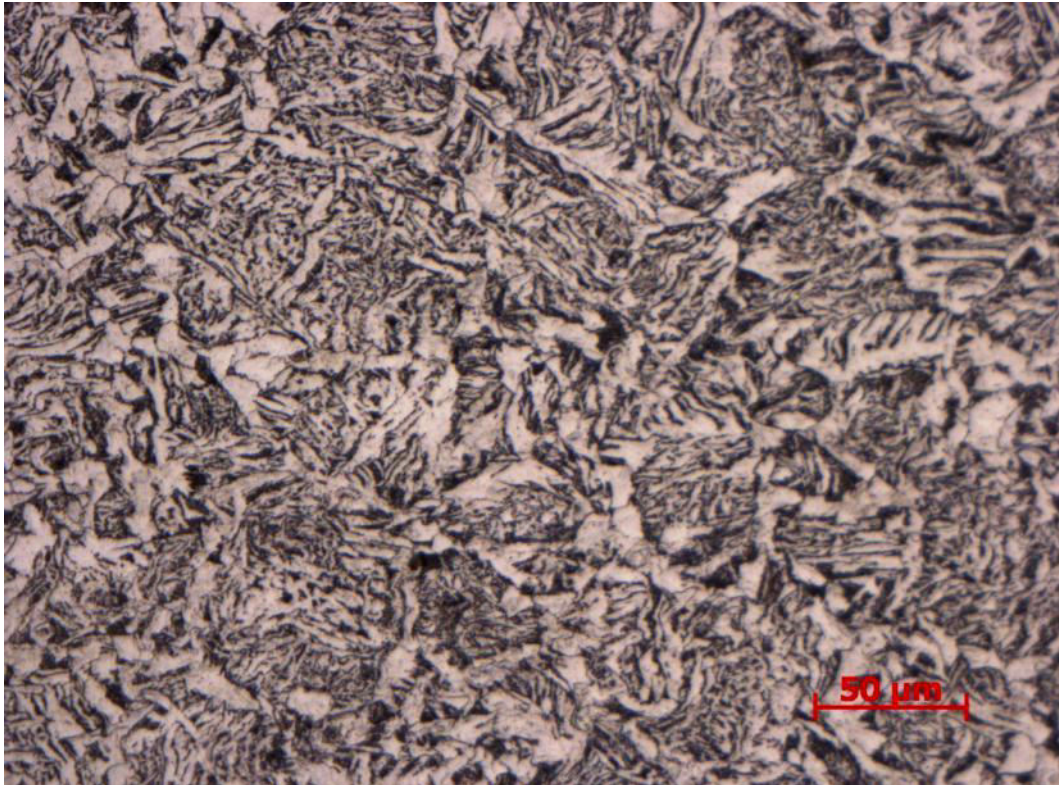
Vzorek P1A ze zkušebního bloku z HR17060



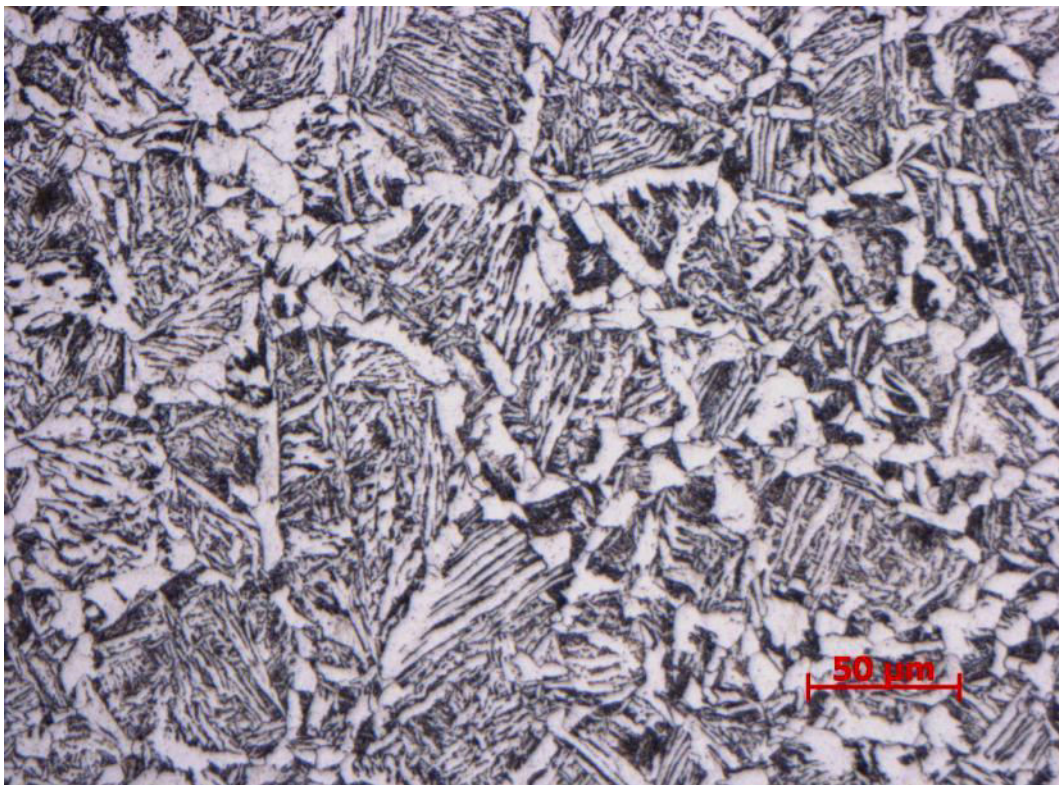
Obr. č. 90 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1A-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



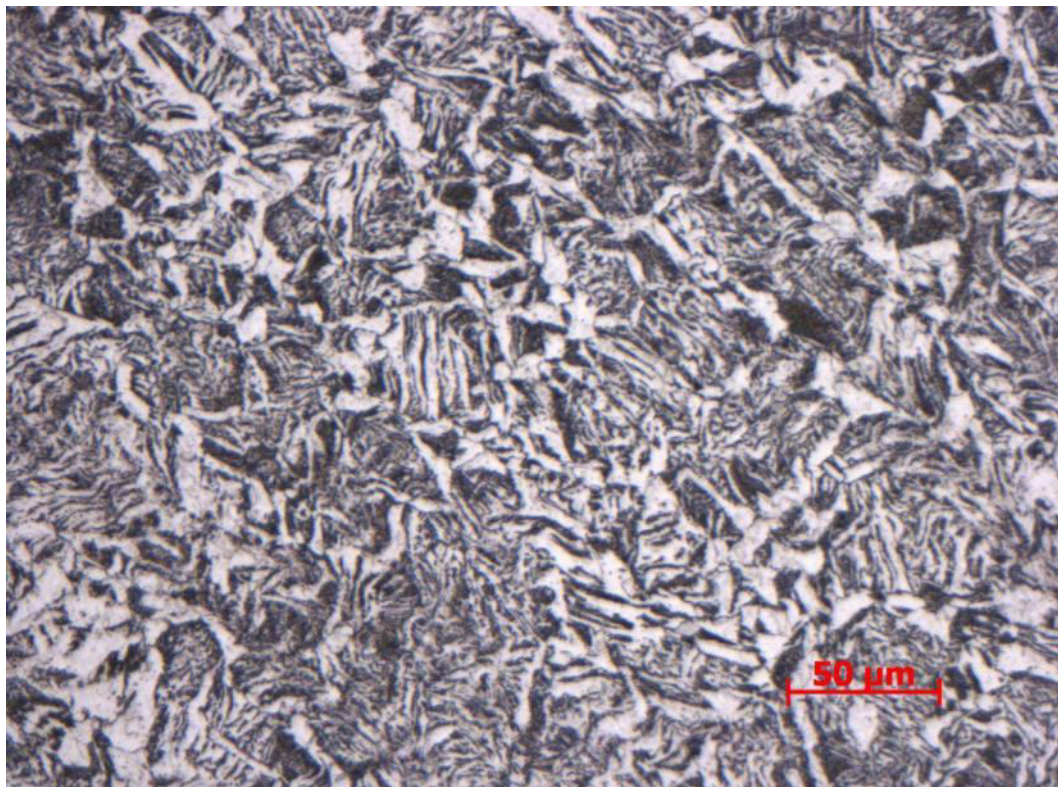
Obr. č. 91 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1A-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 92 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1A-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



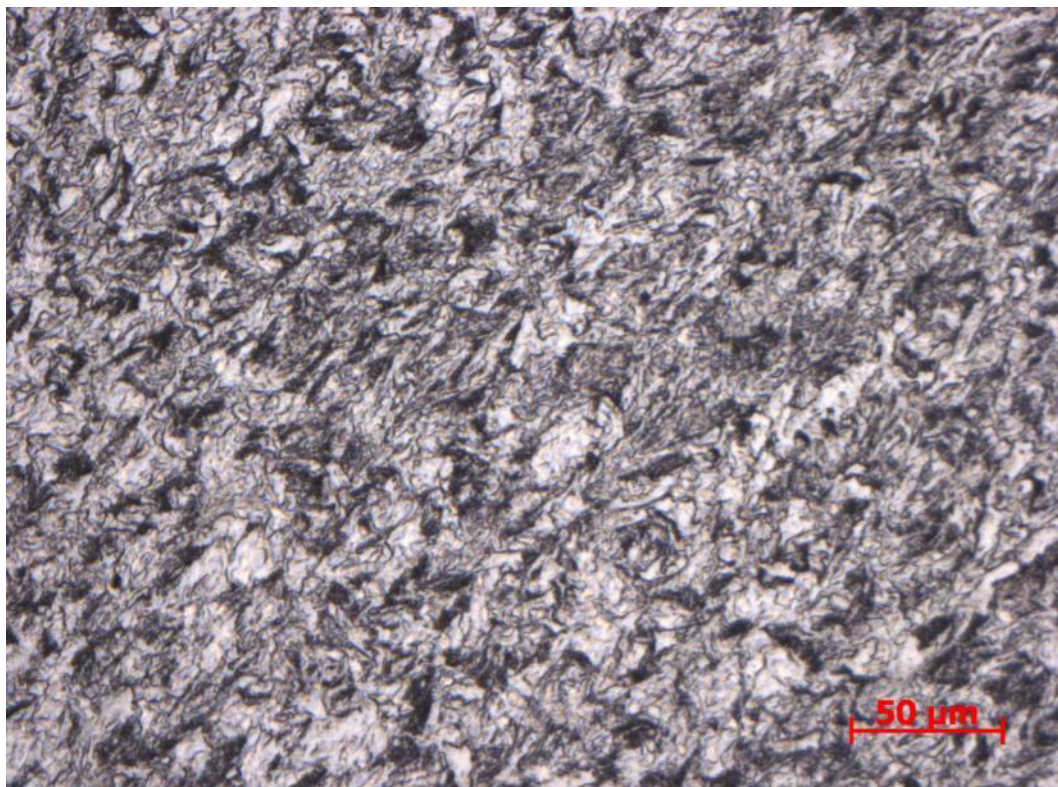
Obr. č. 93 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1A-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury



Obr. č. 94 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1A-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.

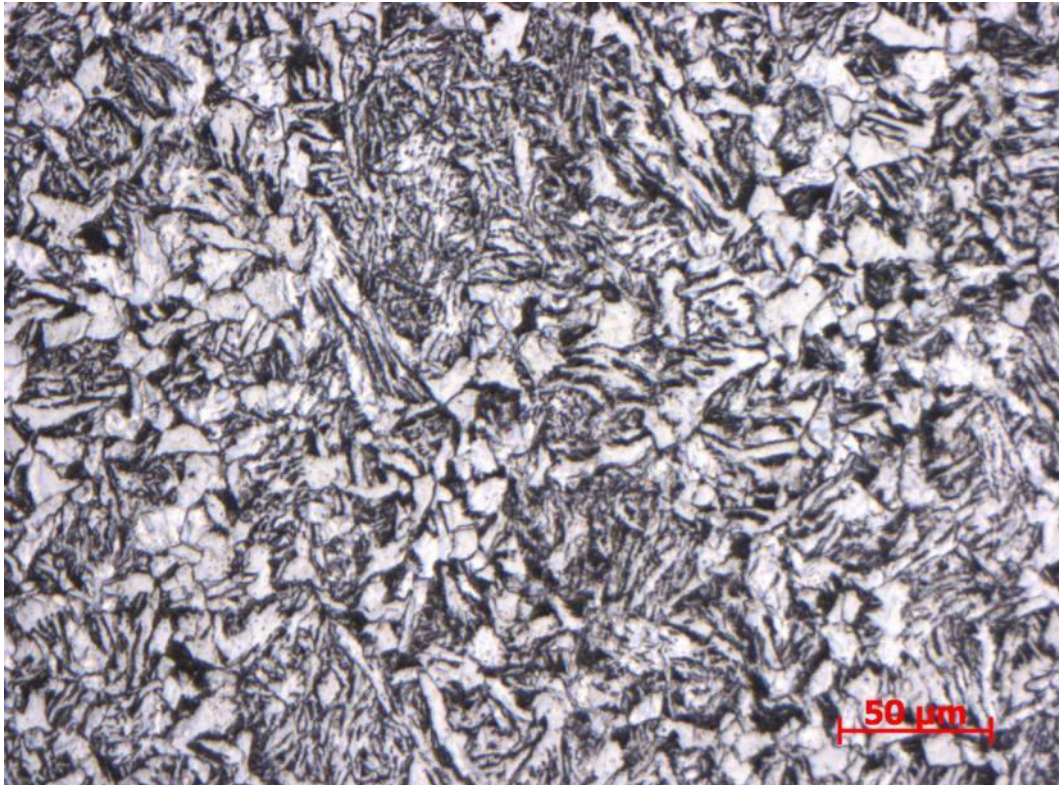
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

Vzorek P1C ze zkušebního bloku z HR17060

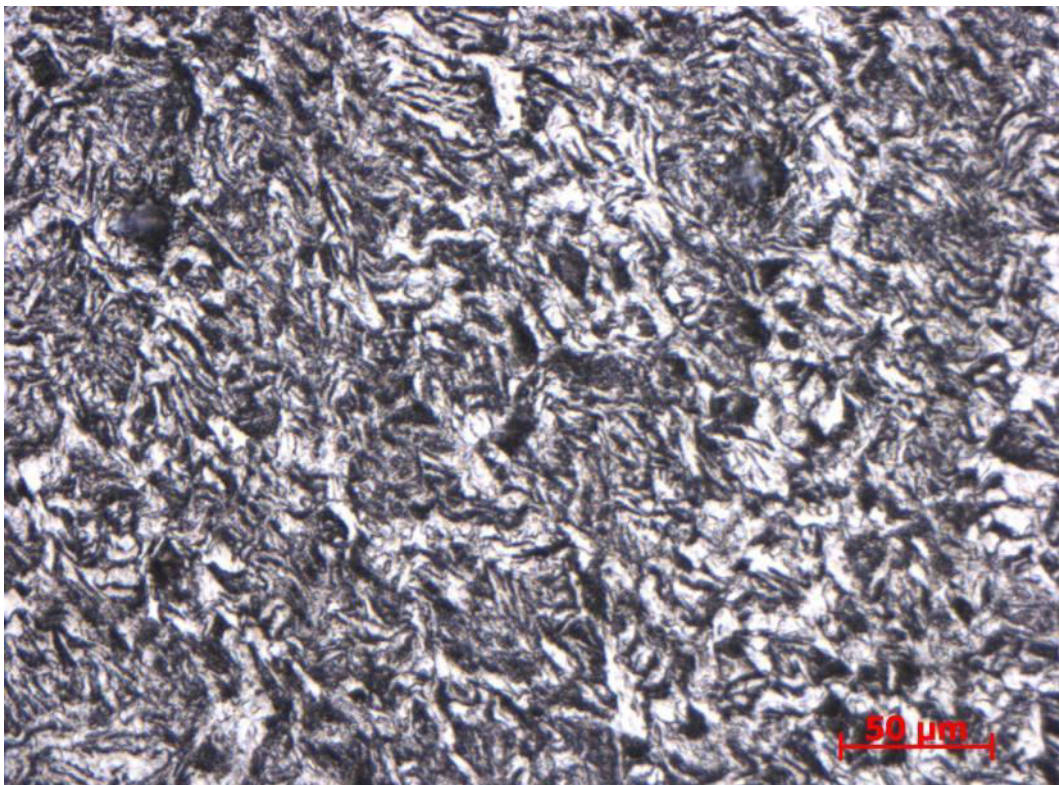


Obr. č. 95 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - P1C-1 (povrch zk. bloku). Zvětšení 200x.

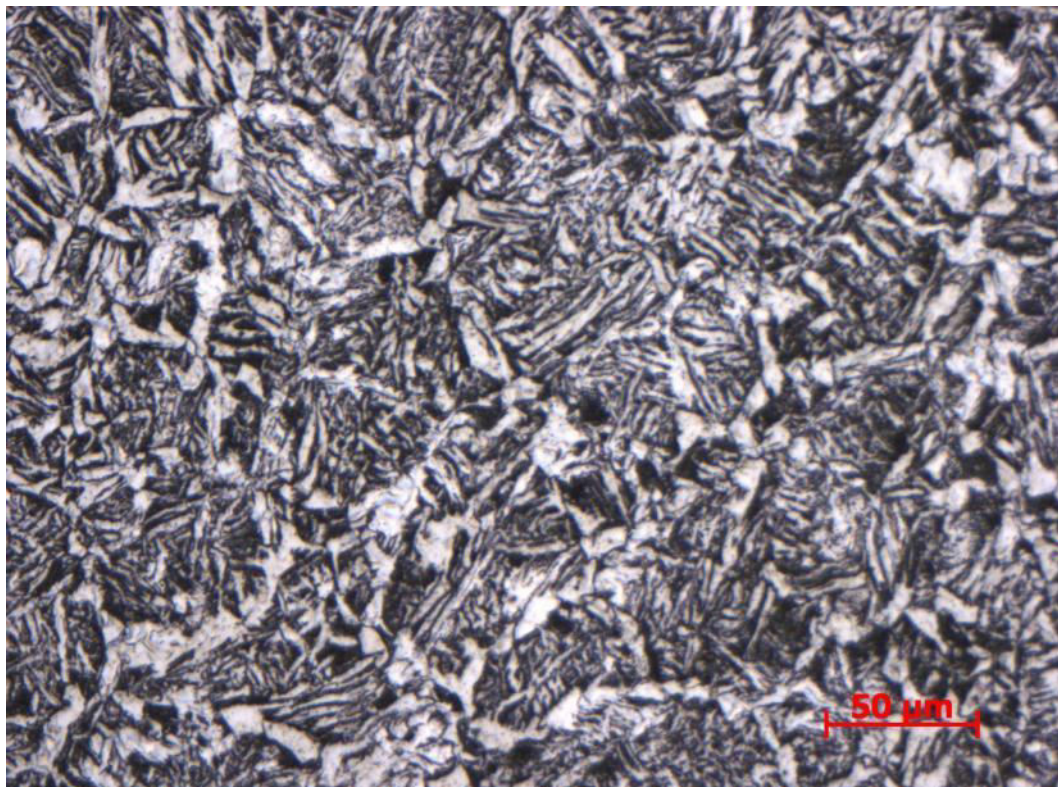
Feriticko - perlitická struktura, feritická struktura převažuje



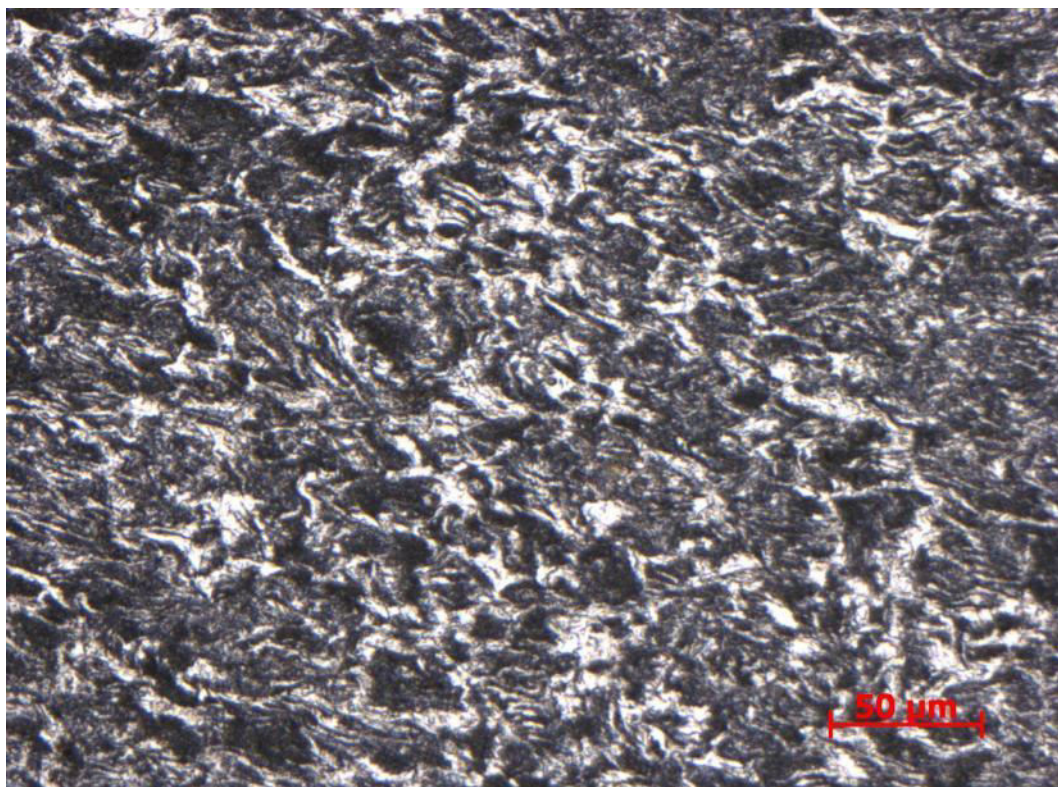
Obr. č. 96 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIC-2 (5 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



Obr. č. 97 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIC-3 (10 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, přibývající perlitická struktura



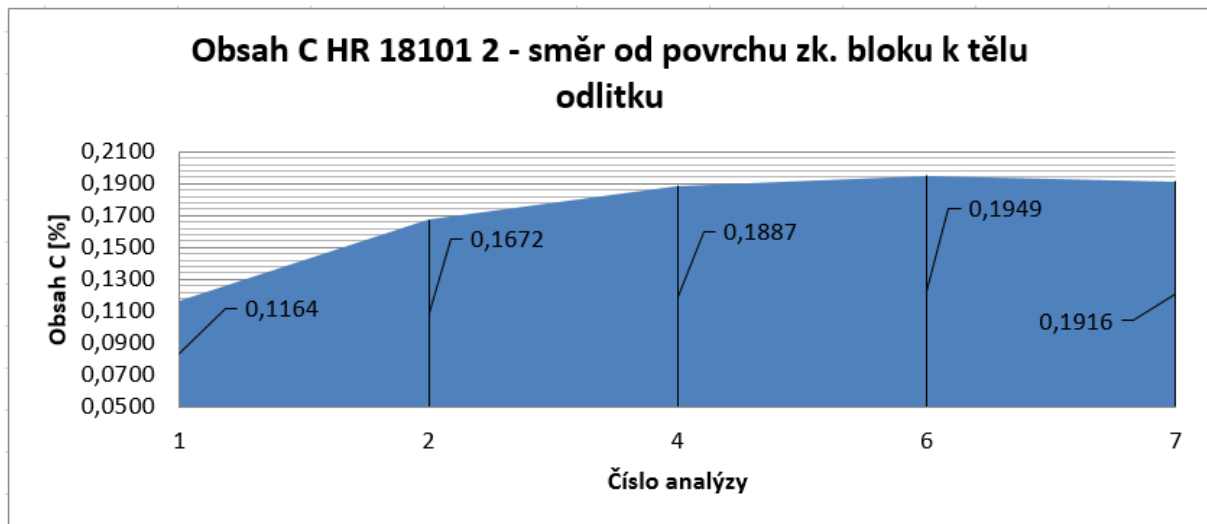
Obr. č. 98 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIC-4 (15 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury



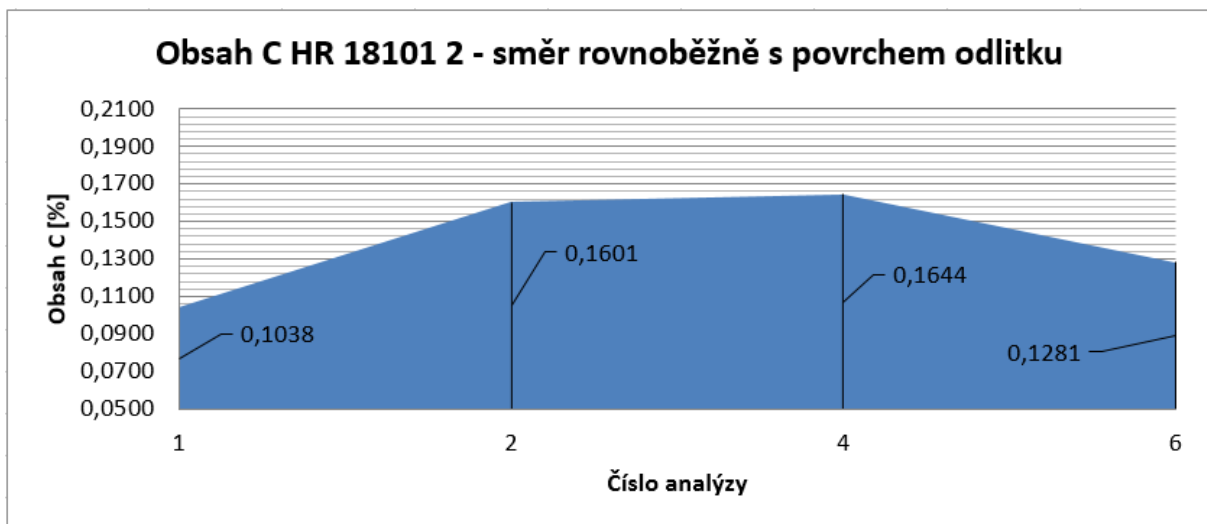
Obr. č. 99 - Mikrostruktura zk. bloku z HR17060 - PIC-5 (20 mm od povrchu zk. bloku). Zvětšení 200x.
Feriticko - perlitická struktura, výrazný podíl perlitické struktury

Výsledné chemické složení spalovací metodou Leco

Výsledné oduhličení pro vzorek č. 2 ze zkušebního bloku z HR18101

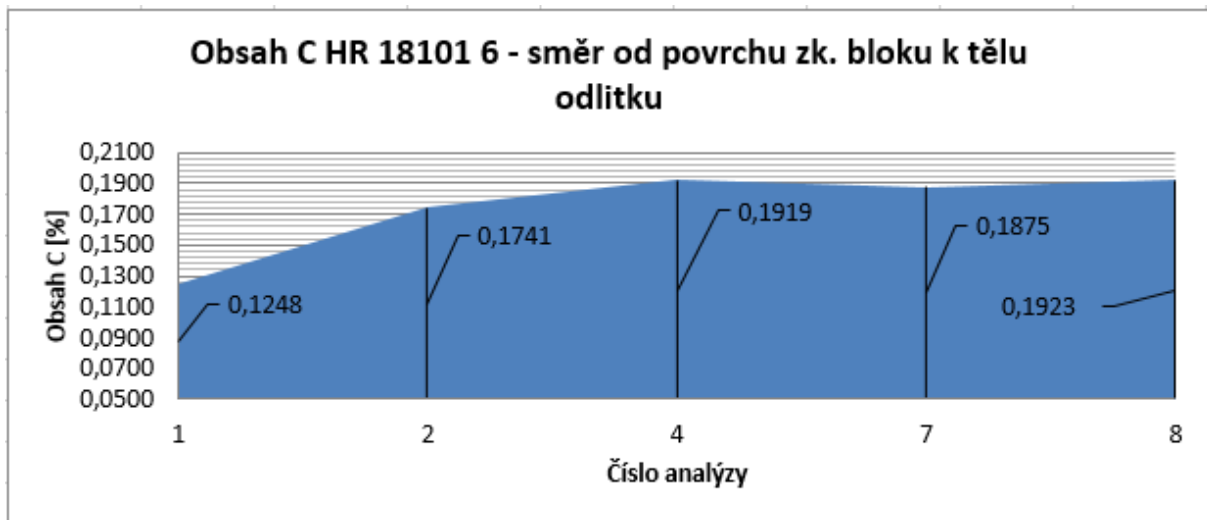


Obr. č. 100 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 2 ze zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku

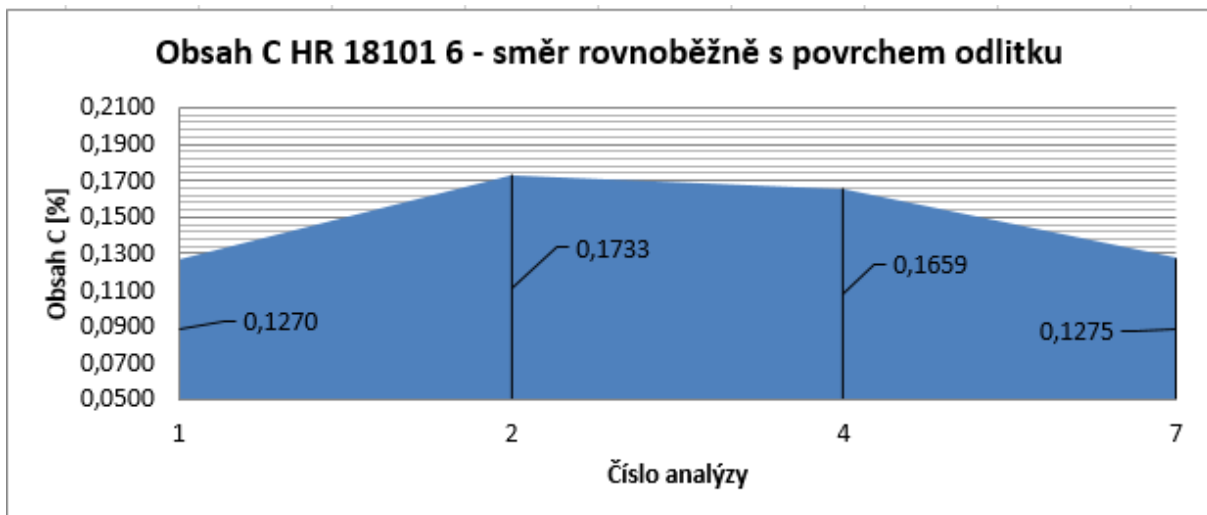


Obr. č. 101 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 2 ze zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku

Výsledné oduhličení pro vzorek č. 6 ze zkušebního bloku z HR18101

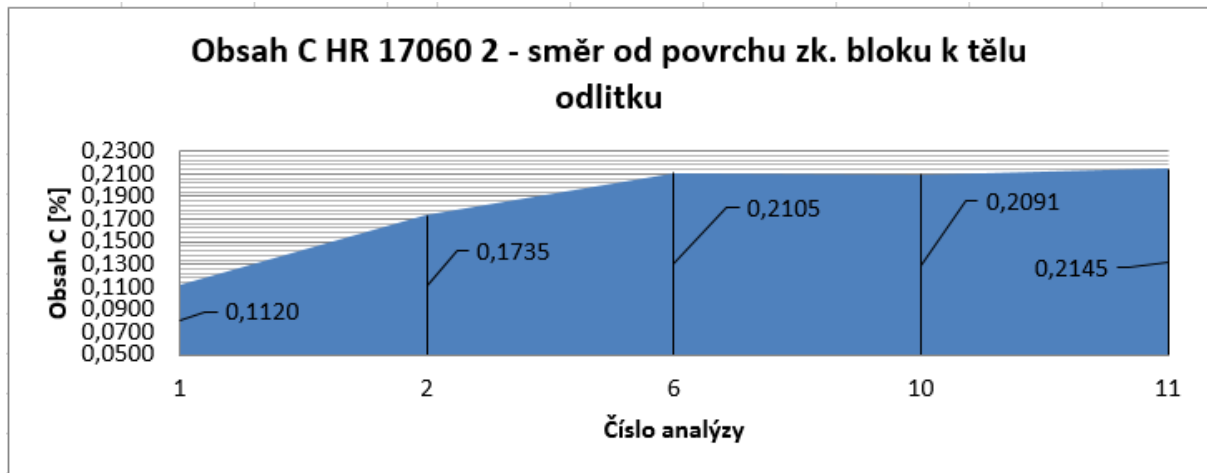


Obr. č. 102 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 6 ze zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku

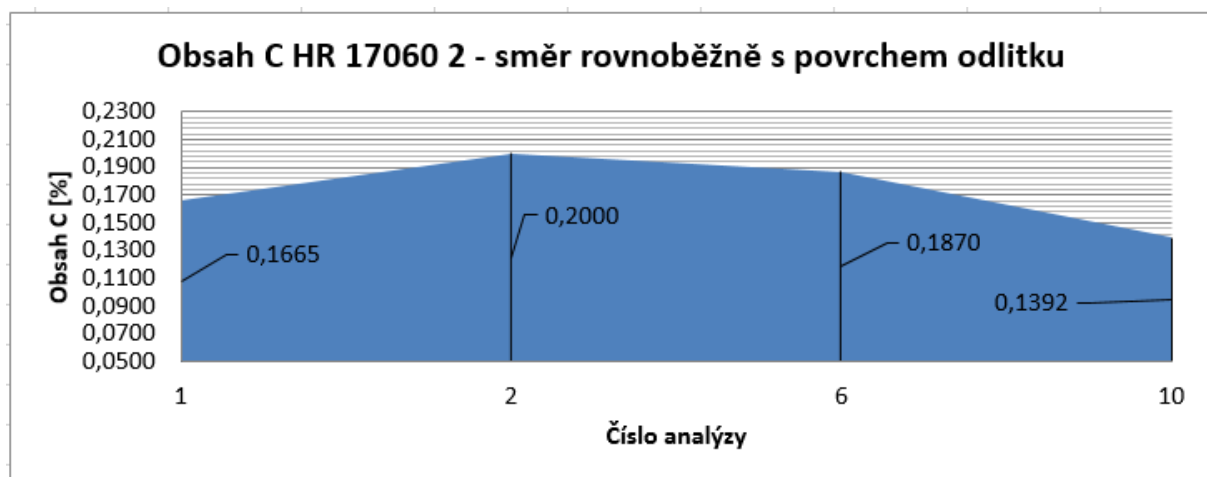


Obr. č. 103 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 6 ze zkušebního bloku z HR18101, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku

Výsledné oduhličení pro vzorek č. 2 ze zkušebního bloku z HR17060

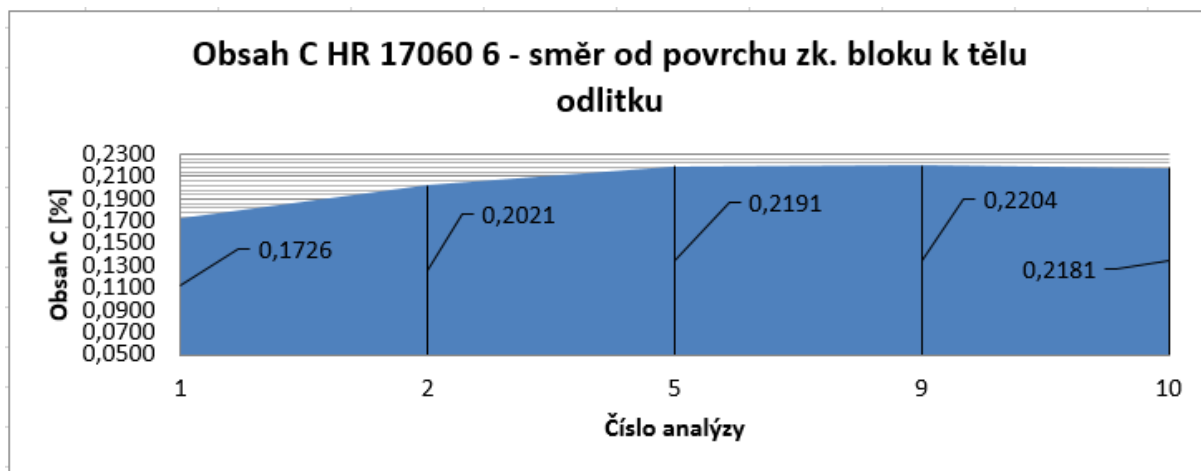


Obr. č. 104 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 2 ze zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku

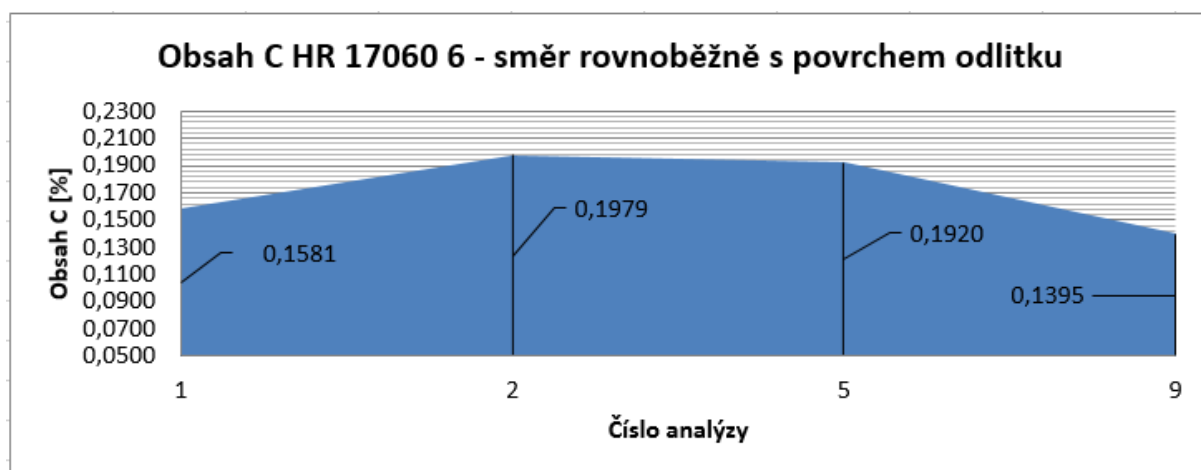


Obr. č. 105 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 2 ze zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku

Výsledné oduhličení pro vzorek č. 6 ze zkušebního bloku z HR17060



Obr. č. 106 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 6 ze zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: od povrchu zk. bloku k tělu odlitku



Obr. č. 107 - Grafické znázornění obsahu uhlíku ve vzorku č. 6 ze zkušebního bloku z HR17060, směr analýzy: rovnoběžně s povrchem odlitku

Závěr pro spalovací analýzu Leco

Při porovnání průběhů oduhličení jak ve směru horizontálním (rovnoběžně s povrchem odlitku), tak ve směru vertikálním (od povrchu zk. bloku k tělu odlitku), můžeme konstatovat, že hodnoty jsou odpovídající k hodnotám získané pomocí spektrální chemické analýzy a tudíž můžeme konstatovat její správnost.