

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



**Optimalizace tepelného zpracování oceli
pro výrobu radliček**

diplomová práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

Student: Bc. Jan Cidlina

PRAHA 2012

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu strojírenské technologie
2009/2010

Akademický rok

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jan Cidlina

obor Obchod a podnikání s technikou

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze čl. 17 odst. 2 určuje tuto diplomovou práci.

Název práce:

Optimalizace tepelného zpracování oceli pro výrobu radliček

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodiky
3. Literární rešerše
4. Výsledky a jejich diskuse
5. Závěr
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 40 – 60 stran

Doporučené zdroje:

1. ANTONY, J.: Design of experiment for engineering and scientist, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, 152 s., IBSN 0-7506-4709-4
2. BAILEY, R.: Design of comparative experiments, Cambridge University Press, 2008, 330 s., IBSN 978-0-521-68357-9
3. BROOKS, CH. R.: Heat Treatment of Ferrous Alloys, New York, Osborne-McGraw-Hill, 1979, 262 s.
4. BUDINSKI, K. G.: engineering Materials: Properties and Selection, Reston, RPC Inc., 1979, 436 s., IBSN 0-8359-1693-6
5. Hertzberg, R. W.: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, New York, Wiley, 1989, 680 s.
6. Kettunen, P. O.: Plastic deformation and strain hardening, Uetikov – Zurich, TTP, 2003, 410 s., IBSN 0-87849-906-7
7. Macek, K.: Strojírenské materiály, ČVUT, Praha, 2003, 204 s., IBSN 80-01-02798-8
8. Ptáček, L.: Nauka o materiálu II, CERM s.r.o., Brno, 2002, 392 s., IBSN 80-7204-248-3
9. Časopisy: ActaMaterialia, Journal of Material Processing Technology aj.

Vedoucí Diplomové práce: **Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: dubem 2011

L.S.

Vedoucí katedry



Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Optimalizace tepelného zpracování oceli pro výrobu radliček“ vypracoval samostatně, pod vedením doc. Ing. Rostislava Chotěborského, Ph. D. a použil pouze uvedených pramenů a literatury.

V Praze dne

.....

Jan Cidlina

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph. D. za vedení, cenné rady, připomínky a trpělivost, které mi v průběhu zpracování této práce poskytl.

Optimalizace tepelného zpracování oceli pro výrobu radliček

Abstrakt

Pro zajištění spolehlivosti strojních součástí zemědělských strojů je důležité věnovat pozornost již v prvopočátku, tedy od návrhu pro zajištění funkčnosti, plynoucí z tvaru a výběru materiálu, technologičnosti, tj. způsobu výroby, ale i ekonomičnosti.

Tato práce se zabývá vlivy faktorů působících na výslednou tvrdost a metalografickou strukturu borové oceli při jejím tepelném zpracování. Práce popisuje způsob kalení, v čem lze spatřovat výhody a nevýhody jednotlivých kalících prostředí, použité metody a zařízení pro měření tvrdosti a mikrotvrdosti, a celkové vyhodnocení.

Klíčová slova

Tvrdost, metalografie, teplené zpracování, borová ocel, analýza experimentů.

Optimalization of heat treatment steel for duckfoot-share making

Summary

To ensure the reliability of machine parts for agricultural machineries is important to paid attention of the design to ensure functionality since the beginning, it arising from the shape and material selection, of technological characteristics, i.e. technology process, and cost effectiveness.

This thesis is concerned with the effects of operating factors on the resulting hardness and metallographic structure of boron steel during heat treatment. The Thesis describes a quenching, in what can be seen the advantages and disadvantages of each quenching media, methods for a hardness evaluation and the hardness testers, overall evaluation of the experimental data.

Key words

Hardness, Metallography, Heat-treatment, Boron steel, Design of Experiment.

Obsah

1 Úvod	9
2 Cíl práce a metodika.....	10
2.1 Cíl práce	10
2.2 Metodika	10
2.2.1Návrh experimentu	10
2.2.2Materiál a jeho přírava.....	12
2.2.3Tepelné zpracování.....	15
2.2.4Měření tvrdosti	16
2.2.5Vyhodnocení makrotvrdosti	19
2.2.6Metalografie.....	20
2.2.7Mikrotvrdost	22
3 Literární rešerše.....	25
3.1 Půda	25
3.1.1Složení půd	25
3.2 Zemědělská technika pro zpracování půdy.....	28
3.3 Opotřebení	30
3.3.1Adhezivní opotřebení	30
3.3.2Erozivní opotřebení	30
3.3.3Kavitační opotřebení.....	31
3.3.4Únavové opotřebení.....	31
3.3.5Vibrační opotřebení	31
3.3.6Abrazivní opotřebení	31
3.4 Houževnatost	33
3.5 Tepelné zpracování	33
3.5.1Kalicí prostředí	34
3.6 Cenové aspekty	36
4 Výsledky a diskuse	38
4.1 Výsledky měření makrotvrdosti.....	38
4.1.1Vyhodnocení tvrdosti HRD vzorku A 1	41
4.1.2Vyhodnocení tvrdosti HRD vzorku A 2	43
4.1.3Vyhodnocení tvrdosti HRD vzorku B	45
4.1.4Vyhodnocení tvrdosti HV vzorku A 1.....	47
4.1.5Vyhodnocení tvrdosti HV vzorku A 2.....	49

4.1.6	Vyhodnocení tvrdosti HV vzorku B	53
4.2	Výsledky měření mikrotvrdosti	55
5	Závěr	58
6	Literatura	59
7	Seznam zkratk	62
	Jednotky	62
	Slovní zkratky	62
8	Seznam obrázků	63
9	Seznam tabulek	65
10	Přílohy	66

1 Úvod

Tisíce let ovlivňuje člověk prostředí kolem sebe a nejinak je tomu v oblasti zemědělství, kdy byla půda získávaná prostřednictvím žďáření a tlučení lesních porostů, a následně na tato místa byla rozhazována, zašlapávána nebo zahrnována do popelu semena divokých travin. Postupem času a důsledku technologického pokroku se na místo primitivního dřevěného a kamenného náradí započal využívat kov, ať již ve formě pokovení či celokovových zemědělských strojních součástí ke zpracování půdy, s cílem dosáhnout vyšší spolehlivosti těchto součástí.

Tato diplomová práce je členěna do čtyř částí a zabývá se teplem zpracováním, měřením tvrdosti, opotřebením a vyhodnocením

V první části práce je definován cíl a popsána metodika, návrh experimentu, příprava materiálu a celkový průběh experimentu. Druhá část je věnována teoretickým základům týkajících se půd a jejich složení, opotřebením s důrazem na abrazivní opotřebením vlivem skeletů v půdě, dále pak houževnatosti a tepelnému zpracování, kde je uvedeno porovnání způsobů ochlazování v kalicím prostředí.

V třetí části práce, po realizaci zkoušek, zaznamenání naměřených hodnot v tabulkách a provedení analýzy výsledků, jsou vyhodnoceny získané hodnoty a provedena diskuse.

Závěr práce obsahuje celkové shrnutí a dosažených výsledků.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Diplomová práce se zabývá vlivy faktorů působících na výslednou tvrdost a metalografickou strukturu borové oceli při tepelném zpracování.

Cílem této diplomové práce je na základě statistického návrhu experimentu identifikovat vlivné faktory, zjistit míru vlivu těchto faktorů při tepelném zpracování oceli a na výslednou tvrdost a strukturu oceli. Sledovanými vstupními veličinami jsou kvantitativní faktory: teplota ohřevu, přítomnost atmosféry při ohřevu, doba ohřevu, doba přenosu vzorku z pece do kalicího prostředí, teplota a pohyb v ochlazovacím prostředí.

2.2 Metodika

Diplomová práce bude zpracována za použití dostupných českých a cizojazyčných literárních zdrojů, veškerá měření budou prováděna v laboratořích Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze a to pomocí technického zařízení, které je popsáno v následujících kapitolách, jakož i využitých metod a postupů.

Metodická část byla koncipována na základě chronologického postupu jednotlivých kroků společně s popisem působících vlivů a faktorů na ocel. Na základě navržených jednotlivých vstupních hodnot, je možné uskutečnit naplánovaný experiment. Ve výsledné části práce je vyhodnocení naměřených a získaných hodnot prostřednictvím programu STATISTICA a analýzy rozptylu (ANOVA).

2.2.1 Návrh experimentu

Při návrhu jakéhokoliv stroje či strojního zařízení je důležité respektovat hledisko funkčnosti, technologičnosti a ekonomičnosti. Tato hlediska se navzájem prolínají a pro dosažení optimálního řešení je nelze opomenout. Většina strojů či strojního zařízení je namáhána více způsoby, což vyvolává síly působící nejen na povrch součásti, ale též takové, které ovlivňují mechanické vlastnosti a vnitřní stavbu materiálu. Špatné navržení může vést až k poruše a případným dalším ztrátám, nejen materiálovým ztrátám (např. časové prostoje). Proto je volba materiálu, jeho vlastností a případně i úprava, tak důležitá.

Nároky na zlepšování procesů jsou v současné době stále vyšší, a proto jsou experimenty nedílnou součástí výzkumu a vývoje, avšak bývá poukazováno i na ekonomickou náročnost a možnost zhoršení kvality v případě jejich provádění během provozu.

Za poměrně rozšířenou metodu je považována statistická kontrola procesu (SPC), kterou lze považovat za pasivní nástroj, jenž v případě výskytu upozorní na problém. Za aktivní nástroj, který se snaží poukázat na vztah příčiny a následku je experimentování. Navrhování experimentů (DoE) se zabývá metodami plánování a vyhodnocování zkoušek. Podstata spočívá v efektivním vyhodnocení relativně malého počtu zkoušek a to i za přítomnosti rušivých vlivů. [6]

Při návrhu experimentu byly pro sledování vybrány tyto faktory: teplota ohřevu, přítomnost atmosféry při ohřevu, doba ohřevu, prodleva mezi pecí a kalicím prostředím, teplota a pohyb v ochlazovacím prostředí, jak je popsáno v Tabulce 1. Každý z šesti faktorů byl zkoumán na dvou úrovních a počet replikací experimentu byl dán počtem poskytnutých vzorků (u oceli A dvě replikace, u oceli B jedna replika).

V průběhu tepelného zpracování dochází vlivem reakce kovu a oxidačních plynů v atmosféře pece k oxidaci. Rychlost oxidace u oceli je limitující difúze přes oxidační vrstvy. To znamená, že vliv na oxidaci mají především činitelé ovlivňující difúzi, jako je chemické složení kovu, teplota ohřevu, doba ohřevu a složení atmosféry.

Teplota ohřevu součástí byla zvolena pro dvě úrovně, jednak 850 °C, což je minimální kalicí teplota a 1100 °C, což je teplota vhodná pro tváření. Doba výdrže na této teplotě souvisí s přeměnou původní feriticko-cementické struktury na austenitickou, její minimální hodnota je 7 minut, při 20 minutách by mělo docházet k plné homogenizaci austenitu. Proto je zjišťováno, do jaké míry má tato doba vliv na výsledné vlastnosti oceli.

Prostředí, ve kterém dochází k ohřevu, charakterizuje podmínky fyzikálního přenosu tepla a reakci kovu s ohřívacím prostředím. V prostředí s ochrannou atmosférou by mělo docházet ke snížení oxidace a též změnám chemického složení tudíž kvality povrchu. V případě tohoto experimentu byl vybrán argon, který nereaguje s kovy, je však

také třeba v tomto případě podotknout, že při použití ochranné atmosféry dochází ke zvýšení nákladů procesu tepelného zpracování.

Dalším faktorem je doba mezi pecí a ochlazovacím prostředím, která úzce souvisí nejen se vzdáleností těchto míst od sebe, ale též s rychlostí obsluhy. V provozu jsou kladeny nároky na efektivnost výroby, proto je za minimální dobu potřebou k přemístění stanoven čas 5 sekund, který by měl charakterizovat okamžité přesunutí oceli z prostředí pece do chladicího media. Pohyb vzorku zvyšuje chladicí účinek a opět souvisí s obsluhou.

Tabulka 1: Přehled sledovaných faktorů

Vzorek č.	Teplota ohřevu [°C]	Atmosféra	Doba výdrže [s]	Teplota ochlazovacího prostředí [°C]	Doba pec - voda [s]	Pohyb ochlazovacího prostředí
1	850	Ne	7	20	5	Ne
2	850	Ne	7	40	15	Ano
3	850	Ne	20	40	5	Ne
4	850	Ne	20	20	15	Ano
5	850	Ano	7	20	5	Ano
6	850	Ano	7	40	15	Ne
7	850	Ano	20	40	5	Ano
8	850	Ano	20	20	15	Ne
9	1100	Ano	7	40	5	Ne
10	1100	Ano	7	20	15	Ano
11	1100	Ano	20	20	5	Ne
12	1100	Ano	20	40	15	Ano
13	1100	Ne	7	40	5	Ano
14	1100	Ne	7	20	15	Ne
15	1100	Ne	20	20	5	Ano
16	1100	Ne	20	40	15	Ne

Zdroj: zpracováno autorem

2.2.2 Materiál a jeho přírava

Strojní součásti zemědělských strojů pracující v abrazivním prostředí jsou vyrobeny ze speciálních druhů uhlíkových ocelí. V zemích Evropské unie jsou používány oceli nízkouhlíkové, mikrolegované borem, kde hlavní zastoupení mezi výrobci oceli tvoří společnosti SSAB a Ruukki. Z pohledu produktů se pak jedná o Lubor 024/034/044

(SSAB), SB27M12CB (Fundia), Hardox 400/450/500/600 (SSAB), Domex Wear (SSAB), Raex B27 (Ruukki) a vícevrstvé oceli [12].

V experimentu byly použity dva materiály o různém chemickém složení, jak je patrné z Tabulky č. 2. Právě chemické složení ovlivňuje nejen volbu parametrů tepelného zpracování, ale i dosahované výsledky. Chemické složení ovlivňuje řadu výstupních hodnot a jeho nevhodný poměr může zapříčinit vysoké a často zbytečné ztráty.

Tabulka 2: Chemické složení vzorků

Označení vzorku	A - Domex	B – Boron 27
C (%) min. – max.	0,24 – 0,30	0,27
Si (%) max.	0,40	0,25
Mn (%) min. - max.	1,10 – 1,40	1,2
P (%)max.	0,025	-
S (%)max.	0,015	-
Cr (%)min. – max.	0,30 - 0,60	0,3
B (%)min. – max.	0,0008 - 0,0050	0,002

Zdroj: [21, 24]

Na základě přístupných údajů od výrobců, jsou mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů uvedeny v Tabulce 3. Na Obrázku 1 je grafické znázornění mechanických vlastností v závislosti na teplotě.

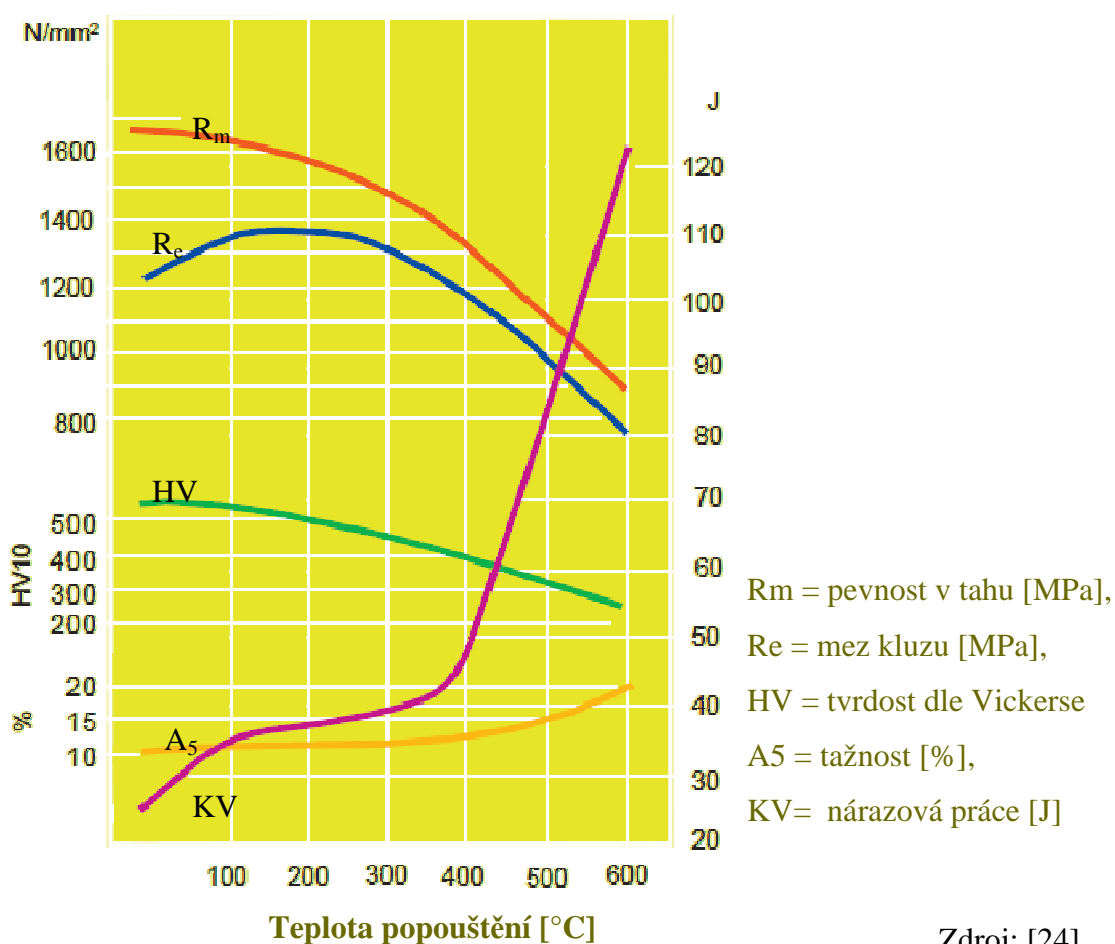
Oceli Domex 27MnCrB5–2 (dále jen Domex) od společnosti SSAB i oceli Boron 27 (od společnosti Ruukki), obsahují malé množství boru pro zvýšení prokalitelnosti, lze je snadno kalit a v mnoha případech mohou být používány bez následného popouštění. V praxi bývají používány jako ořezuvzdorné a konstrukční vysokopevnostní materiály.

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti materiálových vzorků

Ocel	Ochlazovací prostředí	Mez kluzu R_e [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Tvrдость	Kalici teplota [°C]
Domex	Voda	–	1735	–	51 HRC	860
Domex	Olej	–	1575	–	48 HRC	900
Boron 27	Voda	1200	1600	6	460 HBW	–
Boron 27	Olej	1000	1250	8	380 HBW	–

Zdroj: [21, 24]

Obrázek 1: Mechanické vlastnosti v závislosti na teplotě popouštění



Zdroj: [24]

Před samotným experimentem byly jednotlivé vzorky očištěny a označeny razidly, aby v průběhu měření nedošlo k záměně. V případě oceli Domex bylo označeno 32 vzorků a u oceli Boron 27 šestnáct vzorků, přičemž jeden ze vzorků (č. 12) byl použit pro

stanovení tvrdosti před tepelným zpracováním, a proto nebyl zahrnut v následujícím postupu.

2.2.3 Tepelné zpracování

Pro tepelné zpracování byla použita pec LAC LH 15/13S (viz. Obrázek 1) s vyzdívanou komorou, která je složena z lehčených cihel. Topné spirály jsou vloženy do drážek ve vyzdívice a jsou tak v přímém styku s atmosférou uvnitř pece, v zadní části je zajištěn přístup pro přívod ochranné atmosféry.[16]

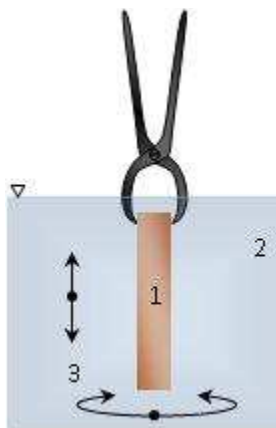
Obrázek 2: Pec na ohřev vzorků typu LAC LH 15/13S



Zdroj: zpracováno autorem

Při kalení byla zvolena za ochlazovací prostředí voda o teplotě 20 či 40 °C. Jedná se o intenzivně působící kalicí prostředí, jehož ochlazovací účinnost lze zvýšit pohybem media či vzorku. V závislosti na předem daných kritériích byl vzorek do kalicího prostředí ponořen po 5 nebo 15 minutách, ponechán do vychladnutí a to buď v klidu, nebo za pohybu v kalicím prostředí.

Obrázek 3: Ponoření a pohyb vzorku v ochlazovací lázni



1 – vzorek, 2 – chladicí lázeň, 3 – pohyb vzorku v lázni (svislý a rotační)

Zdroj: zpracováno autorem

2.2.4 Měření tvrdosti

K měření tvrdosti slouží rozsáhlé množství metod, přičemž k jejich zjištění slouží zkoušky tvrdosti, například vrypové, vnikací a odrazové. V této práci byly použity metody vnikající podle Rockwella a Vickerse. Oba typy zkoušek jsou v praxi často využívány a uplatnění mají především u tvrdých a kalených materiálů. Oba typy zkoušek se navzájem doplňují, zatímco dle Rockwella se jedná o zkoušku tvrdosti do větší hloubky, dle Vickerse se jedná především o měření povrchové vrstvy. V obou případech bylo na jednotlivých vzorcích provedeno jedenáct měření [3].

Při měření tvrdosti podle Rockwella byla použita metoda HRD na tvrdoměru HP 250 (viz Obrázek 3). Princip, vyjádřený na Obrázku 4, spočívá v postupném vtlačování diamantového kuželu o vrcholovém úhlu 120 °. Celkové zkušební zatížení se skládá z předběžného zatížení o 98,07 N a přídatného zatížení, které je volena v závislosti na stupnici tvrdosti. Doba působení je v závislosti plasticke deformace na čase u daného materiálu (10 – 15 s u podstatné závislosti, 1 – 5 s u omezené nebo žádné závislosti). Po odlehčení zjistíme hloubku „h“, pomocí níž a dvou konstant N (číslo charakterizující stupnici) a S (jednotková stupnice) se spočítá tvrdost podle Rockwella ze vzorce:

$$\text{tvrdost podle Rockwella} = N - \frac{h}{S}N - (h/S).$$

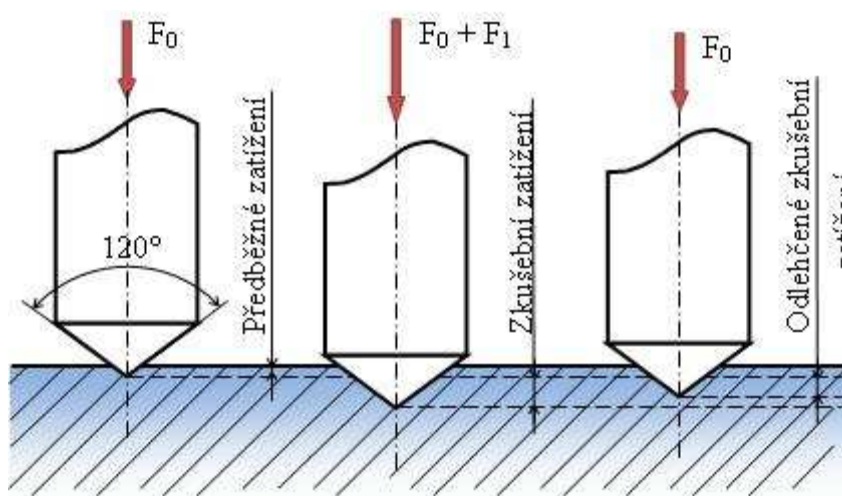
Většina tvrdoměrů je pro tuto zkoušku upravena tak, že hloubku vtisku odečteme na číselníkovém úchylkoměru, kde ukazatel na číselníku ukazuje přímo tvrdost podle Rockwella [2].

Obrázek 4: Rocwellův tvrdoměr HP 250



Zdroj: zpracováno autorem

Obrázek 5: Podstata zkoušky podle Rockwella



Zdroj: zpracováno autorem

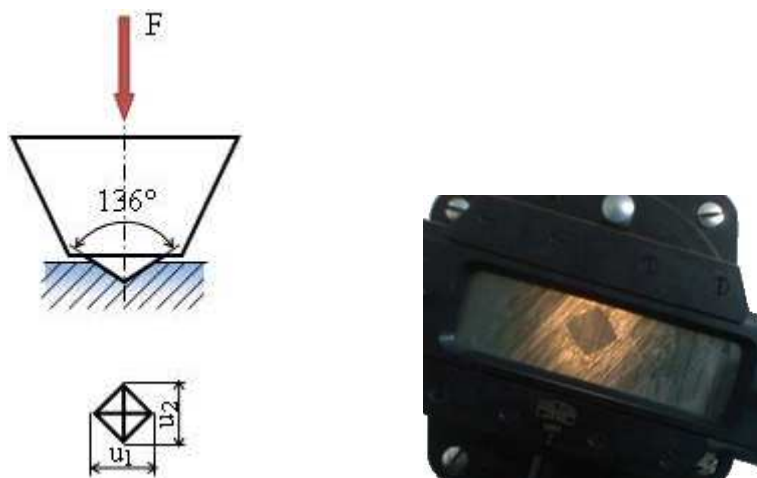
Další použitou metodou byla zkouška podle Vickerse HV 30 na tvrdoměru HPO 250 (viz Obrázek 6), jejíž princip spočívá ve vtláčování čtyřbokého diamantového jehlanu o vrcholu 136° a době zatížení 10 vteřin. Z vtisku byly po odlehčení měřeny úhlopříčky a následně vypočteny aritmetický průměry (viz. Obrázek 7). Vzhledem ke skutečnosti, že diamant má vysokou odolnost vůči deformaci při vysokém zatížení je zkouška pole Vickerse spolehlivější i u velmi tvrdých materiálů a činí z ní tak v praxi nejpoužívanější zkoušku.

Obrázek 6: Vickersův tvrdoměr HPO 250



Zdroj: zpracováno autorem

Obrázek 7: Podstata zkoušky dle Vickerse a zobrazení vtisku na stínítku



Zdroj: zpracováno autorem

Tvrdość dle Vickerse je vyjadřována pomocí následujícího vzorce:

$$HV = \text{konstanta} \cdot \frac{\text{zkušební zatížení}}{\text{průměr}}$$

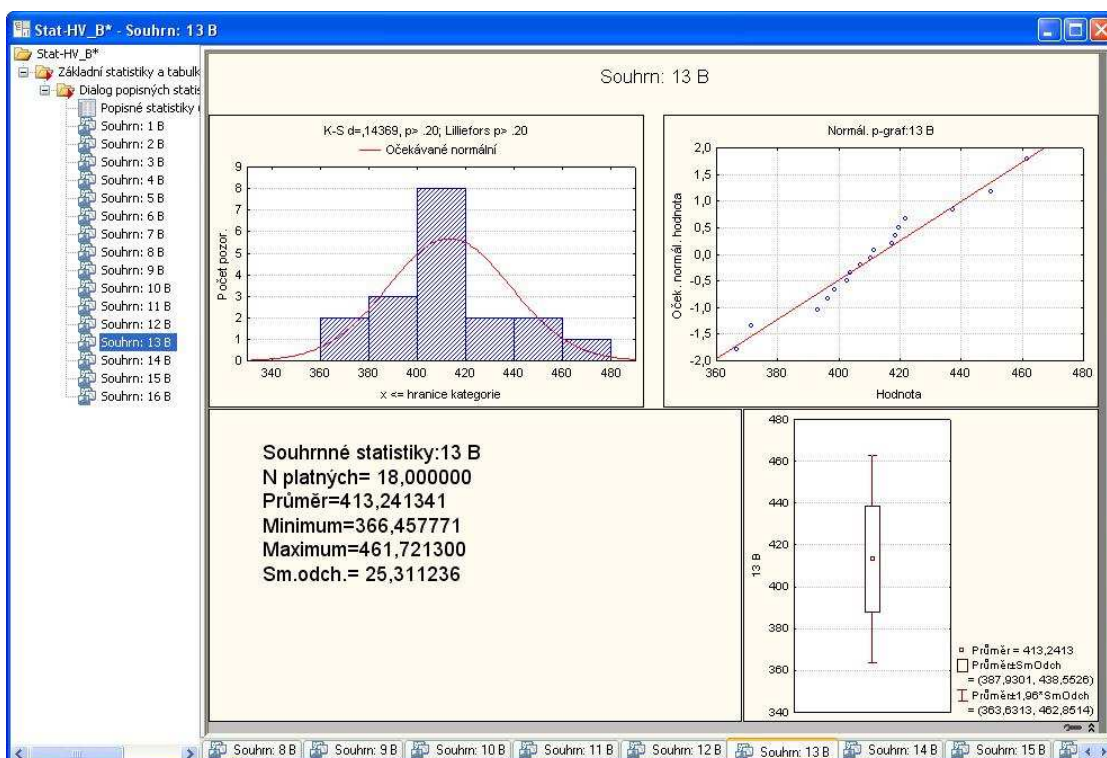
$$HV = \frac{1}{9,80665} \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{u^2}; \quad \bar{u} = \frac{u_1 + u_2}{2}$$

Vickersův tvrdoměr, kde je obraz čtvercového vtisku promítán ve zvětšeném měřítku na matrici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky úhlopříčky. Hodnoty tvrdosti podle HV nelze převést na jiné tvrdosti nebo pevnost v tahu. Takové přepočty lze používat, jen pokud jsou k dispozici spolehlivé podklady.

2.2.5 Vyhodnocení makrotvrdości

Při zpracování naměřených hodnot prostřednictvím programu STATISTICA[®], byla provedena popisná statistika, kdy byly hodnoty zpracovány ve formě grafů a tabulek (viz. Obrázek 8) a vypočítány jejich číselné charakteristiky (průměr, rozptyl, směrodatná odchylka, rozpětí aj.).

Obrázek 8: Znáznornění datového souboru HV 30, u vzorku B13, prostřednictvím grafů

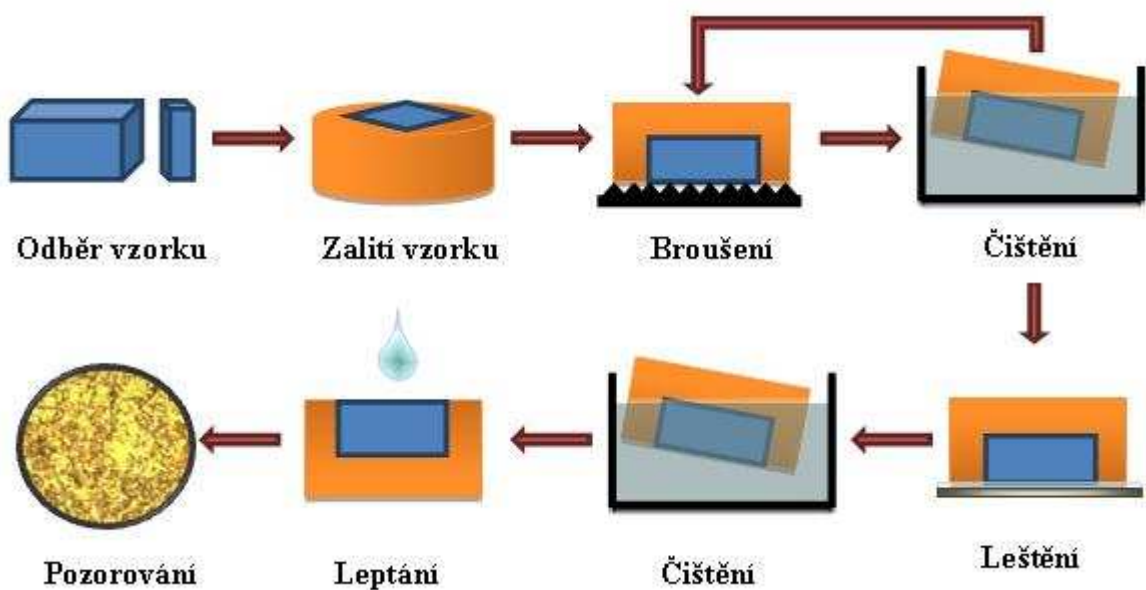


Zdroj: zpracováno autorem

2.2.6 Metalografie

Metalografie je nauka zabývající se pozorováním a zkoumáním vnitřní stavby kovů a slitin a jakou má tato struktura souvislost s vlastnostmi materiálu, chemickým složením, tepelným zpracováním. Jedná se o důležitou metodu, díky které lze rozpoznat budoucí chování materiálu, vyhovění požadavkům z hlediska technologického, ekonomického i ekologického. Vnitřní strukturu je nejprve zapotřebí zviditelnit a následně je možné ji studovat na výbrusu prostřednictvím optického mikroskopu.

Obrázek 9: Postup přípravy výbrusu u metalografického vzorku



Zdroj: zpracováno autorem

Pro přípravu vzorku na pozorování byl využit postup, jak je vidět na Obrázku 9, několika na sebe navazujících operací:

- odběr vzorku,
- zalití vzorku,
- broušení,
- čištění v ultrazvukové lázni, a opětovné broušení až k dosažení rovného povrchu,
- leštění,
- čištění v ultrazvukové lázni,
- leptání.

Během celého procesu byla velmi důležitá preciznost, jelikož každá operace má výrazný vliv na výslednou kvalitu povrchu a naměřené hodnoty.

Odběr vzorku

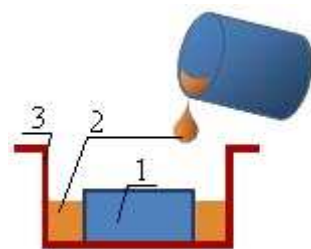
Z hlediska přesnosti při měření je nutné, aby při odběru vzorek plně charakterizoval studovaný materiál (např. u litých materiálů, kde se může vyskytnout odmíšení či nestejnorodá struktura). V praxi se lze setkat s různými technikami odběru vzorků (např. frézování, řezání, vrtání, rozbrušování), avšak v průběhu dělení může vznikat teplo vyvolávající nežádoucí jevy, jako například změna struktury, vznik jiné modifikace, nebo dokonce k lokálnímu natavení materiálu. To je důvodem, proč je uvolněné teplo odváděno použitím chladicích kapalin [25].

V případě tohoto experimentu byly, v dílně Technické fakulty, jednotlivé vzorky rozpůleny pásovou pilou a odvod tepla zajišťovala cyklicky kolující chladicí kapalinou.

Zalítí vzorku

Po odběru byl vybrán z každého vzorku jeden kus a následovalo zalítí za studena prostřednictvím DuroFix-2 Power a CitoFix/DuroFix-2 Liquid v poměru 2:1, viz. Obrázek 10 (1 – označený vzorek, 2 – DuroFix, 3 – forma). Zalítím bylo dosaženo zvětšení plochy metalografického výbrusu a zároveň se zvýšila manipulovatelnost při následném broušení a leštění.

Obrázek 10: Zalévání vzorku za studena



Zdroj: zpracováno autorem

Broušení

Vzorky byly broušeny ručně na discích MD Systém, Piano 220. Po každém kroku broušení a též následného leštění byla použita ultrazvuková čistička Teson 10, čímž byly odstraněny volné částice materiálu a brusiva. Důvodem je, že by tyto volné částice mohly v průběhu broušení nebo zejména leštění degradovat povrch výbrusu.

Leštění

Mechanické leštění bylo provedeno za použití suspenze OP-S, která obsahuje Al_2O_3 . Suspenze OP-S je kyselá, takže částečně podporuje naleptání povrchu a též snižuje vznik tzv. Beilbyho vrstvy.

Leptání

Před pozorováním je nezbytné zviditelnit mikrostrukturu oceli, což bylo provedeno vatovou tyčinkou smočenou v 2 vol. % Nitalu¹⁴. Po zmatnění lesku byl vzorek opláchnut pod tekoucí vodou a vysušen horkovzdušným fénem.

2.2.7 Mikrotvrdot

Před samotným měřením bylo třeba plochu dostatečně očistit od případných nečistot a mastnoty (v tomto případě tetrachlorethylen¹⁵), které by mohli vyvolat nepřesnost při měření a tudíž i jiné hodnoty než při čistém povrchu.

Měření mikrotvrdoti HV 0,1 bylo provedeno na mikrotvrdoměru PMT 3 (Obrázek č. 11) při hodnotě zatížení 0,9807 N. Při výpočtu mikrotvrdoti je používán stejný vzorec jako u makrotvrdoti:

$$HV = 1854,4 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Kde: F zkušební zatížení ($N \cdot 1,02 \cdot 10^{-4}$)

d aritmetický průměr dvou délek úhlopříček (μm)

¹⁴Nital je roztok kyseliny dusičné v etylalkoholu, který se používá k leptání kovů pro zobrazení mikrostruktury.

¹⁵Tetrachlorethylen – chlorovaný uhlovodík využívaný jako rozpouštědlo organických látek

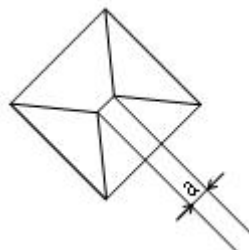
Obrázek 11: Mikrotvrdoměr PMT 3



Zdroj: zpracováno autorem

Vzhledem k nutnosti velmi přesného měření úhlopříček vtisku musí být zajištěn přesný tvar vnikajícího tělesa. Jak již bylo uvedeno u makrotvrdoměru, vnikajícím tělesem u zkoušky podle Vickerse je diamant ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu. Vrcholový úhel mezi protilehlými stěnami musí být $(136 \pm 0,5)^\circ$. Všechny čtyři stěny jehlanu musí být vzhledem k ose vnikajícího tělesa skloněny pod stejným úhlem (úhly se mohou lišit maximálně o $0,5^\circ$) a musí se protínat v jednom bodě. Délka hrany mezi dvěma protilehlými stěnami, označená písmenem „a“, nemá přesáhnout $0,5 \mu\text{m}$. Na Obrázku 12 je znázorněn obvyklý tvar vrcholu vnikajícího tělesa, jak se jeví při zvětšení [11].

Obrázek 12: Tvar vtisku s délkou hrany mezi protilehlými stěnami "a"



Zdroj: zpracováno autorem

Ačkoliv je mikrotvrdoměr PMT 3 vybaven mikroskopem, odečítání hodnot probíhalo prostřednictvím mikroskopu Jenavert (viz. Obrázek 13) a počítačového programu QuickPHOTO Industrial 2.3, čímž byla zajištěna vysoká přesnost měření a následně snazší práce se získanými daty. V programu QuickPHOTO Industrial 2.3, bylo provedeno zobrazení a následně i měření tvrdosti dle Vickerse (podle normy ČSN EN ISO 4516:2002). Tabulka naměřených hodnot byla automaticky vytvořena pod příslušným snímkem a exportována do programu Microsoft® Excel k dalšímu zpracování, odtud pak byly hodnoty přeneseny a vyhodnoceny v programu STATISTICA® (např. Analýza experimentu, závislost tvrdosti na faktorech, aj.).

Obrázek 13: Mikroskop Jenavert PA HD



Zdroj: zpracováno autorem

3 Literární rešerše

Zemědělské strojní součásti pracují v abrazivním prostředí, které má jeden ze zásadních vlivů na míru opotřebení, a tudíž i životnosti součásti. Další faktory, které zmiňuje např. Bobobee Emmanuel, opíraje se o názory jiných výzkumů, jsou chemické složení, technologie výroby, tepelné zpracování, ale též na složení půdy či rychlosti a hloubce provozu [12].

3.1 Půda

Půdu lze charakterizovat jako homogenní systém skládající se z fáze kapalné, plynné, ale především pevné, kterou tvoří minerální části a organické látky. Na vznik a též následný vývoj mají vliv půdotvorní činitelé, kam patří (dle Vopravila) vliv klimatu, působení organismů a člověka, vliv podzemní vody, tvar terénu či časové hledisko a další. Nejdůležitějším činitelem je však matečná hornina (též někdy označován jako půdotvorný substrát), která je výchozím materiálem a nejvíce ovlivňuje charakter půdy. Kombinace činitelů pak působí na výsledné vlastnosti půdy s rozhodujícím vlivem skladby a zrnitostním složením výchozího půdotvorného substrátu.[9]

3.1.1 Složení půd

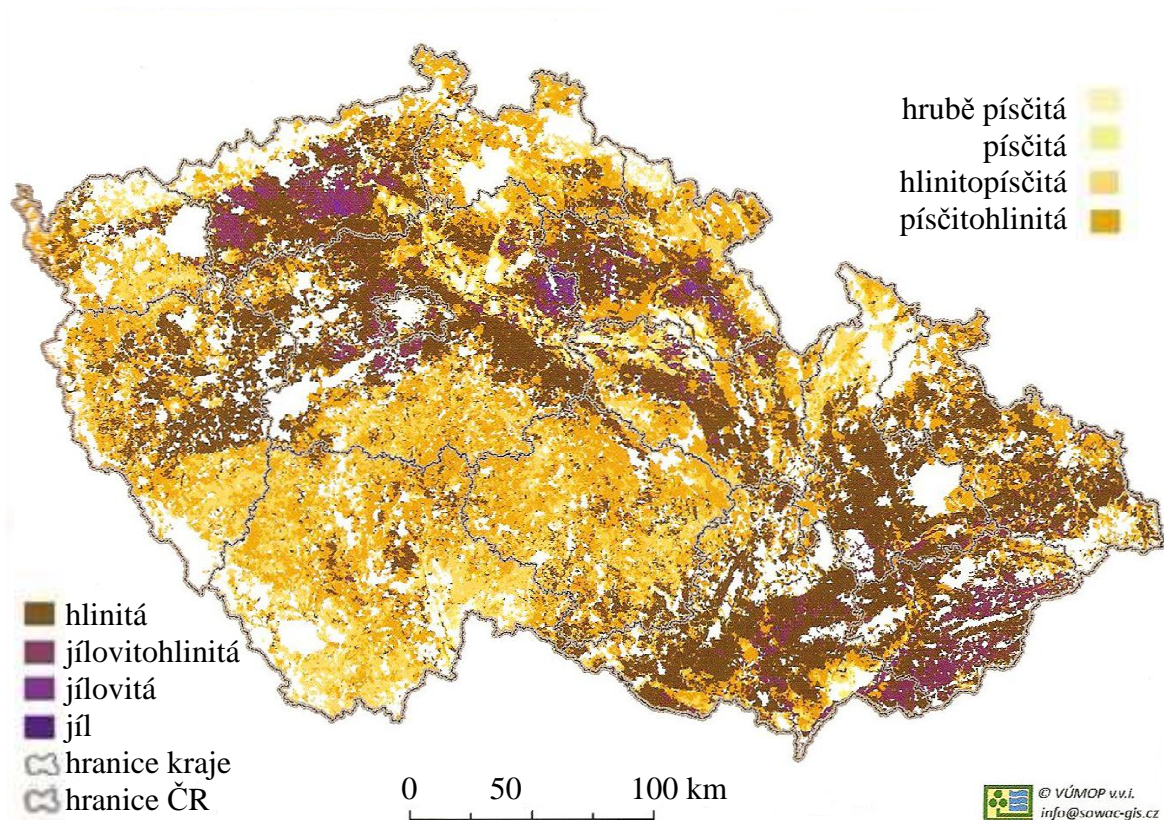
Jedním z nejvýznamnějších půdních charakteristik ovlivňujících fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy a dále její zpracovatelnost a úrodnost je zrnitostní složení půdy, které je dáno zastoupením jednotlivých velikostně rozdílných minerálních složek. Pro půdy má největší význam jejich obsah v tzv. jemnozemi¹⁶. U vzorků jemnozeme je také prováděna většina půdních rozborů. Částice větší než 2 mm jsou nazývány skelet a dále jsou děleny na hrubý písek, štěrk, kameny a balvany.[10, 4]

Podle hmotnostního obsahu minerálních částic se vyčleňují půdní druhy, přičemž klasifikačním stupnicím pro mechanické třídění zemin se věnovalo mnoho autorů, a tak je možné se setkat s řadou. Nejznámější a doposud stále používanou stupnicí je Novákova, jejímž kritériem je procentický obsah částic s velikostí pod 0,01 mm. Novákova stupnice má 7 kategorií, norma ČSN 46 5302, zabývající se značením charakteru půd zpracovaných

¹⁶Suma minerálních částic o velikosti pod 2 mm v průměru.

mechanizačními prostředky, pak rozeznává kategorií 8 a je uvedena v příloze 1 na straně I. Mapa na Obrázku 14 znázorňuje zrnitostní poměry orničních horizontů půd České republiky [10].

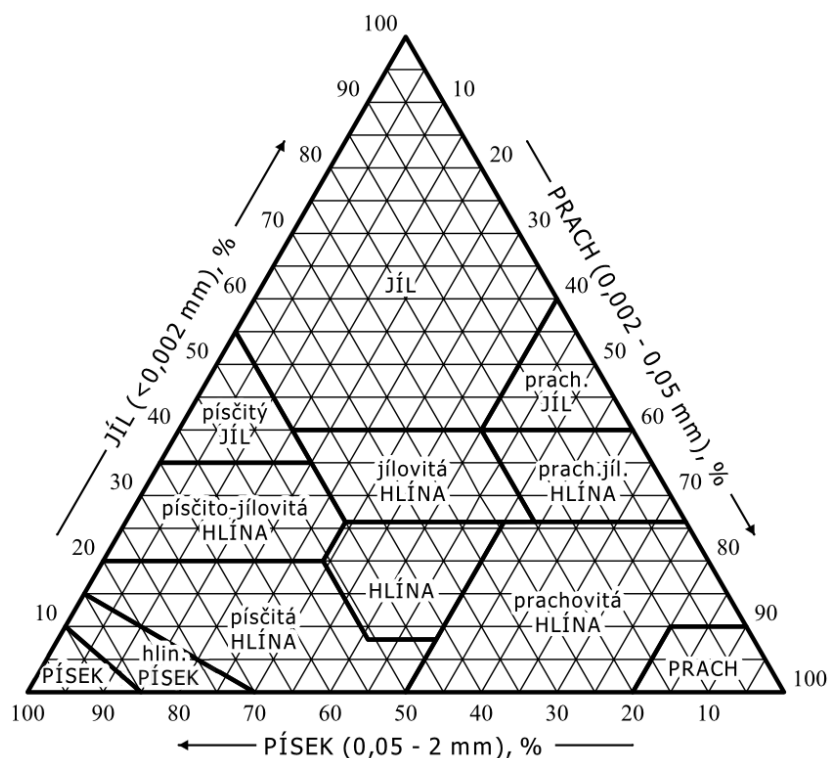
Obrázek 14: Mapa zrnitostních poměrů orničního horizontu půd



Zdroj: [10, s. 53]

Při moderní klasifikaci zrnitosti se též využívá trojúhelníkový model USDA (United States Department of Agriculture) viz. Obrázek 15. Půdní druh je určen z průsečíku obsahů jednotlivých frakcí (jíl, písek, prach či v některé literatuře též pod pojmem bahno) a je tím též určen charakter půdy, jako například absorpce vody s čímž souvisí možnost zpracování (u jemnozeme pod 2 mm se za přítomnosti vody začíná projevovat kohezní síla).[10]

Obrázek 15: Trojúhelníkový diagram zrnitosti půd



Zdroj: [14]

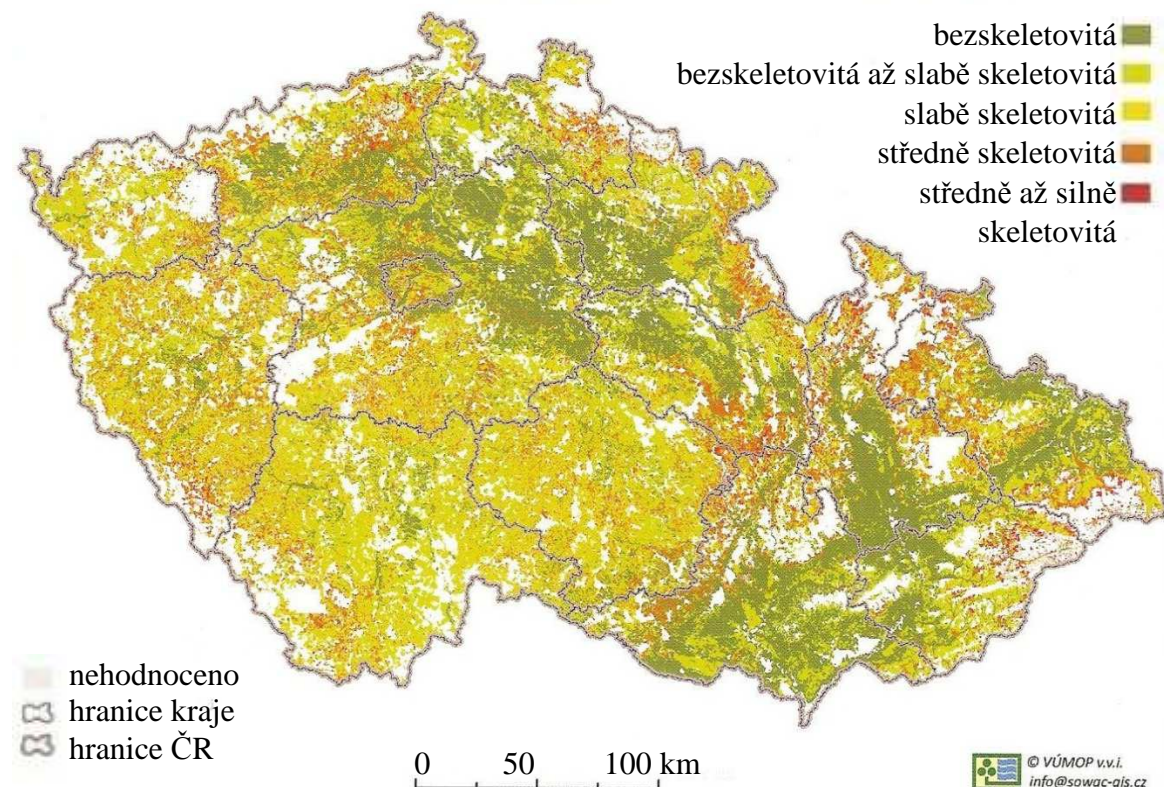
Jak již bylo výše uvedeno, skeletem jsou nazývány částice o velikosti větším 2 mm a je tím vyjádřeno komplexní hodnocení šterkovitosti a kamenitosti podle jejich obsahu v podorniči a ornici. Obsah skeletu je uváděn v objemových procentech v půdní hmotě, přičemž jeho hodnocení je zobrazeno v Tabulce 4. Skeletovitost je společně s hloubkou, u zemědělských půd, součástí kódu bonitované půdně ekologické jednotky, jak je uvedeno v Příloze 3, na obrázku 16 je pak vyobrazena mapa skeletovitosti půd v České republice. [10]

Tabulka 4: Hodnocení skeletovitosti

Obsah skeletu [%]	Charakteristika skeletovitosti
< 5	Žádná
5 – 10	Příměs
11 – 25	Slabá
26 – 50	Střední
51 – 75	Silná
< 75	Velmi silná

Zdroj: [10, s. 43]

Obrázek 16: Mapa skeletovitosti půd v České republice



Zdroj: [10, s. 42]

3.2 Zemědělská technika pro zpracování půdy

V zemědělské praxi je rozdělován systém zpracování půdy, z hlediska intenzity, na konvenční (tj. s orbou) a ochrannou, přičemž stroje pro zpracování jsou především návěsné a dají se členit v závislosti na druhu pracovního nástroje. U konvenčního zpracování, kde je základní operací orba, jsou používány radličné pluhy. Pro ochranné systémy zpracování, kde je kladen požadavek především na vysokou plošnou výkonnost v součinnosti s dobrou kvalitou práce, se používají kypřiče, ty lze rozdělit podle konstrukce pracovních orgánů na:

- kypřiče s pevnou slupicí,
- kypřiče s pérovou slupicí,
- kypřiče s prodlouženou slupicí,
- kypřiče s pohyblivým pracovním orgánem (tzv. rotavátory),
- kombinátory [4, 7].

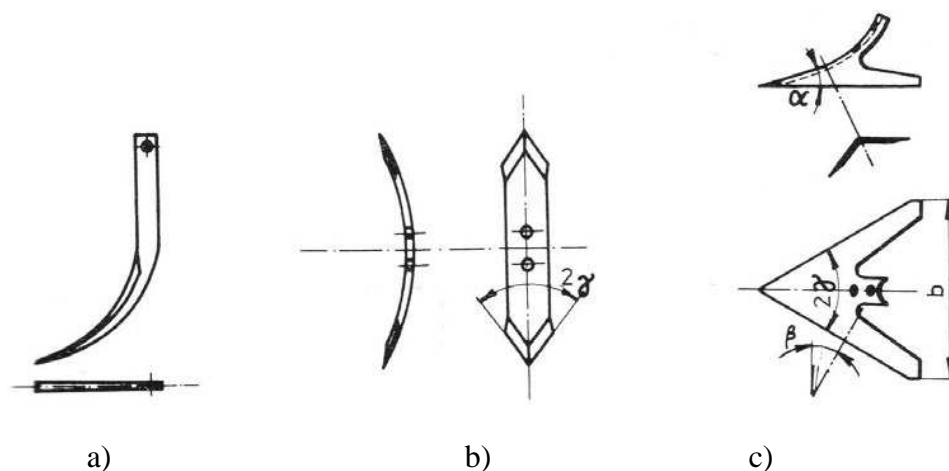
Radličkové kypřiče

Radličky jsou v zemědělství využívány pro kypření, provzdušnění půdy, ničení vzházejícího plevelu a jako náhrada za orbu bez obracení půdní vrstvy. Ke kypření se využívají kypřiče, které lze dělit jednak podle konstrukce pracovního orgánu:

- s pevnou slupicí,
- s pérovou slupicí,
- s odpruženou slupicí,

nebo podle tvaru radličky, na kypřiče s radličkou dlátovou – viz. Obrázek 17 a) jednostranná nebo b) oboustranná, či šípovou (Obrázek 17 – c).

Obrázek 17: Pracovní nástroje radličkových kypřičů



Zdroj: [7]

Široké využití radličkových kypřičů je dáno jejich přednostmi, z nichž je na předním místě velmi dobrý mísící efekt a vysoká výkonnost. Tyto kypřiče se osvědčují na lehkých a středních půdách, v těžkých půdách se však osvědčují pouze při optimální vlhkosti půdy. Na vyschlých těžkých půdách kvalita jejich práce nevyhovuje. Pro podmínku s požadavkem na zapravení podrcené slámy či vyššího strniště do půdy jsou vhodné kypřiče s radličkami v třech nebo čtyřech řadách, aby byla zajištěna dobrá prostupnost mezi radličkami. Tyto kypřiče jsou vybaveny zařízením na drobení hrud a urovnání povrchu půdy po nakypření [4, 7].

Zemědělskými strojními součástmi a problematikou opotřebení se zabýval např. V. Jankauskas, který uvádí, že životnost dílů při práci v abrazivním prostředí je poměrně krátká a to od 2 hektarů (pro písčito-kamenitou půdu) do 80 hektarů (v hlinité půdě). A je názoru, že tvrdostní poměr abrazivní látky a oceli má největší vliv na abrazi oceli [13].

3.3 Opotřebení

[8, 19]

Nejčastější příčinou, která omezuje spolehlivost a životnost ať již nástrojů, strojů či zařízení, je opotřebení¹⁸. Jedná se o složitý jev, a proto během rozboru příčin krátké spolehlivosti a životnosti je důležitá úzká spolupráce mezi konstruktérem, technologem, materiálovým odborníkem i uživatelem, jelikož opatření pro optimalizaci faktorů na dosažení zlepšení životnosti a spolehlivosti spadá do všech těchto oblastí. Nevýhoda však spočívá ve faktu, že výsledky laboratorních zkoušek je možné aplikovat až po důkladné analýze provozních podmínek s tím, že je zapotřebí je porovnávat s provozními zkouškami na daném typu stroje či zařízení. Na základě normy ČSN 01 5050 lze rozdělit opotřebení na šest základních druhů: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Ačkoliv tato norma neplatí již od roku 2007 a byla zrušena bez náhrady, obsahuje názvosloví týkající se oblasti opotřebení materiálu a výzkumu.

3.3.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je typické při smýkání dvou tuhých těles přitlačovaných normálovou silou, vlivem toho dochází k dotyku, někdy i ke spojení, a následnému porušování povrchových vrstev. Adhezivní opotřebení ovlivňují především faktory, jako je hloubka vnikání a poloměr zakřivení povrchových mikronerovností, velikost zátěže, rychlost smýkání a schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje.

3.3.2 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je velmi blízké opotřebení abrazivnímu, je charakteristické účinkem částic buď samotného nesoucího média (kapalina, pára či plyn), nebo jsou částice

¹⁸ Opotřebení lze definovat jako nežádoucí změnu povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává.

neseny proudem kapaliny či plynu. Intenzitu opotřebení ovlivňuje především druh, velikost tvar, úhel dopadu a relativní rychlost částic, teplota a chemické vlastnosti nosného média, vlastnosti materiálu, který je opotřebován.

3.3.3 Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení vzniká v místech, kde zaniká kavitační dutina v kapalině, čímž je oddělován materiál. K tomuto procesu dochází v oblasti změny tlaku kapaliny a společně s teplotou, obsahem plynů v kapalině, povrchovém napětí a viskozitě kapaliny ovlivňují intenzitu opotřebení.

3.3.4 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je způsobeno kumulací povrch v povrchové vrstvě při opakovaných kontaktních napětích. Pakliže napětí překročuje mez kluzu, dochází k nízkocyklové únavě, pod mezí kluzu se jedná o únavu vysokocyklovou. Hlavní vliv na únavové opotřebení mají provozní podmínky, ale též tvrdost povrchové vrstvy, drsnost povrchu a nečistoty

3.3.5 Vibrační opotřebení

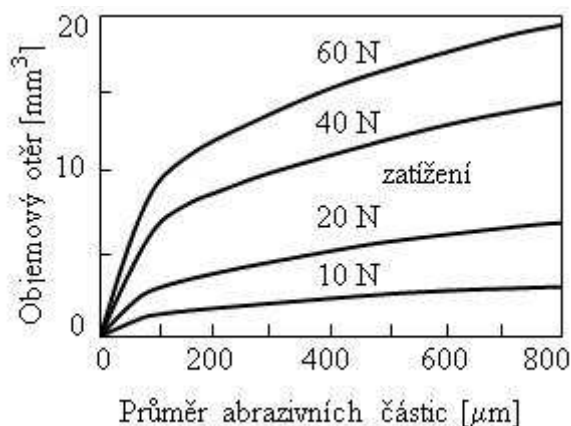
Vibrační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic materiálu v místech kmitavých tangenciálních posuvů funkčních ploch při jejich současném zatížení normálními silami, přičemž vzájemný pohyb má různý původ. Tento druh opotřebení tak ovlivňuje zejména frekvence a amplituda pohybu, měrný tlak ve styku součástí a vlastnosti materiálu.

3.3.6 Abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení může dojít při styku dvou povrchů, kdy jeden nebo oba jsou drsné, nebo kdy se mezi těmito povrchy vyskytují volné částice, které opotřebení způsobují. Charakteristické u tohoto druhu opotřebení je, že v průběhu dochází k narušování funkčního povrchu materiálu oddělováním a to v podobě rýh či seříznutí. Abrazivní opotřebení ovlivňuje především množství, velikost, tvar, pevnost a tvrdost částic, dále též rychlost pohybu a velikost normálové síly. V literatuře je možné se setkat jednak s abrazí tří tělesovou, kde jsou abrazivní částice ve volném prostoru, a dvou

tělesovou, při níž jsou abrazivní částice vázané. Závislost objemového otěru na průměru abrazivních částic je vyobrazena na Obrázku 18.

Obrázek 18: Závislost objemového otěru při konstantní délce třecí dráhy, na zatížení a na velikosti abrazivních částic u dvou tělesové abraze



Zdroj: [8, s. 382]

Hlavní faktory, které ovlivňují rychlost opotřebení, dle Bobobee Emmanuela zahrnují chemické složení, tvrdost a fyzikální faktory půdy, společně s obsahem písku a tvrdostí radlic. Taktéž z jejich studie lze vyčíst, že míra opotřebení všech radlic byla vyšší v půdách s rostoucí pískovou frakcí [12].

Tabulka 5: tvrdost některých minerálů a abraziv

Materiál	Tvrdost (HV)	Kovový materiál	Tvrdost (HV)
vápenec	110	železo Armco	90
sklo	500	žihané oceli	100 – 250
živec	600 – 750	perlitická ocel	230 – 350
křemen	900 – 1280	ocel pro valivá ložiska	700 – 950
WC (karbid wolframu)	1900	nástrojové oceli	700 – 1000
korund	2000	cementovaná ocel	900
TiC (karbid titanu)	2450	nitridovaná ocel	900 – 1250
SiC (karbid křemíku)	2500	WC+Co	1400 – 1800

Zdroj: [20]

V souvislosti se zvýšením proti opotřebení M. A. Moore vznáší otázku na možnost použití keramického materiálu odolného proti abrazivnímu opotřebení, ale zároveň upozorňuje na katastrofální důsledky při nárazu takovýchto strojních součástí se skeletem v půdě [18].

3.4 Houževnatost

V půdě jsou strojní součásti zatěžovány nejen silami stálými či pozvolna se měnícími, velmi často dochází k dynamickému namáhání vlivem skeletu v půdě. Toto rázové namáhání může vyvolat poruchu soudržnosti materiálu (ve formě trhlin či lomů), zapříčinit jej však může též všeobecně nízká houževnatost materiálu strojního zařízení či jiné vnější vlivy (např. teplota prostředí).

Houževnatostí je rozuměna schopnost materiálu odolávat ohýbání a nárazům bez vzniku trhlin. Rázová houževnatost je pak schopnost absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem, kvůli rychlostem a možným interakcím, v půdě např. s kameny. Při zpracování je houževnatost materiálu do značné míry ovlivněna tepelným zpracováním.

3.5 Tepelné zpracování

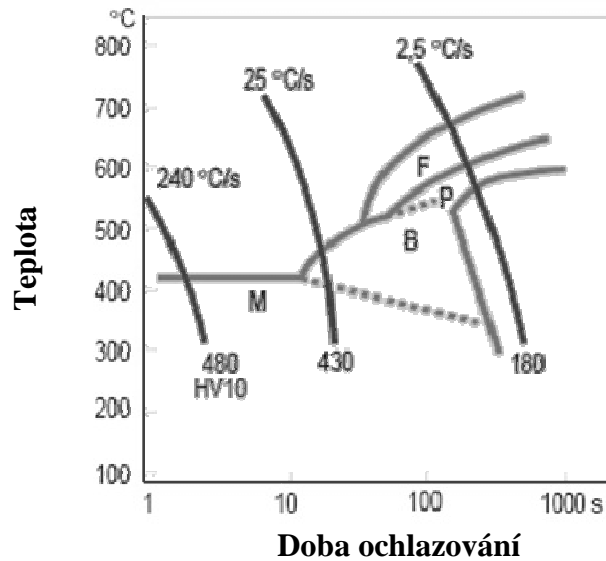
Kovy a jejich slitiny se zpracovávají nejen za účelem dosažení požadovaného tvaru, ale také pro získání požadovaných vlastností. Mezi jednotlivými způsoby zpracování a výslednými vlastnostmi materiálu je úzká souvislost, dochází především k ovlivnění vnitřní struktury, poruchám krystalové mřížky, vnitřním pnutím aj[1]. Je-li znám předchozí způsob zpracování, lze předpokládat jisté charakteristické vlastnosti a případně tyto vlastnosti dalším zpracováním upravit.

Tepelné zpracování zahrnuje postupy, při kterých je materiál v tuhém stavu záměrně ohříván a ochlazován takovým způsobem, aby byly získány požadované vlastnosti: mechanické, technologické, fyzikální nebo jiné. Během tepelného zpracování se využívá fázových a strukturních přeměn. Při fázových změnách v tuhém stavu je dosažení rovnovážného stavu určováno difúzí, což znamená, že průběh difúze má rozhodující vliv na výsledek tepelného zpracování. [3]

Na základě způsobu ovlivnění difúze lze rozdělit tepelné zpracování na dvě skupiny:

- žíhání – tepelné zpracování, při němž bývá difúze podporována a zvyšuje se stabilita struktury,
- kalení – tepelné zpracování, při němž bývá difúze přibrzděována nebo zcela zamezena a stabilita struktury se tím snižuje [3].

Obrázek 19: S-křivky oceli Boron 27



Zdroj: interní materiál

3.5.1 Kalicí prostředí

[3, 5, 15]

Úkolem kalicího prostředí je ochladit materiál s cílem vytvořit martenzitickou strukturu v předem stanovené části průřezu. v praxi se setkáváme s několika druhy ochlazovacích prostředí, kterými jsou vzduch, olej, voda, kovové lázně.

Každé z prostředí má své výhody a nevýhody, které lze shrnout do následujícího přehledu.

Voda

- velmi účinné kalicí prostředí,
- nehořlavé, nenáročné a levné,
- ochlazování neprobíhá plynule – v průběhu se vytváří parní polštář, který zpomaluje ochlazování. (jeho tvorbu do určité míry zmenšit a to pohybem materiálu v kalicím prostředí,
- s rostoucí teplotou vody prudce klesá ochlazovací účinnost

Vzduch

- nejmírnější kalicí prostředí,
- velmi malé vnitřní pnutí (vliv nízkých hodnot rozdílu teplot mezi jádrem a povrchem materiálu)
- nebezpečí oduhličení

Olej

- používají se především minerální oleje, přičemž jejich vhodnost je dána především jejich viskozitou, kterou má zpravidla při přehřátí na 50 °C,
- jedná se o mírnější kalicí prostředí než voda,
- v průběhu stárne v důsledku oxidace, uhelnatění pryskyřičnatění a znečištění okujemi a prachem, takže je nutná výměna,
- nebezpečí vzplanutí,
- vyšší pořizovací cena v porovnání např. s vodou,
- negativní vliv na životní prostředí. [Kraus V.]

Solné lázně

- maximum rychlosti ochlazování se nachází v oblasti vysokých teplot,
- rychlost ochlazování je značně ovlivněna teplotou lázně,
- nízké vnitřní pnutí v průběhu ochlazování,
- nutnost pečlivého umytí po ochlazení.

Roztavené kovové lázně

- používají se omezeně, nejčastěji olovo,
- vlastnosti mají podobné solným lázním.

Ačkoliv je intenzita ochlazování jedním z hlavních kritérií při hodnocení, v současné době se stále více přihlíží i na hledisko ekologické, fyziologické nezávadnosti, snadné omyvatelnosti, oxidace aj. [5]

U tepelného zpracování, a nejen zde platí, že pokud není dodržen předepsaný technologický postup při výrobě, může materiál vykazovat po dohotovení závady jako například: nízká tvrdost, velká křehkost, trhliny, jak schematicky zobrazuje Tabulka č. 6.

Tabulka 6: Typické vady a jejich příčiny

Typ závady	Možná příčina
Nízká tvrdost	nízká kalící teplota
	oduhličení povrchu
	nedostatečné popouštění
	příliš vysoká popouštěcí teplota
Nadměrná křehkost	překročení kalící teploty
	nedostatečné popouštění
	přehřátí
	nevhodné nebo nedostatečné prokování
Trhliny	spálení oceli
	vzniklé při ohřevu (rychlý ohřev)
	vzniklé při kalení (příliš ostré kalící prostředí, nesprávný postup kalení)

Zdroj: [BENEŠ Václav, 1991, s. 75]

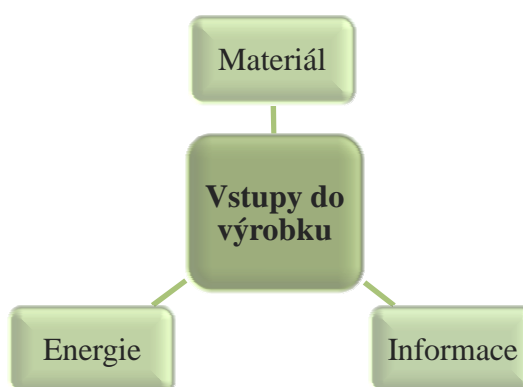
3.6 Cenové aspekty

Ve zjednodušeném modelu je cena výrobku závislá na třech hlavních vstupech, kterými jsou materiál, energie a informace (tj. teoretické a praktické poznatky), jak je zobrazeno na Obrázku 20 [9].

Při tvorbě ceny je možné definovat tři způsoby. Nejjednodušší a často využívaný v západní Evropě a Spojených státech je označován jako „Rule of thumb“ (volně přeloženo „od oka“). Principem je jednoduchá konverze ceny materiálu do celkové ceny dílce, často pomocí fixního koeficientu, avšak základ této metody spočívá v dlouhodobých zkušenostech. V pořadí druhým přístupem jsou výpočtové metody, založené na pokusu analyzovat údaje o výrobním zařízení a převést tyto údaje do ceny výrobku. Tato metoda ovšem založena na historických údajích a postrádá predikční schopnost, proto je nejlépe

hodnocena třetí metoda, založená na univerzitě MIT a nazývaná „modelem technických nákladů“. Principem této metody je separátní počítání variabilních a fixních nákladů. Jednotlivé náklady jsou detailně posuzovány a hodnoceny. Získané výsledky jsou následně přímo použity do modelového výpočtu, nebo se stanou součástí komplexnějších inženýrských parametrů a až poté jsou uplatněny v modelovém výpočtu [9].

Obrázek 20: Hlavní nákladové vstupy do výroby



Zdroj: [9, s. 367] upraven

Na koncovém trhu se lze setkat jednak s cenou stanovenou v závislosti na hmotnosti (kilogramy, ale mnohem častěji tuny), nebo cenou vztaženou na množství, kdy např. u plechů je cena vztažena na velikost rozměrů (délka, šířka a tloušťka). V případě borové oceli, za tepla válcované, se můžeme setkat s cenou v rozmezí 200 až 1200 dolarů za tunu [26].

4 Výsledky a diskuse

Vzorky ocelí byly rozděleny do dvou skupin (A, B) v závislosti na typu výrobce, resp. druhu oceli, a tepelně zpracovány v laboratoři (jak je uvedeno v kapitole 2.2.1 Návrh experimentu) s dodržением vstupních, dvou úrovnových, faktorů. Vzhledem k množství vzorků oceli „A“ (Domex 27) bylo možné provést dvě replikace, proto byla jedna replika označena jako „A 1“ a druhá „A 2“

4.1 Výsledky měření makrotvrdoti

Jak je uvedeno v metodické části práce, po tepelném zpracování bylo provedeno měření tvrdosti dle Rockwella (HRD) a Vickerse (HV 30), jejichž výsledné průměrné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 7. U vzorků ocelí „A“ byla zjištěna tvrdost v rozmezí 43,5 – 54,6 HRD a 324,3 – 467,7 HV 30. U vzorků ocelí „B“ byla zjištěna tvrdost v rozmezí 38,5 – 57,5 HRD a v rozmezí 308,5 – 465,0 HV 30. Zároveň byla měřena tvrdost dvou vzorků bez tepelného zpracování pomocí metody dle Vickerse, přičemž u vzorku A byla zjištěna hodnota tvrdosti 203,6 HV a u vzorku s označením B tvrdost 204,7 HV.

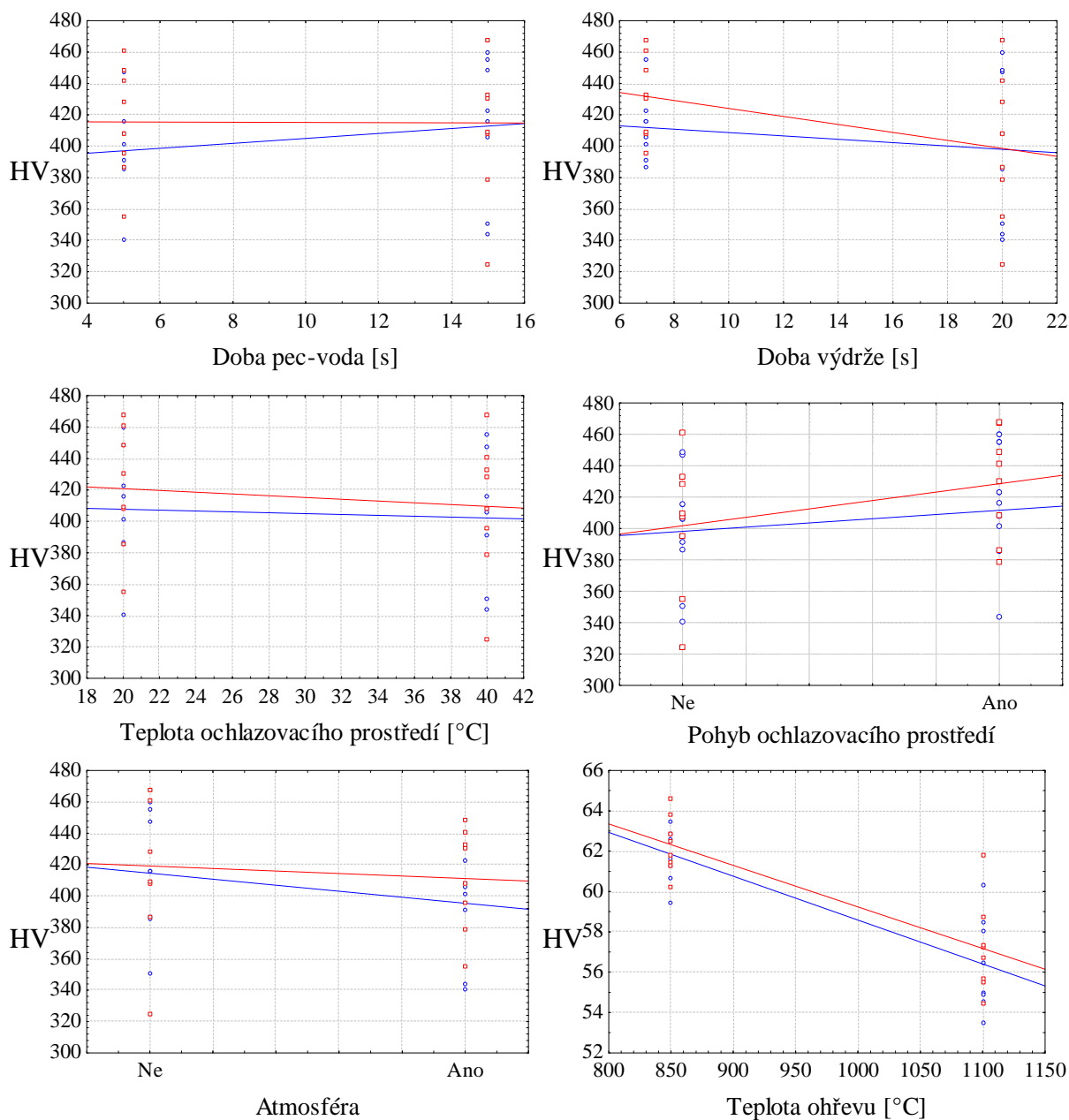
Z naměřených hodnot vzorků, po tepelném zpracování, byly vzaty průměry, z nichž byly vytvořeny grafy závislostí jednotlivých faktorů na tvrdost materiálu. Na Obrázku 21 je patrný vliv jednotlivých faktorů na vývoj tvrdosti, kdy na ose x je zkoumaný faktor a na ose y tvrdost dle Vickerse, přičemž modrá barva charakterizuje první repliku a červená repliku druhou. Z jednotlivých grafických vyobrazení vyplývá, že tvrdost (v tomto případě HV) je vyšší, čím je:

- Teplota ohřevu nižší,
- Doba výdrže na kalicí teplotě nižší,
- Doba prodlevy mezi pecí a vodou vyšší,
- Teplota ochlazovacího prostředí nižší,
- vliv Atmosféry nižší,
- a při Pohybu vzorku v ochlazovacím prostředí, jelikož intenzivní pohyb umožňuje odvod tepla nejen parou (parní polštář), ale též kapalinou, která je v kontaktu s ochlazovaným vzorkem.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty výsledků tvrdosti vzorků

Metoda	HRD			HV 30		
	A 1	A 2	B	A 1	A 2	B
Označení vzorku						
1	52,6 ± 2,0	51,3 ± 2,3	54,2 ± 0,8	386,5 ± 29,0	461,1 ± 32,6	465,0 ± 17,4
2	48 ± 3,4	48,8 ± 2,4	48,8 ± 1,4	415,5 ± 23,8	409,5 ± 21,4	408,6 ± 20,0
3	50,7 ± 1,9	52,5 ± 1,4	53,1 ± 1,3	448,7 ± 15,9	407,6 ± 20,9	429,4 ± 31,1
4	43,5 ± 4,2	45,6 ± 2,0	45,5 ± 1,8	340,7 ± 34,1	355,0 ± 23,4	308,5 ± 16,6
5	49,4 ± 1,1	51,4 ± 1,6	55,1 ± 1,6	406,1 ± 17,9	433,1 ± 21,3	441,5 ± 23,2
6	48,4 ± 2,4	47,2 ± 2,4	49,0 ± 1,4	391,3 ± 18,7	395,2 ± 22,4	364,4 ± 16,0
7	51,6 ± 1,3	51,8 ± 0,8	51,4 ± 1,7	447,0 ± 10,5	428,4 ± 22,5	394,5 ± 58,9
8	44,9 ± 4,1	44,4 ± 4,2	43,7 ± 3,2	350,5 ± 39,6	324,3 ± 26,7	400,6 ± 29,3
9	52,8 ± 1,3	52,9 ± 0,7	52,8 ± 2,0	401,5 ± 61,4	448,9 ± 33,2	435,3 ± 24,8
10	50,3 ± 3,1	51,8 ± 2,3	50,9 ± 1,4	423,2 ± 36,0	430,2 ± 32,1	412,9 ± 17,8
11	52,8 ± 1,2	53,8 ± 1,2	51,1 ± 1,1	460,0 ± 20,2	467,7 ± 9,9	398,5 ± 46,9
12	45,0 ± 3,5	45,5 ± 4,4	—	385,6 ± 25,3	386,1 ± 23,6	—
13	53,5 ± 1,3	54,6 ± 1,1	53 ± 1,4	455,1 ± 60,0	467,5 ± 29,7	413,2 ± 25,3
14	46,5 ± 1,9	47,3 ± 3,7	48 ± 1,3	416,2 ± 32,1	408,4 ± 26,5	415 ± 18,6
15	51,3 ± 1	50,2 ± 1,4	52,4 ± 1,1	408,0 ± 11,6	441,2 ± 27,4	447,4 ± 19,9
16	44,5 ± 2,1	46,8 ± 3,8	46,4 ± 1,2	343,6 ± 15,9	378,7 ± 40,4	376,8 ± 25,7

Obrázek 21: Průměry tvrdostí HV v závislosti na faktorech vzorku A



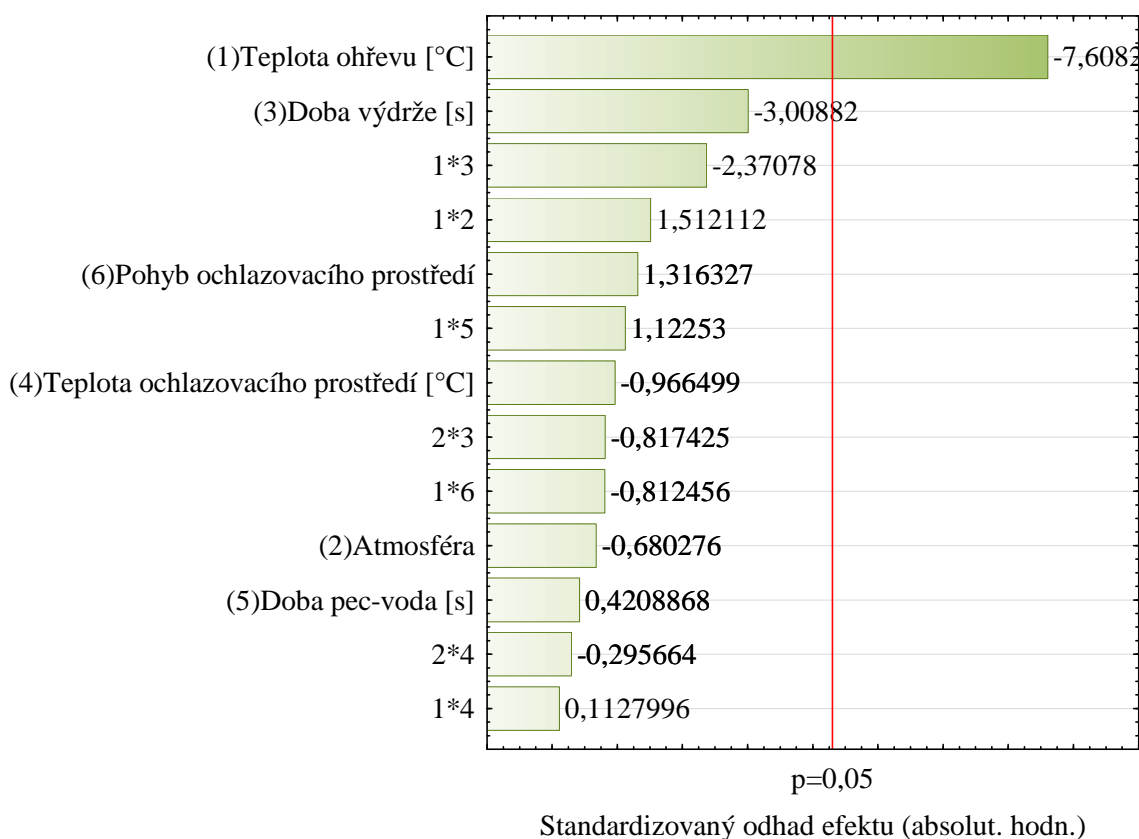
Obdobného charakteru jsou též grafická znázornění u vyhodnocení tvrdosti HRD pro vzorky A 1, A2, B a tvrdosti HV vzorků B s rozdílem, že u vzorků B měla teplota ochlazovacího prostředí lineárně neměnný či stoupající charakter.

Pro další postup a k testování významných efektů bylo třeba nejmenší efekty faktorů vyřadit, k čemuž byl využit Paretův graf, který zahrnuje nejen samotné faktory, ale též dvoufaktorové interakce. Interakce jsou v grafu značeny sloučením dvou čísel, která tak zastupují jednotlivé faktory, jejichž číslo je uvedeno v závorce před faktorem.

4.1.1 Vyhodnocení tvrdosti HRD vzorku A 1

Jak plyne z Paretova grafu pro vzorek A 1, při měření tvrdosti podle Rockwella, na Obrázku 22, hladinu významnosti překročil pouze faktor „Teplota ohřevu“, avšak při následném zpracování odhadů efektů (viz. Tabulka 8) bylo zjištěno, že nelze opomenout ani faktory „Doba výdrže“ a „Interakce mezi teplotou ohřevu a dobou výdrže“. Důvodem zahrnutí dalších faktorů a jejich interakcí je hranice spolehlivosti 95 %, která byla při výpočtu stanovena.

Obrázek 22: Paretův graf pro HRD vzorku A1



Tabulka 8: Odhady efektů významných faktorů pro HRD vzorku A1

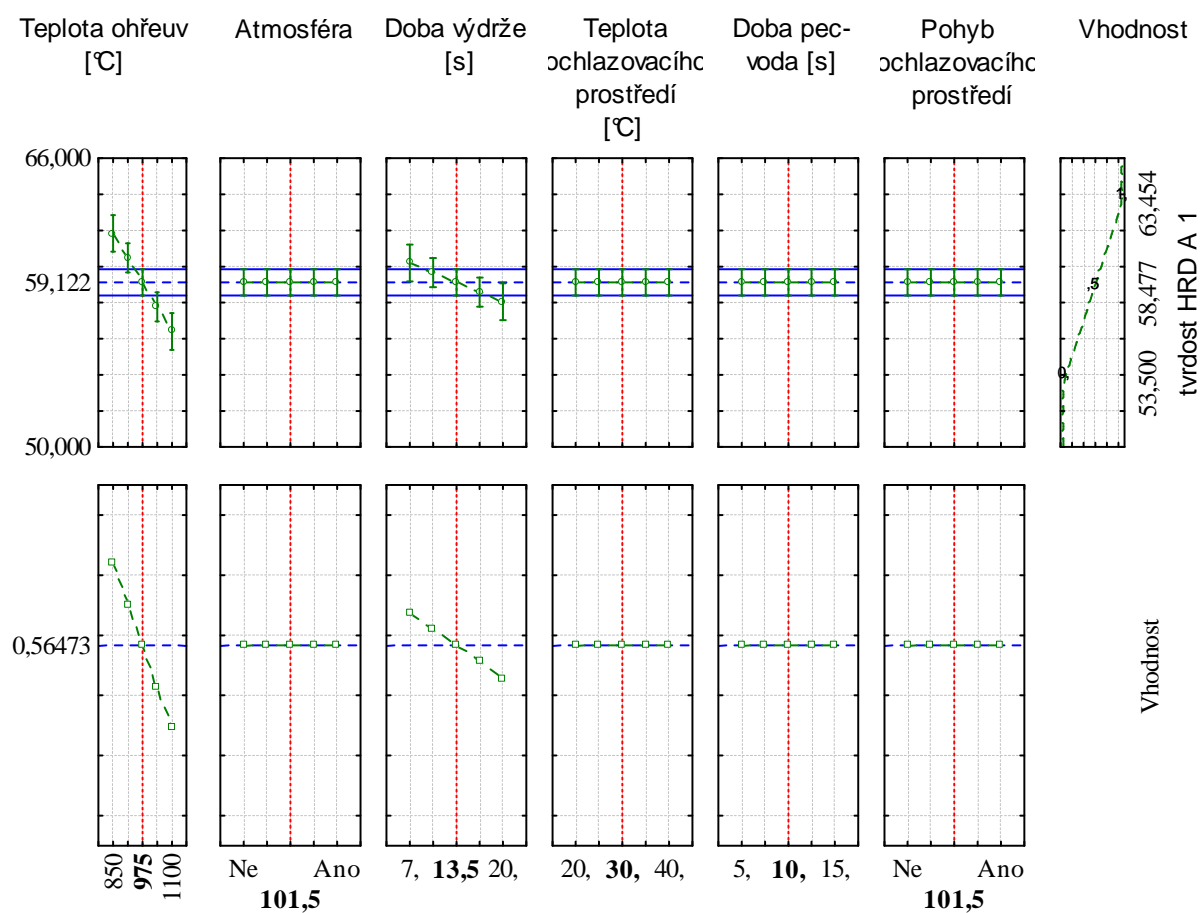
Faktor	Efekt	Směrodatná chyba	t (12)	p
Průměr/ab.č.	59,122	0,331	178,751	0,000
Teplota ohřevu	-5,437	0,661	-8,219	0,000
Doba výdrže	-2,150	0,661	-3,251	0,007
Interakce Teploty ohřevu a Doby výdrže	-1,694	0,661	-2,561	0,025

Výsledky analýzy rozptylu významných faktorů jsou uvedeny v Tabulce 9 a stejného charakteru výsledů lze dosáhnout i z Obrázku 23, který charakterizuje profily pro předpovědi a vhodnost, z něhož je patrné, že za statisticky významné lze považovat faktory: Teplota ohřevu a Doba výdrže.

Tabulka 9: ANOVA významných faktorů pro HRD vzorku A1

	SS	df	MS	F	p
Teplota ohřevu	118,250	1	118,250	67,559	0,000
Doba výdrže	18,494	1	18,494	10,566	0,007
Interakce Teploty ohřevu a Doby výdrže	11,482	1	11,482	6,560	0,025
Chyba	21,004	12	1,750		
Celk. SS	169,229	15			

Obrázek 23: Pozorované a naměřené hodnoty HRD vzorku A1



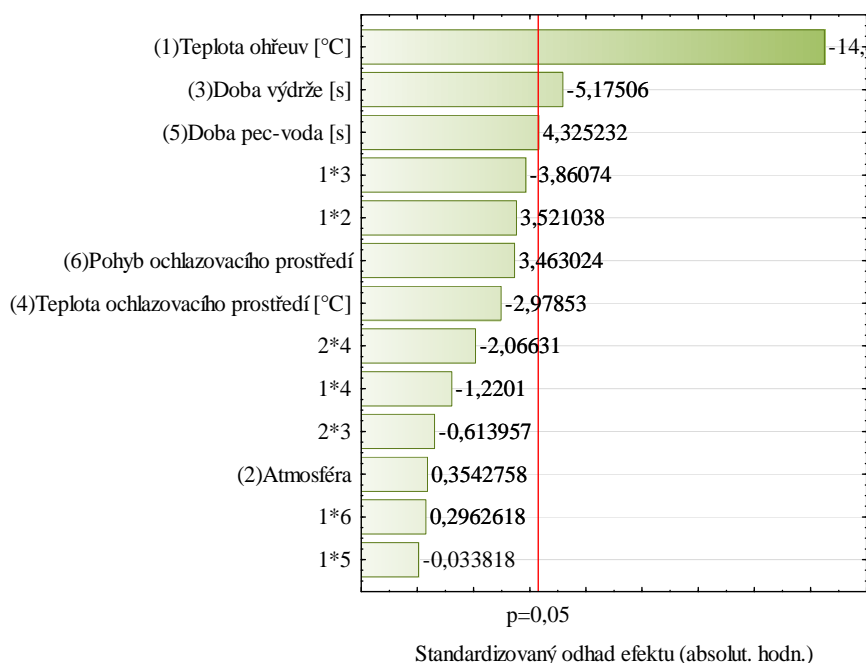
Z analýzy výsledků vyplývá, že faktor „Teplota ohřevu“ je nejvýznamnější, jelikož vliv tohoto faktoru přímo ovlivňuje výslednou dosahovanou tvrdost HRD. Vzhledem ke skutečnosti, že hodnota efektu (viz. Tabulka 8) je záporná. Znamená to, že při změně teploty ohřevu z 900 °C na 1100 °C způsobí výrazný pokles tvrdosti HRD. Proto je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat teplotu kalení na nižší úrovni nastavení. Dalším významným faktorem je „Doba výdrže“, jejíž hodnota efektu je záporná, což znamená, že změna doby výdrže při ohřevu ze 7 sekund na 20 sekund způsobí pokles tvrdosti HRD. Proto, stejně jako u teploty ohřevu je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat dobu výdrže při ohřevu na nižší úrovni.

Analýza také prokázala synergický efekt kombinace nastavení parametrů „Teploty ohřevu“ a „Doby výdrže“, to znamená, že pokud je parametr „Teploty ohřevu“ nastaven na horní úroveň, změna parametru „Doby výdrže“ vyvolá zvýšení (snížení) hodnoty tvrdosti o 2 HRD. Pokud však budou oba parametry v dolní úrovni, projeví se synergický efekt a hodnota tvrdosti se zvýší o 9 HRD.

4.1.2 Vyhodnocení tvrdosti HRD vzorku A 2

Z Paretova grafu pro vzorek A 2, na Obrázku 24, je patrné, že hladinu významnosti překročil faktor „Teplota ohřevu“, „Doba výdrže“ a „Doba pec – voda“. Pro ověření významnosti byl proveden odhad významnosti efektů a analýza rozptylu, kam byly zařazeny tři výše nejdůležitější efekty. Kde bylo zjištěno, že efekty „Doby výdrže“ a „Doby pec – voda“ jsou vzhledem k hranici spolehlivosti 95 % zanedbatelné. Proto byl výpočet odhadu efektů a analýza rozptylu provedena pro samotný efekt „Teploty ohřevu“ (viz. Tabulka 10 a 11).

Obrázek 24 Paretův graf pro HRD vzorku A 2



Tabulka 10: Odhady efektů významných faktorů pro HRD vzorku A 2

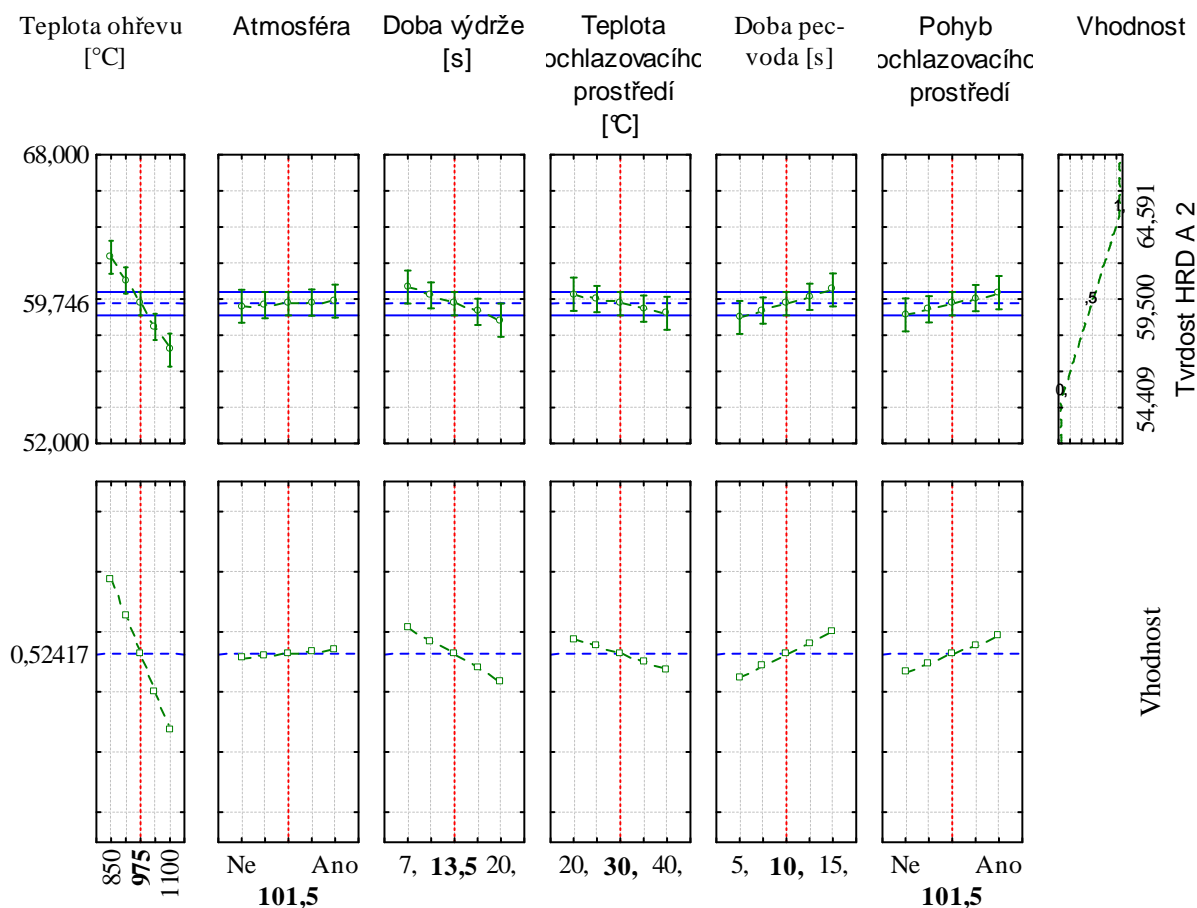
Faktor	Efekt	Směrodatná chyba	t (14)	p
Průměr/ab.č.	59,746	0,479	124,689	0,000
Teplota ohřevu	-5,146	0,968	-5,370	0,000

Tabulka 11: ANOVA významných faktorů pro HRD vzorku A 2

	SS	df	MS	F	p
Teplota ohřevu	105,935	1	105,935	28,838	0,000
Chyba	51,429	14	3,674		
Celk. SS	157,364	15			

Výsledky analýzy rozptylu faktoru „Teplota ohřevu“ je uveden v Tabulce 9 a stejného charakteru výsledků lze dosáhnout i z Obrázku 25, který charakterizuje profily pro předpovědi a vhodnost, z něhož je patrné, že za statisticky významný lze taktéž považovat faktor „Teplota ohřevu“. Zároveň se zde projevuje vliv dalších faktorů: „Doba výdrže“, „Teplota ochlazovacího prostředí“, „Doba pec – voda“, „Pohyb ochlazovacího prostředí“, tyto faktory však byly vzhledem k hranici spolehlivosti 95 % zanedbány.

Obrázek 25: Profily pro předpovědi a vhodnost pro HRD vzorku A 2

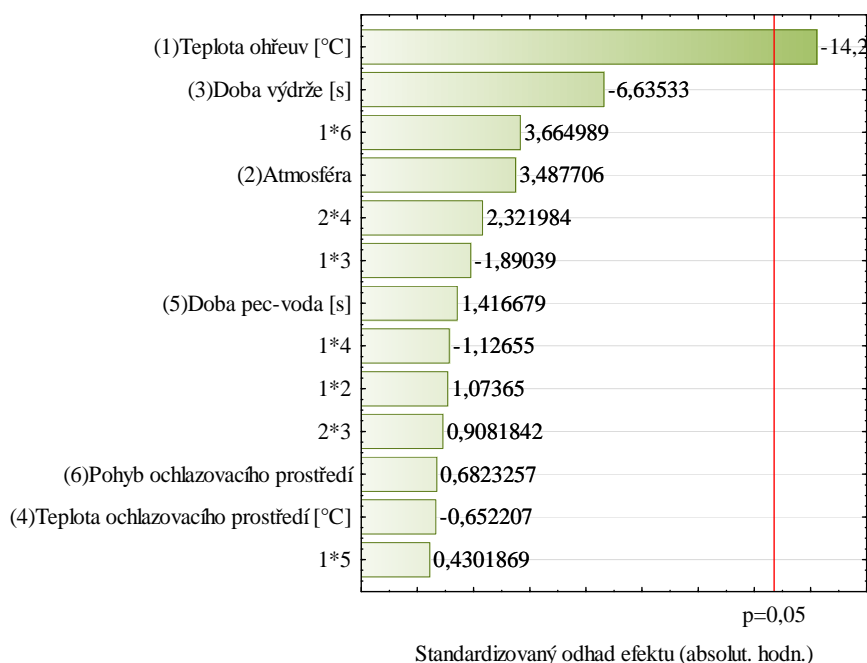


Z analýzy výsledků vyplývá, že faktor „Teplota ohřevu“ je nejvýznamnější, jelikož vliv tohoto faktoru přímo ovlivňuje výslednou dosahovanou tvrdost HRD. Vzhledem ke skutečnosti, že hodnota efektu (viz. Tabulka 10) je záporná. Znamená to, že při změně teploty ohřevu z 900 °C na 1100 °C způsobí výrazný pokles tvrdosti HRD. Proto je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat teplotu kalení na nižší úrovni nastavení.

4.1.3 Vyhodnocení tvrdosti HRD vzorku B

Jak plyne z Paretova grafu pro vzorek B, při měření tvrdosti podle Rockwella, na Obrázku 26, hladinu významnosti překročil pouze faktor „Teplota ohřevu“, avšak při následném zpracování odhadů efektů (viz. Tabulka 12) bylo zjištěno, že nelze opomenout ani faktor „Doba výdrže“. Důvodem zahrnutí tohoto faktoru a vyloučení faktorů ostatních je hranice spolehlivosti 95 %, která byla při výpočtu stanovena.

Obrázek 26: Paretův graf pro HRD vzorku B



Tabulka 12: Odhady efektů významných faktorů pro HRD vzorku B

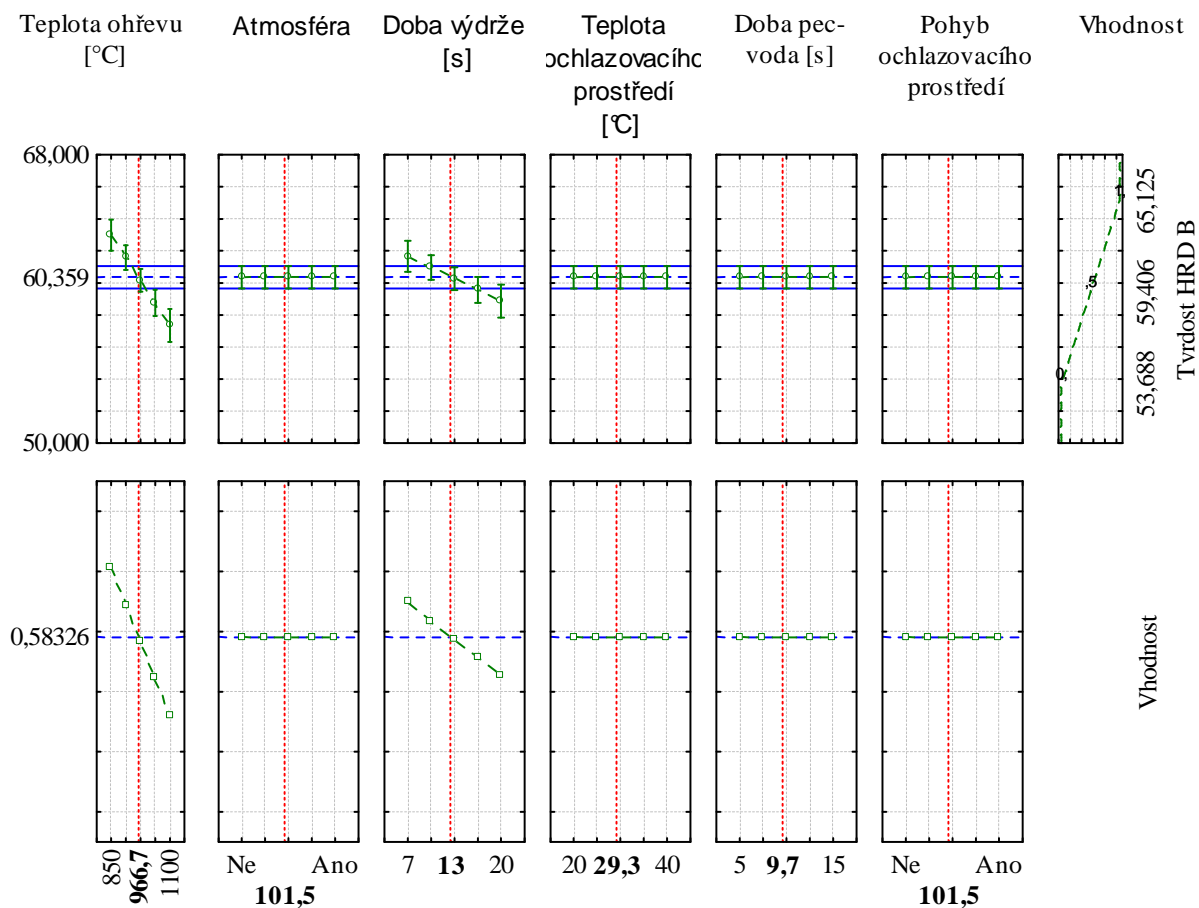
Faktor	Efekt	Směrodatná chyba	t (12)	p
Průměr/ab.č.	60,078	0,325	184,797	0,000
Teplota ohřevu	-5,638	0,650	-8,671	0,000
Doba výdrže	-2,791	0,650	-4,293	0,001

Výsledky analýzy rozptylu významných faktorů jsou uvedeny v Tabulce 13 a stejného charakteru výsledů lze dosáhnout i z Obrázku 27, který charakterizuje profily pro předpovědi a vhodnost, z něhož je patrné, že za statisticky významné lze považovat faktory: Teplota ohřevu, a Doba výdrže.

Tabulka 13: ANOVA významných faktorů pro HRD vzorku B

	SS	df	MS	F	p
Teplota ohřevu	118,071	1	118,071	75,192	0,000
Doba výdrže	28,937	1	28,937	18,428	0,001
Chyba	18,843	12	1,570		
Celk. SS	158,212	14			

Obrázek 27: Profily pro předpovědi a vhodnost pro HRD vzorku B



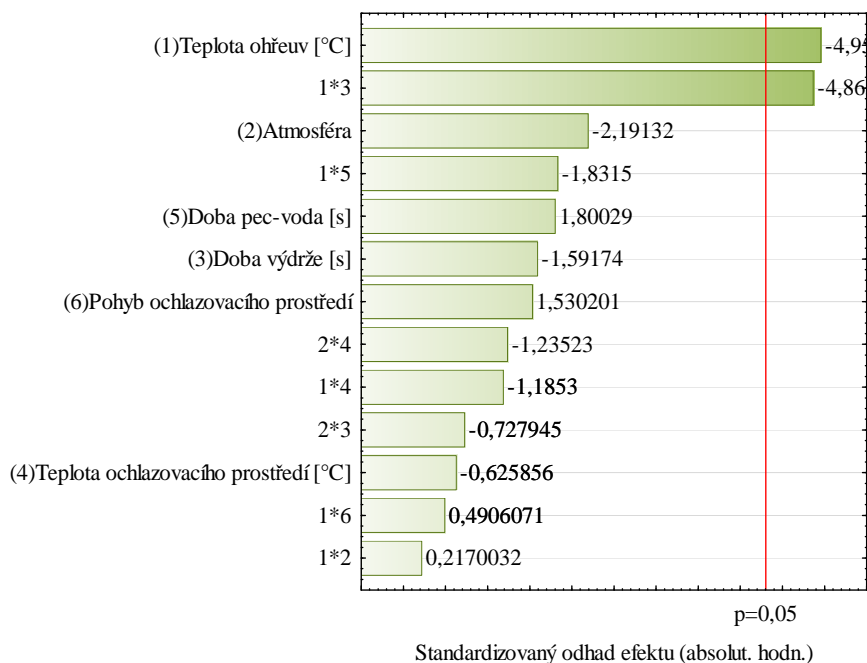
Z analýzy výsledků vyplývá, že faktor „Teplota ohřevu“ je nejvýznamnější, jelikož vliv tohoto faktoru přímo ovlivňuje výslednou dosahovanou tvrdost HRD. Vzhledem ke skutečnosti, že hodnota efektu, uvedená v Tabulce 14, je záporná, lze konstatovat, že při změně teploty ohřevu z 900 °C na 1100 °C způsobí výrazný pokles tvrdosti HRD. Proto je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat teplotu kalení na nižší úrovni nastavení. Dalším významným faktorem je „Doba výdrže“, jejíž hodnota efektu je také záporná, což znamená, že změna doby výdrže při ohřevu ze 7 sekund na 20 sekund způsobí pokles tvrdosti HRD. Proto, stejně jako u teploty ohřevu je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat dobu výdrže při ohřevu na nižší úrovni.

4.1.4 Vyhodnocení tvrdosti HV vzorku A 1

Jak plyne z Paretova grafu pro vzorek A 1, při měření tvrdosti podle Vickerse (na Obrázku 28), hladinu významnosti překročil faktor „Teplota ohřevu“ a interakce teploty

ohřevu a doby výdrže. Tyto dva parametry mají významný efekt vzhledem k hranici spolehlivosti 95 %, která byla při výpočtu stanovena a jsou dále zpracovány v Tabulce 14.

Obrázek 28: Paretův graf pro HV vzorku A 1



Tabulka 14: Odhady efektů významných faktorů pro HV vzorku A 1

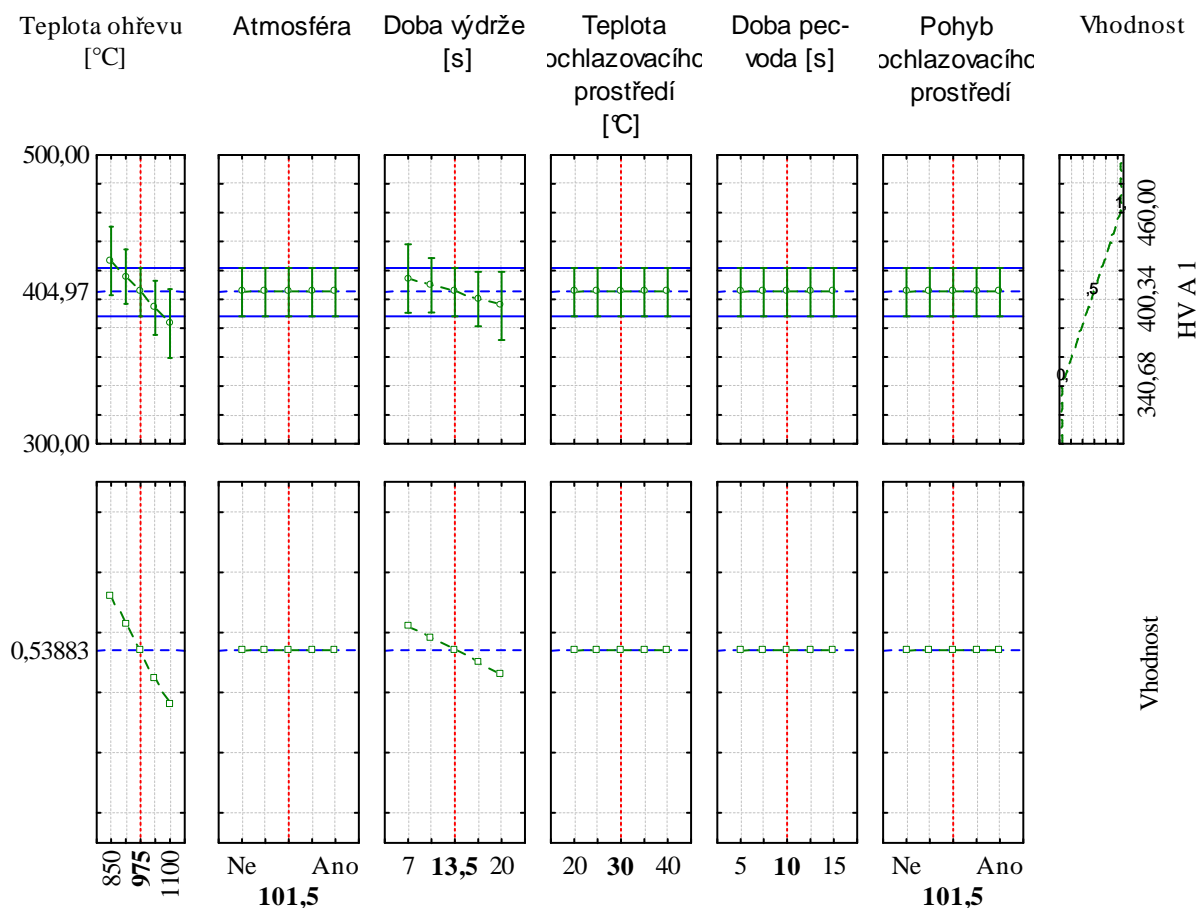
Faktor	Efekt	Směrodatná chyba	t (13)	p
Průměr/ab.č.	404,973	5,738	70,579	0,000
Teplota ohřevu	-43,322	11,476	-3,775	0,002
Interakce Teploty ohřevu a Doby výdrže	-42,523	11,476	-3,706	0,003

Výsledky analýzy rozptylu významných faktorů jsou uvedeny v Tabulce 15 a stejného charakteru výsledů lze dosáhnout i z Obrázku 29, který charakterizuje profily pro předpovědi a vhodnost, z něhož je patrné, že za statisticky významné lze považovat faktory: Teplota ohřevu, a Doba výdrže.

Tabulka 15: ANOVA významných faktorů pro HV vzorku A 1

	SS	df	MS	F	p
Teplota ohřevu	7 507,025	1	7 507,025	14,251	0,002
Interakce Teploty ohřevu a Doby výdrže	7 232,892	1	7 232,892	13,731	0,003
Chyba	6 847,953	13	526,766		
Celk. SS	21 587,870	15			

Obrázek 29: Profily pro předpovědi a vhodnost pro HV vzorku A 1



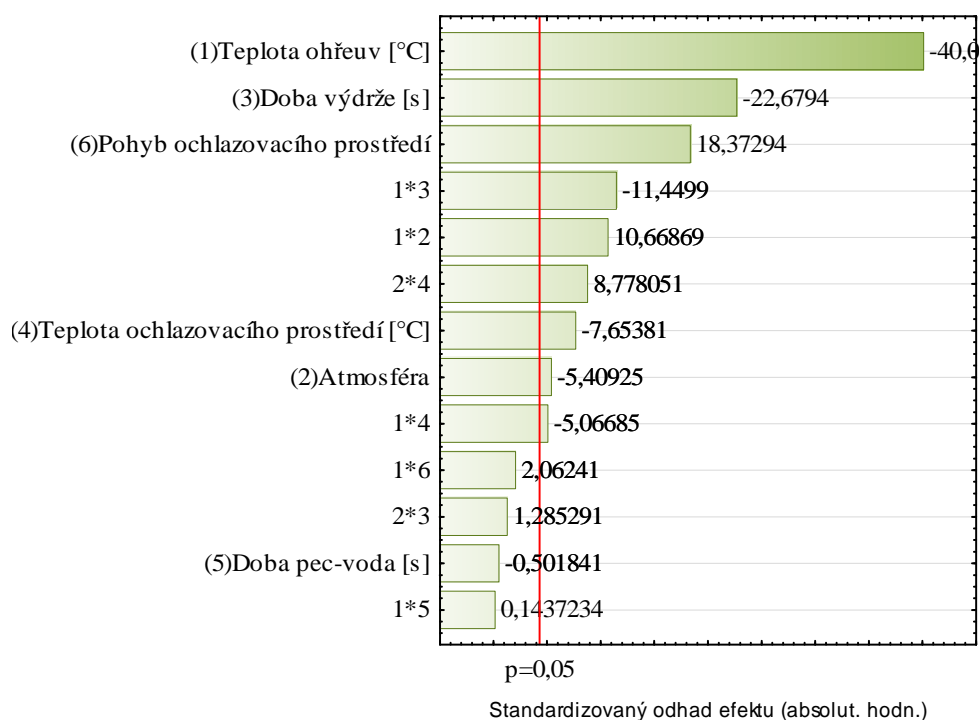
Z analýzy výsledků vyplývá, že faktor „Teplota ohřevu“ je nejvýznamnější, jelikož vliv tohoto faktoru přímo ovlivňuje výslednou dosahovanou tvrdost HV. Vzhledem ke skutečnosti, že hodnota efektu, uvedená v Tabulce 14, je záporná, lze konstatovat, že při změně teploty ohřevu z 900 °C na 1100 °C způsobí výrazný pokles tvrdosti HV. Proto je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat teplotu kalení na nižší úrovni nastavení. Dalším významným faktorem je „Doba výdrže“, jejíž hodnota efektu je také záporná, což znamená, že změna doby výdrže při ohřevu ze 7 sekund na 20 sekund způsobí pokles tvrdosti HV. Proto, stejně jako u teploty ohřevu je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat dobu výdrže při ohřevu na nižší úrovni.

4.1.5 Vyhodnocení tvrdosti HV vzorku A 2

Z Paretova grafu pro vzorek A 2 (viz. Obrázek 30) je patrné, že hladinu významnosti překročily faktory, „Teplota ohřevu“, „Atmosféra“, „Doba výdrže“, „Teplota

ochlazovacího prostředí“, „Pohyb ochlazovacího prostředí“ a interakce teploty ohřevu a atmosféry, teploty ohřevu a doby výdrže, teploty ohřevu a teploty ochlazovacího prostředí, atmosféry a pohybu ochlazovacího prostředí. Tyto faktory byly vybrány vzhledem ke skutečnosti, že jejich hranice spolehlivosti je vyšší 95 %.

Obrázek 30: Paretův graf pro HV vzorku A 2



Tabulka 16: Odhady efektů významných faktorů pro HV vzorku A 2

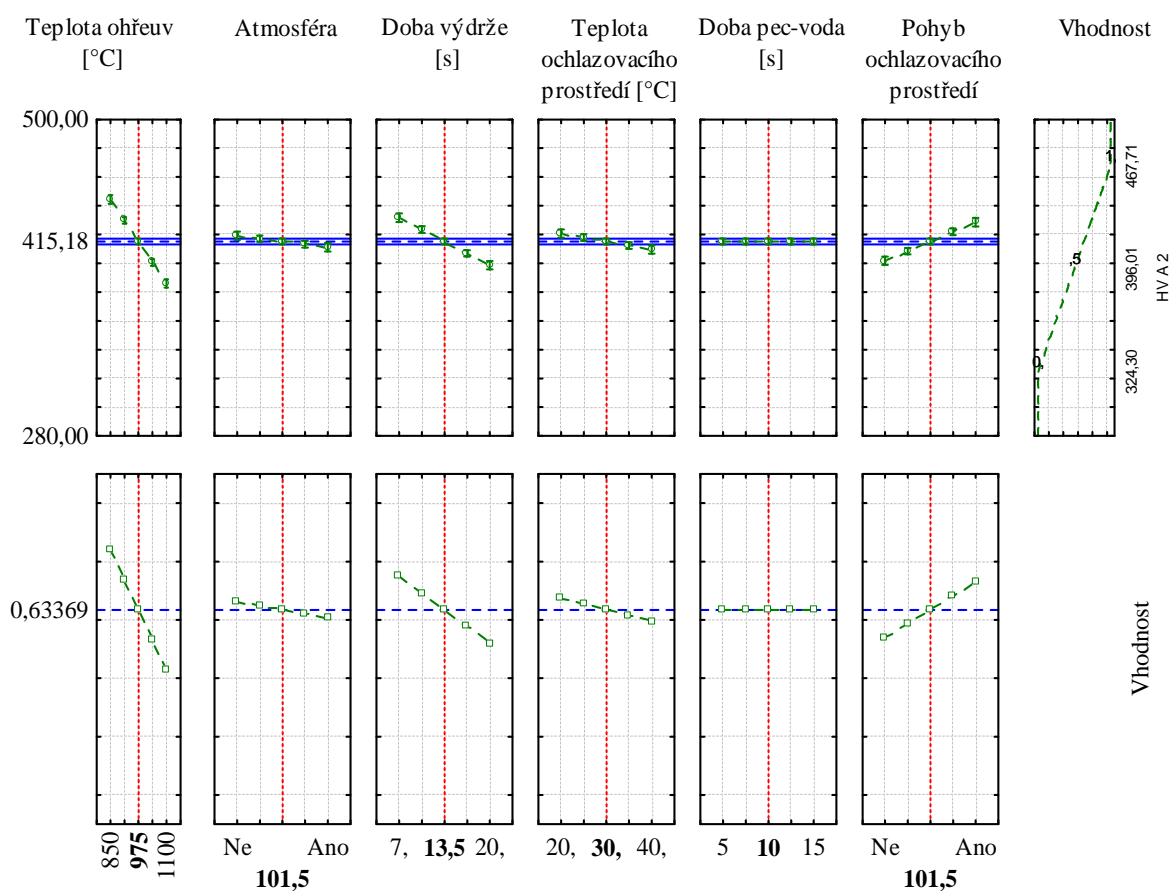
Faktor	Efekt	Směrodatná chyba	t (6)	p
Průměr/ab.č.	415,181	0,852	487,440	0,000
Teplota ohřevu	-58,505	1,704	-34,344	0,000
Atmosféra	-7,893	1,704	-4,633	0,004
Doba výdrže	-33,092	1,704	-19,426	0,000
Teplota ochlazovacího prostředí	-11,168	1,704	-6,556	0,001
Pohyb ochlazovacího prostředí	26,809	1,704	15,737	0,000
Interakce teploty ohřevu a atmosféry	15,567	1,704	9,138	0,000
Interakce teploty ohřevu a doby výdrže	-16,707	1,704	-9,807	0,000
Interakce teploty ohřevu a teploty ochlazovacího prostředí	-7,393	1,704	-4,340	0,005
Interakce atmosféry a pohybu ochlazovacího prostředí	12,808	1,704	7,519	0,000

Výsledky analýzy rozptylu významných faktorů jsou uvedeny v Tabulce 17 a stejného charakteru výsledů lze dosáhnout i z Obrázku 31, který charakterizuje profily pro předpovědi a vhodnost, z něhož je patrné, že za statisticky významné lze považovat faktory: Teplota ohřevu, Doba výdrže, Atmosféra, Teplota ochlazovacího prostředí a Pohyb ochlazovacího prostředí.

Tabulka 17: ANOVA významných faktorů pro HV vzorku A 2

	SS	df	MS	F	p
Teplota ohřevu	13 691,50	1	13 691,50	1179,505	0,000
Atmosféra	249,19	1	249,19	21,467	0,004
Doba výdrže	4 380,44	1	4 380,44	377,370	0,000
Teplota ochlazovacího prostředí	498,90	1	498,90	42,979	0,001
Pohyb ochlazovacího prostředí	2 874,83	1	2 874,83	247,663	0,000
Interakce teploty ohřevu a atmosféry	969,34	1	969,34	83,508	0,000
Interakce teploty ohřevu a doby výdrže	1 116,50	1	1 116,50	96,185	0,000
Interakce teploty ohřevu a teploty ochlazovacího prostředí	218,64	1	218,64	18,836	0,005
Interakce atmosféry a pohybu ochlazovacího prostředí	656,22	1	656,22	56,533	0,000
Chyba	69,65	6	11,61		
Celk. SS	24 725,21	15			

Obrázek 31: Profily pro předpovědi a vhodnost pro HV vzorku A 2



Z analýzy výsledků vyplývá, že faktor „Teplota ohřevu“ je nejvýznamnější, jelikož vliv tohoto faktoru přímo ovlivňuje výslednou dosahovanou tvrdost HV. Vzhledem ke skutečnosti, že hodnota efektu (viz. Tabulka 16) je záporná. Znamená to, že při změně teploty ohřevu z 900 °C na 1100 °C způsobí výrazný pokles tvrdosti HV. Proto je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat teplotu kalení na nižší úrovni nastavení. Dalším významným faktorem je „Doba výdrže“, jejíž hodnota efektu je záporná, což znamená, že změna doby výdrže při ohřevu ze 7 sekund na 20 sekund způsobí pokles tvrdosti HV. Proto, stejně jako u teploty ohřevu je nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat dobu výdrže při ohřevu na nižší úrovni.

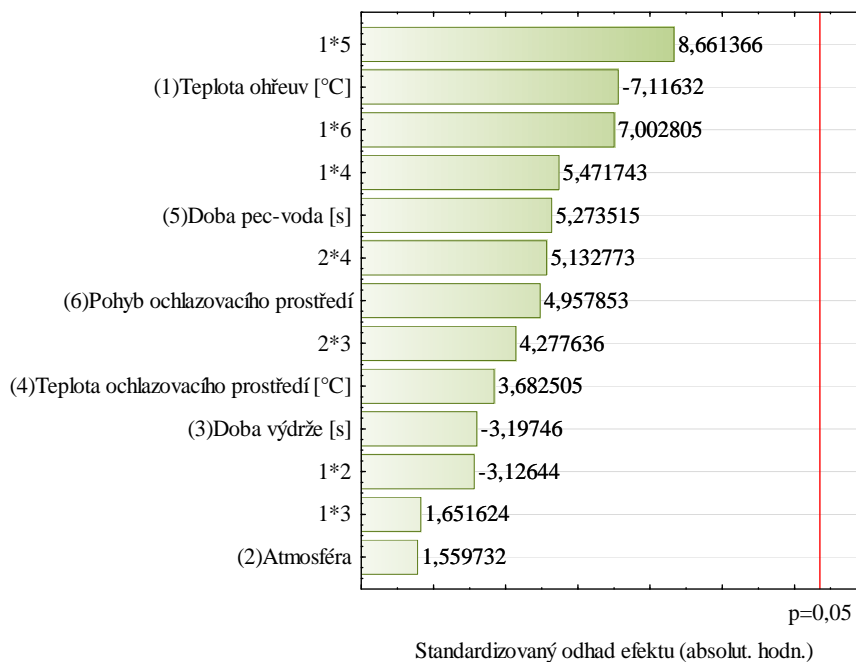
Analýza také prokázala synergický efekt kombinace nastavení parametrů „Teploty ohřevu“ a „Doby výdrže“, to znamená, že pokud je parametr „Teploty ohřevu“ nastaven na horní úroveň, změna parametru „Doby výdrže“ vyvolá zvýšení (snížení) hodnoty tvrdosti o 58 HV. Pokud však budou oba parametry v dolní úrovni, projeví se synergický efekt

a hodnota tvrdosti se zvýší o 109 HV. Obdobným způsobem lze vysvětlit i další synergické efekty ostatních významných interakcí: teploty ohřevu a doby výdrže, teploty ohřevu a teploty ochlazovacího prostředí, atmosféry a pohybu ochlazovacího prostředí, jehož přítomnost zvyšuje odvod tepla a tím i ochlazování vzorku.

4.1.6 Vyhodnocení tvrdosti HV vzorku B

Z Paretova grafu pro vzorek B (viz. Obrázek 32) je patrné, že hladinu významnosti žádný z faktorů nepřekročil. Při následném výpočtu odhadů efektů byl za jediný parametr vybrán faktor: Teplota ohřevu, který vzhledem k hranici spolehlivosti 95 % nelze považovat za zanedbatelný.

Obrázek 32: Paretův graf pro HV vzorku B



Tabulka 18: Odhady efektů významných faktorů pro HV vzorku B

Faktor	Efekt	Směrodatná chyba	t (13)	p
Průměr/ab.č.	405,967	8,185	49,602	0,000
Teplota ohřevu	-44,257	16,369	-2,704	0,018

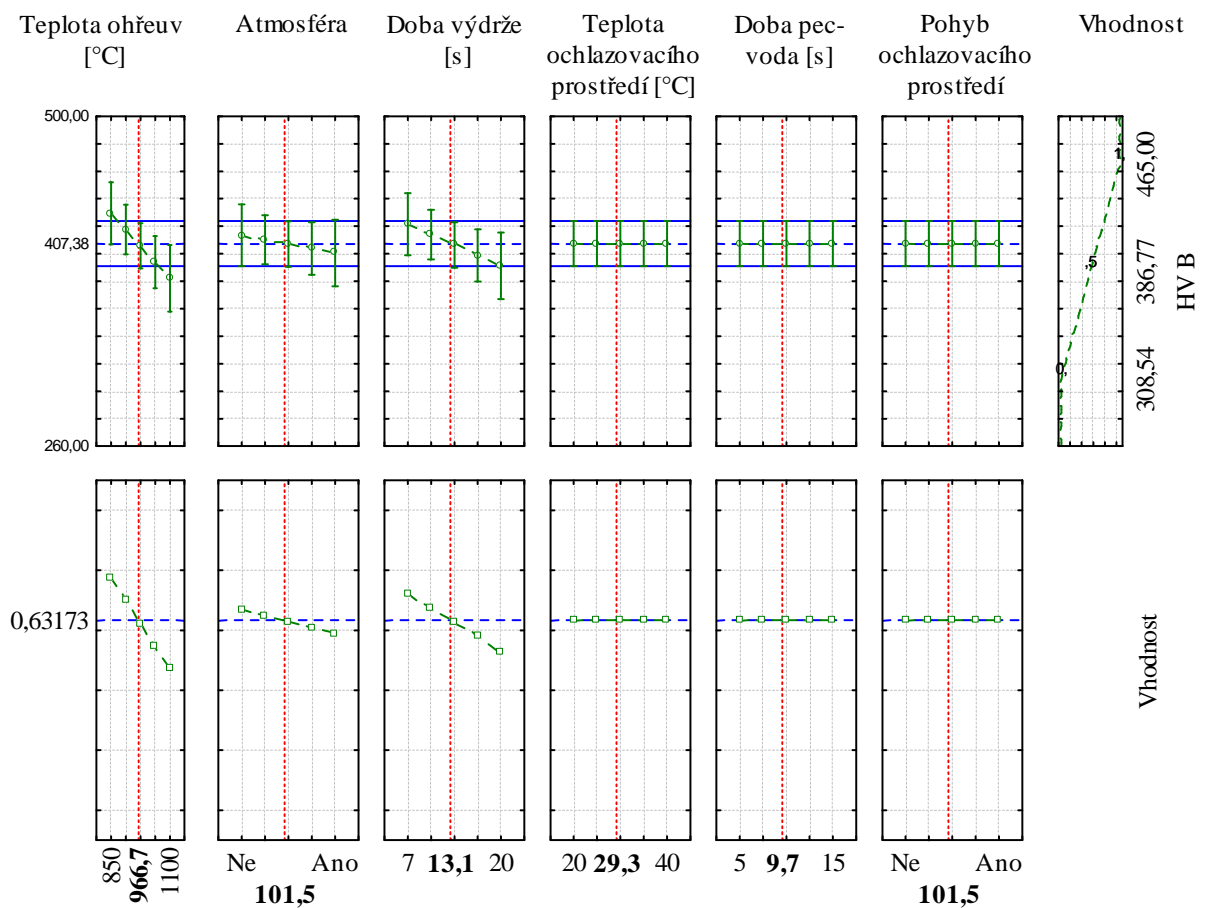
Výsledky analýzy rozptylu významných faktorů jsou uvedeny v Tabulce 19 a stejného charakteru výsledů lze dosáhnout i z Obrázku 33, který charakterizuje profily pro předpovědi a vhodnost, z něhož je patrné, že za statisticky významné lze považovat faktor:

Teplota ohřevu a částečně je zde i projev faktorů: Doba výdrže, Atmosféra, které však nepřekročili hladinu významnosti.

Tabulka 19: ANOVA významných faktorů pro HV vzorku B

	SS	df	MS	F	p
Teplota ohřevu	7312,533	1	7 312,533	7,310	0,018
Chyba	13 004,278	13	1 000,329		
Celk. SS	20 316,810	14			

Obrázek 33: Pozorované a naměřené hodnoty HV vzorku B



Z analýzy výsledků vyplývá, že faktor „Teplota ohřevu“ je nejvýznamnější, jelikož vliv tohoto faktoru přímo ovlivňuje výslednou dosahovanou tvrdost HV. Vzhledem ke skutečnosti, že hodnota efektu, uvedená v Tabulce 18, je záporná, lze konstatovat, že při změně teploty ohřevu z 900 °C na 1100 °C způsobí výrazný pokles tvrdosti HV. Proto je

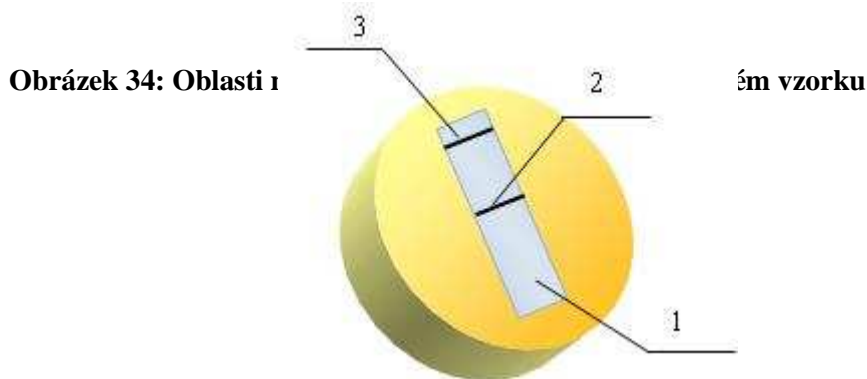
nutné pro dosažení vysokých hodnot tvrdosti po kalení dodržovat teplotu kalení na nižší úrovni nastavení.

Při vyhodnocení zkoušky podle Rockwella a Vickerse je možné si povšimnout, že efekty, resp. významnost jednotlivých parametrů není stejná. Tento fakt lze vysvětlit jako příčinu odlišného principu, na kterém jsou jednotlivé metody založeny, a zároveň je to odůvodnění, proč nebyla při měření zvolena pouze jedna z metod. Oba typy zkoušek, jak je uvedeno v metodické části se navzájem doplňují, avšak měření podle Vickerse je považováno za přesnější.

4.2 Výsledky měření mikrotvrdoti

Mikrotvrdot u vzorku „A“ v rozmezí 432 –638 HV 0,1 (přibližně 78 vpichů na vzorek), u vzorku „B“ v rozmezí 432,6 – 673 HV 0,1 (přibližně 60 vpichů na vzorek). Při vyhodnocování odhadů efektů bylo zjištěno, že nejvýznamnější vliv na tvrdost při měření mikrotvrdoti teplota ohřevu, pohyb ochlazovacího prostředí a doba výdrže, která souvisí s přeměnou původní feriticko-cementické struktury na austenitickou.

Jak je zobrazeno na Obrázku 25, při měření mikrotvrdoti vzorku zalitého do pryskyřičné směsi (1), bylo měření prováděno v oblasti kraje (3) a oblasti středu (2) vzorku.



Zdroj: zpracováno autorem

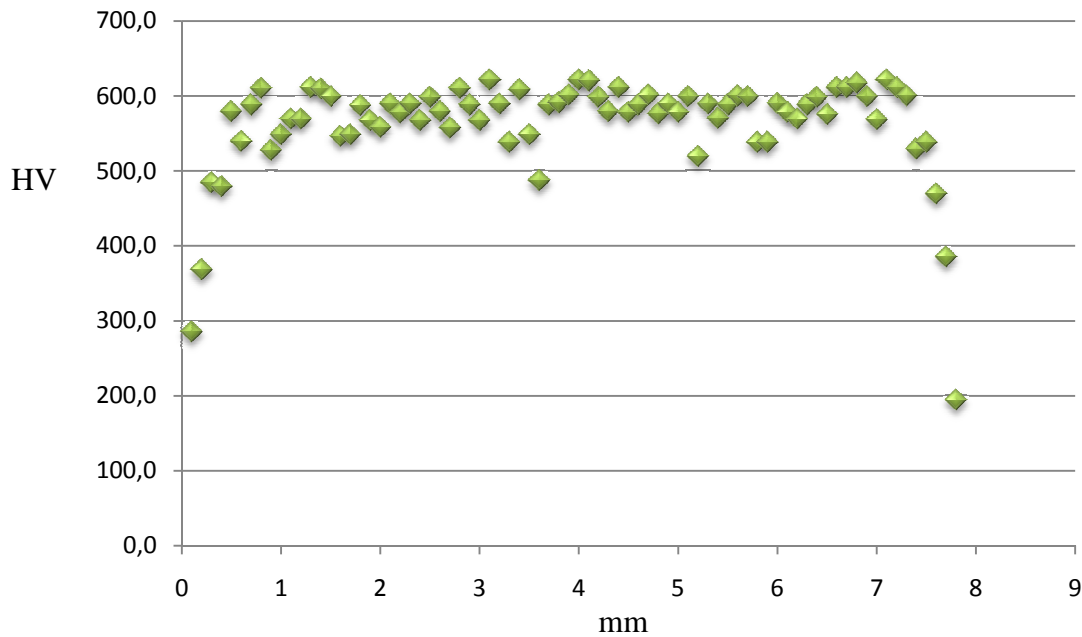
Tabulka 20: Průměrné hodnoty mikrotvrdosti HV 0,1

Označení vzorku	A k	A k	A s	A s	A s	B a	B b
1	455,3 ± 49,5	432 ± 37,2	478,8 ± 54,1	606,6 ± 79,7	505,0 ± 65,0	448,0 ± 58,1	
2	501,8 ± 57,5	515,3 ± 63,4	485,7 ± 58,3	506,1 ± 53	526,2 ± 68,3	462,1 ± 69,7	
3	486,3 ± 64,2	493,9 ± 35,2	459,8 ± 26,2	496,9 ± 27,8	575,0 ± 78,7	619,8 ± 43,8	
4	454,1 ± 49,6	456,1 ± 44,3	544,4 ± 68,5	522,8 ± 56,3	673,9 ± 33,0	659,1 ± 48,8	
5	524 ± 76,4	482,6 ± 69,5	479,5 ± 97,5	494,6 ± 73,5	438,2 ± 70,5	490,6 ± 79,1	
6	549,7 ± 54,6	526,6 ± 50,9	555,5 ± 47	530,4 ± 46,9	452,3 ± 73,1	465,8 ± 88,1	
7	546,8 ± 50,3	528,7 ± 44,4	498,6 ± 44,7	588,7 ± 44,1	619,0 ± 46,3	563,0 ± 62,9	
8	624,9 ± 54,3	572,7 ± 61,8	597 ± 75	585,6 ± 58,7	621,8 ± 42,8	592,8 ± 57,9	
9	638,5 ± 57,3	622,5 ± 48,3	606,8 ± 62,3	575,5 ± 50,1	620,3 ± 67,7	629,1 ± 73,1	
10	586,0 ± 48,3	621,6 ± 64,6	531,5 ± 43,8	582,1 ± 38,5	611,4 ± 56,2	614,9 ± 70,4	
11	576,6 ± 35,1	567,8 ± 48,2	569,8 ± 41,5	579,2 ± 49,2	515,6 ± 64,1	437,6 ± 55,6	
12	569,7 ± 44,8	548,6 ± 47,7	617,3 ± 40,7	579,2 ± 55,6	–	–	
13	577,4 ± 33,8	593,8 ± 30,6	568,7 ± 29,2	561,9 ± 42,3	632,6 ± 58,4	598,1 ± 50,3	
14	587,0 ± 55,2	558,5 ± 37,6	584,1 ± 46,4	584,4 ± 43,3	440,3 ± 57,3	458,7 ± 62,5	
15	580,5 ± 41,7	601,5 ± 40	574,8 ± 39,3	597,4 ± 35,1	609,5 ± 47,3	615,2 ± 55,4	
16	558,0 ± 64,3	567,4 ± 74,9	548,6 ± 49	533,3 ± 93	555,7 ± 85,3	522,8 ± 71,8	

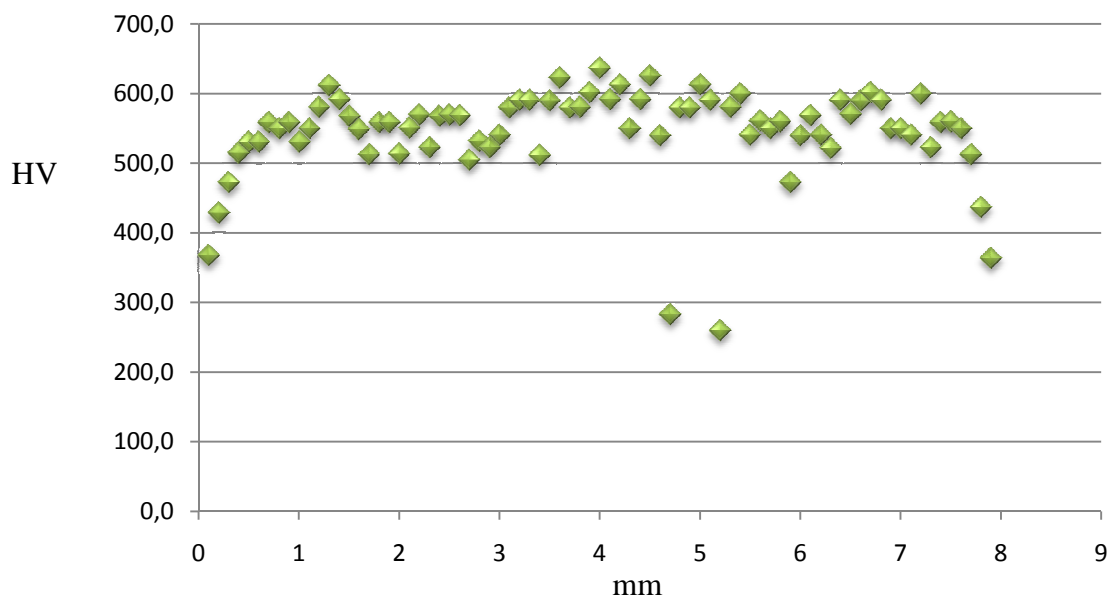
Naměřené hodnoty byly přeneseny do grafu a je tak možné vidět prokalitelnost vzorku, tj. vztah mezi tvrdostí materiálu a vzdáleností naměřené hodnoty od okraje. Následující obrázek ukazuje u vzorku borové oceli Domex 27 na dobré prokalení jádra a mírné oduhličení povrchu (klesajícím charakterem hodnot v krajních částech).

U vzorků Boron 27, od společnosti Ruukki, nebylo oduhličení zcela prokázáno.

Obrázek 35: Krajové hodnoty tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku „16 A“



Obrázek 36: Středové hodnoty tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku „16 A“



5 Závěr

V této diplomové práci je věnována pozornost tepelnému zpracování a následnému vyhodnocení vlivu na tvrdost v závislosti na změně úrovní jednotlivých vstupních faktorů – kalicí teplota (teplota ohřevu), doba výdrže na kalicí teplotě, přítomnost ochranné atmosféry (argon), doba prodlevy mezi pecí a kalicím prostředím, teplota kalicího prostředí a pohyb vzorku v kalicím prostředí.

Materiálem použitým k měření byla borová ocel, která má uplatnění jako materiál odolný vůči opotřebení a jako vysokopevnostní konstrukční ocel, konkrétní využití nachází např. v automobilovém průmyslu, při výrobě lodí, mostů, budov, strojů, strojního zařízení a mnoho dalšího. V případě této diplomové práce bylo měření provedeno na ocelích Domex 27MnCrB5-2 (od švédské společnosti SSAB) a Boron 27 (od finské společnosti Rautaruukki), které bývají používány mj. k výrobě zemědělského nářadí jakým jsou například šípové radličky ke zpracování půdy.

Výsledkem diplomové práce je hodnocení vlivu zkoumaných faktorů při tepelném zpracování na výslednou tvrdost u jednotlivých vzorků borové oceli. Dle analýzy experimentů má na tvrdost, jak u oceli Domex 27, od společnosti SSAB, tak u oceli Boron 27, od společnosti Ruukki, vliv Teplota ohřevu, přítomnost ochranné atmosféry, doba výdrže v peci a časová prodleva mezi pecí a kalicím prostředím. Ostatní zkoumané faktory dle vyhodnocovacích statistických metod na výslednou tvrdost mají zanedbatelný vliv. Zároveň byl při vyhodnocování prokázán vliv některých interakcí mezi jednotlivými faktory na výslednou tvrdost.

6 Literatura

- [1] BOUDA Václav, MACH Pavel, PETR Jiří, ŠTUPL Karel. *Vlastnosti a technologie materiálů*. Praha: ČVUT 1993, 221 s., ISBN 8001009769
- [2] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu – 1. díl*. 3. přepracované vyd. Praha: Scientia, 2002. 266 s. ISBN 80-7183-262-6.
- [3] HLUCHÝ, Miroslav, MODRÁČEK, Oldřich, PAŇÁK, Rudolf. *Strojírenská technologie 1: Metalografie a tepelné zpracování – 2. díl*. 3. přepracované vyd. Praha: Scientia, 2002. 173 s. ISBN 80-7183-265-0.
- [4] HŮLA, Josef, ABRHAM, Zdeněk, BAUER, František. *Zpracování půdy*. 1. vyd. Praha: Brázda, 1997. 144 s. ISBN 80-209-0265-1
- [5] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. 1. vyd. Praha. ČZU, 2006. 136 s. ISBN 80-213-14427
- [6] JAROŠOVÁ, Eva. *Navrhování experimentů a jejich analýza*. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007. 103 s. ISBN 978-800-02-01985-5
- [7] KUMHÁLA, František, HEŘMÁNEK, Petr, MAŠEK, Jiří, KVÍZ, Zdeněk, HONZÍK, Ivo: *Zemědělská technika – stroje a technologie pro rostlinnou výrobu*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2007. 439 s. ISBN 978-80-213-1701-7
- [8] PLUHAŘ, Jaroslav, BENEŠ, Václav, KOUTSKÝ, Jaroslav, MACEK, Karel, PUŠKÁR, Anton. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*. 1. vyd., Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury Alfa, 1987. 418 s.
- [9] PTÁČEK, Luděk, a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- [10] VOPRAVIL, Jan a kol. *Půda a její hodnocení v ČR*. 1. vydání., Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., 2009. 148 s., ISBN 978-80-87361-02-3

Internetové zdroje:

- [11] DOLEŽAL, Pavel, PACAL, Bohumil: *Hodnocení mikrotvrdomosti struktur materiálů*. Studijní podpora [dokument PDF], Vysoké učení technické v Brně. Vytvořeno 2005-12-06. 41 s. [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotvrdomost.pdf>>.

- [12] BOBOBEE, Emmanuel Y. H., SRAKU-LARTEY, Kofi, FIALOR, Simon C., CANACOO Emmanuel A., AGODZO, Sampson K., YAWSON, Albert, GEBRESENBET, Girma: *Wear rate of animal-drawn ploughshares in selected Ghanaian soils*. Soil and Tillage Research, svazek 93, č. 2, duben 2007, Pages 299-308. Dostupné též z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198706001231>>.
- [13] JANKAUSKAS, Vytenis. *Strengthening machine elements working under abrasive environment by alloying with hard layers and their estimation*. MECHANIKA. 2006. číslo 1(57). 55-60 s. [cit. 2012-03-15]. ISSN 1392 – 1207. Dostupné z: <http://internet.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/mechanika/mech_57/Jankauskas157.pdf>.
- [14] JAKŠÍK, Ondřej. *Trojúhelníkový diagram*. Pedologie pro fyto techniky. ČZU Praha. [cit. 2011-10-12]. Dostupné z: <http://home.czu.cz/storage/76557_TrojuhelnikovyDiagram.png>.
- [15] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování – přednáška*. ZČU v Plzni. [cit. 2012-01-10]. Dostupné z: <tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf>.
- [16] LAC. *Pece laboratorní LH*. www.lac.cz [online]. © 2000 – 2011. [cit. 2011-10-10]. Dostupné z: <<http://www.lac.cz/produkty/katalogove-pece-susarny/laboratorni-pece-susarny/pece-laboratorni-lh/>>.
- [17] LUDVÍK, Jan, BÍLEK, Karel, LUDVÍK, Štěpán. *Zkoušky tvrdosti: Přehled základních zkušebních metod pro uživatele tvrdoměrů Qness*. 4. vydání [dokument PDF]. Kladno, Metrotest, publikováno 2010, 22 s. Dostupné z: <http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdomeri.pdf>.
- [18] MOORE, M. A. *Abrasive wear by soil*. Tribology International, 1975, ročník 8, číslo 3, s. 105-110. [cit. 2012-02-12]. ISSN 0301 – 679X Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301679X75900274>>.
- [19] POŠTA, Josef, VESELÝ, Petr, DVORÁK, Milan. *Degradace strojních součástí*. [Monografie]. Praha, ČZU, 2002, 67 s., [cit. 2011-10-03]. ISBN 80-213-0967-9 Dostupné z: <http://degradace.tf.czu.cz/Mngr_ram.htm>.
- [20] SUCHÁNEK, Jan. *Abrazivní opotřebení kovových materiálů*. Tribotechnika [online]. [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/abrazivni-opotrebeni-kovovych-materialu.html>>.
- [21] SSAB. *Domex Hardenable Steel - Boron Steel Hot rolled hardenable sheet*. www.ssab.com [online]. 4 s. [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <http://www.ssab.com/Global/DOMEX/Datasheets/en/410_Domex%20Hardenable%20Steel%20-%20Boron%20Steel.pdf>.

- [22] ŠVANDA, Pavel: *Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí*. [cit. 2011-11-12]. Dostupné z: <<http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>>.
- [23] ŠVANDA, Pavel: *Legující prvky ocelí*. Publikováno 10. 10. 2000. [cit. 2011-11-12]. Dostupné z: <<http://www.knife.cz/Knifecz/tabid/36/ctl/Details/mid/381/ItemID/40/Default.aspx>>.
- [24] RUUKKI. *Bórem legované oceli*. www.ruukki.cz [online]. © 2011. 8 s. [cit. 2012-01-19]. Dostupné z: <<http://www.ruukki.cz/Produkty-a-reseni/Hutni-materialy/Oceli-valcovane-za-tepla/Oceli-odolne-proti-opotrebeni/Borem-legovane-oceli#>>.
- [25] VŠCHT. *Metalografie I. - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem*. www.vscht.cz [online]. © 2009 [cit. 2012-01-12]. Metalografie I. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm>.
- [26] Alibaba Group. *Showroom: Boron steel*. [Alibaba.com](http://www.alibaba.com)® [online]. © 1999-2012 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <<http://www.alibaba.com/showroom/boron-steel.html>>.

7 Seznam zkratek

Jednotky

°C stupně Celsia

N Newton

mm milimetr

μm mikrometr

Slovní zkratky

aj. a jiné

atd. a tak dále

df stupně volnosti (z anglického degrees of freedom)

F testová statistika (z anglického mean square)

HV tvrdost podle Vickerse

HRD tvrdost podle Rockwella

mj. mimo jiné

MS rozptyl (z anglického sum of squares)

p pravděpodobnost zamítnutí správné nulové hypotézy

resp. respektive

tj. to jest

8 Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: MECHANICKÉ VLASTNOSTI V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ POPOUŠTĚNÍ.	14
OBRÁZEK 2: PEC NA OHŘEV VZORKŮ TYPU LAC LH 15/13S	15
OBRÁZEK 3: PONOŘENÍ A POHYB VZORKU V OCHLAZOVACÍ LÁZNI	16
OBRÁZEK 4: ROCWELLŮV TVRDOMĚR HP 250	17
OBRÁZEK 5: PODSTATA ZKOUŠKY PODLE ROCKWELLA	17
OBRÁZEK 6: VICKERSŮV TVRDOMĚR HPO 250	18
OBRÁZEK 7: PODSTATA ZKOUŠKY DLEVICKERSE A ZOBRAZENÍ VTISKU NA STÍNÍTKU.....	18
OBRÁZEK 8: ZNÁZORNĚNÍ DATOVÉHO SOUBORU HV 30, U VZORKU B13, PROSTŘEDNICTVÍM GRAFŮ	19
OBRÁZEK 9: POSTUP PŘÍPRAVY VÝBRUSU U METALOGRAFICKÉHO VZORKU	21
OBRÁZEK 10: ZALÉVÁNÍ VZORKU ZA STUDENA.....	21
OBRÁZEK 11: MIKROTVRDOMĚR PMT 3.....	23
OBRÁZEK 12: TVAR VTISKU S DÉLKOU HRANY MEZI PROTILEHLÝMI STĚNAMI "A"	23
OBRÁZEK 13: MIKROSKOP JENA VERT PA HD	24
OBRÁZEK 14: MAPA ZRNITOSTNÍCH POMĚRŮ ORNIČNÍHO HORIZONTU PŮD	26
OBRÁZEK 15: TROJÚHELNÍKOVÝ DIAGRAM ZRNITOSTI PŮD	27
OBRÁZEK 16: MAPA SKELETOVITOSTI PŮD V ČESKÉ REPUBLICE	28
OBRÁZEK 17: PRACOVNÍ NÁSTROJE RADLIČKOVÝCH KYPŘIČŮ	29
OBRÁZEK 18: ZÁVISLOST OBJEMOVÉHO OTĚRU PŘI KONSTANTNÍ DÉLCE TŘECÍ DRÁHY, NA ZATÍŽENÍ A NA VELIKOSTI ABRAZIVNÍCH ČÁSTIC U DVOU TĚLESOVÉ ABRAZE.....	33
OBRÁZEK 19: S-KŘIVKY OCELI BORON 27	35
OBRÁZEK 20: HLAVNÍ NÁKLADOVÉ VSTUPY DO VÝROBY	37
OBRÁZEK 21: PRŮMĚRY TVRDOSTÍ HV V ZÁVISLOSTI NA FAKTORECH VZORKU A	40
OBRÁZEK 22: PARETŮV GRAF PRO HRD VZORKU A1	41
OBRÁZEK 23: POZOROVANÉ A NAMĚŘENÉ HODNOTY HRD VZORKU A1	43
OBRÁZEK 24 PARETŮV GRAF PRO HRD VZORKU A 2	45

OBRÁZEK 25: PROFILY PRO PŘEDPOVĚDI A VHODNOST PRO HRD VZORKU A 2	46
OBRÁZEK 26: PARETŮV GRAF PRO HRD VZORKU B.....	46
OBRÁZEK 27: PROFILY PRO PŘEDPOVĚDI A VHODNOST PRO HRD VZORKU B	47
OBRÁZEK 28: PARETŮV GRAF PRO HV VZORKU A 1.....	49
OBRÁZEK 29: PROFILY PRO PŘEDPOVĚDI A VHODNOST PRO HV VZORKU A 1.....	50
OBRÁZEK 30: PARETŮV GRAF PRO HV VZORKU A 2	50
OBRÁZEK 31: PROFILY PRO PŘEDPOVĚDI A VHODNOST PRO HV VZORKU A 2.....	52
OBRÁZEK 32: PARETŮV GRAF PRO HV VZORKU B.....	54
OBRÁZEK 33: POZOROVANÉ A NAMĚŘENÉ HODNOTY HV VZORKU B.....	55
OBRÁZEK 34: OBLASTI MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI NA PREPAROVANÉM VZORKU...	56
OBRÁZEK 35: KRAJOVÉ HODNOTY TVRDOSTI V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI OD POVRCHU VZORKU „16 A“.....	58
OBRÁZEK 36: STŘEDOVÉ HODNOTY TVRDOSTI V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI OD POVRCHU VZORKU „16 A“	58

9 Seznam tabulek

TABULKA 1: PŘEHLED SLEDOVANÝCH FAKTORŮ	12
TABULKA 2: CHEMICKÉ SLOŽENÍ VZORKŮ	13
TABULKA 3: MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLOVÝCH VZORKŮ	14
TABULKA 4: HODNOCENÍ SKELETOVITOSTI.....	28
TABULKA 5: TVRDOST NĚKTERÝCH MINERÁLŮ A ABRAZIV	33
TABULKA 6: TYPICKÉ VADY A JEJICH PŘÍČINY	36
TABULKA 7: PRŮMĚRNÉ HODNOTY VÝSLEDKŮ TVRDOSTI VZORKŮ	39
TABULKA 8: ODHADY EFEKTŮ VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HRD VZORKU A1.....	42
TABULKA 9: ANOVA VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HRD VZORKU A1	42
TABULKA 10: ODHADY EFEKTŮ VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HRD VZORKU A 2 ...	44
TABULKA 11: ANOVA VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HRD VZORKU A 2	44
TABULKA 12: ODHADY EFEKTŮ VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HRD VZORKU B ...	46
TABULKA 13: ANOVA VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HRD VZORKU B	46
TABULKA 14: ODHADY EFEKTŮ VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HV VZORKU A 1... 48	
TABULKA 15: ANOVA VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HV VZORKU A 1	48
TABULKA 16: ODHADY EFEKTŮ VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HV VZORKU A 2... 50	
TABULKA 17: ANOVA VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HV VZORKU A 2	51
TABULKA 18: ODHADY EFEKTŮ VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HV VZORKU B..... 53	
TABULKA 19: ANOVA VÝZNAMNÝCH FAKTORŮ PRO HV VZORKU B..... 55	
TABULKA 20: PRŮMĚRNÉ HODNOTY MIKROTVRDOSTI HV 0,1	56

10 Přílohy

PŘÍLOHA 1: ROZDĚLENÍ PŮD PODLE ZRNITOSTI (ČSN 46 5302)	I
PŘÍLOHA 2: VLIV LEGUJÍCÍCH PRVKŮ NA KALENÍ	II
PŘÍLOHA 3: KATEGORIE SKELETOVITOSTI A HLOUBKY PŮDY	IV

Příloha 1: Rozdělení půd podle zrnitosti (ČSN 46 5302)

(strana 1)

Název druhu půdy	Obsah zrn menších 0,01 mm v %	Praktické označení	Základní vlastnosti půdy
Jíl	nad 75	Velmi těžké půdy	Půdy jsou za vlhka velmi vazké, po vyschnutí stmelené a tvrdé. V období sucha pukají a objevují se trhliny. Pro vzduch a vodu jsou nesnadno propustné, jsou dané, biologicky méně činné
Jílovitá půda	60 – 75		Zpracovatelnost půdy je značně obtížná, za vlhka se mažou a nesnadno kypří, za sucha se lámou v pevné tvrdé a velké hroudy, které se těžko rozdělavají. Po promrznutí v hrubé brázdě jsou na jaře lépe zpracovatelné.
Jílovito-hlinitá půda	45 – 60	Těžké půdy	Půdy tuhé, vazké a uléhavé, za vlhka se mažou, za sucha tvrdnou. Biologicky jsou aktivnější než velmi těžké půdy. Zpracovatelnost je poměrně obtížná. Při vhodném vlhém stupni vlhkosti se však snadněji obdělávají a kypří. Za sucha se hroudy dají rozdrobit.
Písčito-jílnatá půda	30 – 45	Středně těžké půdy	Půdy se znatelnou převahou písčitých a jílnatých půdních částic s nízkým obsahem prachu. Podle obsahu jílnatých částic spadají sice do kategorie středně těžkých půd, avšak vzhledem k nízkému obsahu prachových částic mají zhoršené technologické vlastnosti (zejména zvýšenou vazkost) jako půdy těžké.
Hlinitá půda	30 – 45		Půdy s převažujícím zastoupením jemných půdních částic a zanedbatelným podílem písčitých zrn. Velký obsah prachových částic příznivě ovlivňuje fyzické vlastnosti, zejména působí proti nadměrné uléhavosti a vazkosti. Přiměřená vododržnost a propustnost pro vodu prodlužuje období optimálního stavu vlhkosti
Písčito-hlinitá půda	20 – 30		Půdy s menším zastoupením jemných částí s hmatatelným obsahem písčitých zrn. Vyrovnaný podíl jílu a prachu jim dodává střední zrnitosti, podstatná příměs písčitých frakcí zvyšuje jejich prostnost pro vodu a vzduch. Jedná se o půdy dobře zpracovatelné.
Hlinito-písčitá půda	10 – 20	Lehké a velmi lehké půdy	Půdy skládající se převážně z hrubých písčitých zrn a velmi nízkého až zanedbatelného podílu prachových částic. Mají malou soudržnost a vododržnost, jsou drobnivé až sypké, pro vodu velmi snadno propustné a proto vysýchavé. Velmi snadno zpracovatelné půdy
Písek	0 – 10		Vyznačují se vysokým obsahem hrubých písčitých zrn a malou soudržností. Velmi snadno zpracovatelné půdy

(zdroj: Hůla, Abrahám, Bauer, 1997)

Příloha 2: Vliv legujících prvků na kalení

(strana 1/2)

Prvek	Kalení
Uhlík	Se vzrůstem koncentrace Roste tvrdost martenzitu nebo bainitu, zvyšuje se ale také možnost praskání materiálu při kalení. C zvyšuje tvrdost i nad eutektoidním bodem, kde se váže ve formě feritu. Nejvíce ze všech prvků (společně s dusíkem) snižuje M_s a M_f , tudíž má také největší vliv na stabilizaci austenitu. Většina málo a středně legovaných ocelí obsahujících nad 0,3 hm.% C obsahuje austenit transformovaný při kalení na martenzit.
Křemík	Křemík je u ocelí většinou zastoupen do 0,5 hm. %, obvykle však v rozmezí 0,2-0,3 hm.%. Si má malý vliv na prokalitelnost, ale je považován za nedůležitý vzhledem k běžně používaným koncentracím. To však může být důležité v špatně prokalitelných ocelích, kde větší změny zhoršovat soudržnost. Některé oceli mohou obsahovat nad 1,8 hm. % křemíku, s výrazným vlivem na prokalitelnost, ale takto vysoký obsah Si je přidáván hlavně pro zvýšení odolnosti proti popouštění. Si zvyšuje sklon ke grafitizaci (rozpad Fe_3C na $Fe+C$). Má velkou afinitu ke kyslíku, což může být problém při oduhlíčování, protože jeho oxid je stabilnější než CO/CO_2 .
Mangan	S výjimkou speciálních slitin obsahují oceli nad 0,3 hm.% Mn. V legovaných ocelích je obsaženo do 1 hm. %, v uhlíkových ocelích mohou být až 2 hm.%. Velké množství ho může být ve speciálních ocelích, kde podporuje vznik austenitické struktury. Mn je jeden z nejlevnějších legovacích prvků s výrazným vlivem na tvrdost. V přítomnosti síry se tvoří sulfid manganatý.
Síra	V ocelích není přítomna elementární síra, je vázána s manganem do MnS . To může mít vliv na prokalitelnost, protože odčerpává mangan z roztoku. Pro většinu ocelí je množství síry příliš malé na to, aby měla vliv na vlastnosti manganu. Nicméně je fakt, že austenitické oceli s vyšším obsahem síry musí obsahovat i více manganu. Sulfidické vměstky slouží jako nukleační centra pro vznik feritu (za vhodných okolností), takže vytváří jako-kalenou strukturu. Sulfid manganatý má obrovský vliv na opracovatelnost.
Nikl	Netvoří karbidy, proto může být používán jako prvek nezvyšující austenitizační teplotu (A_3). Ve skutečnosti nikl tuto teplotu dokonce snižuje, pokud je použit ve vyšších koncentracích. To je pro kalení příznivý vliv, ale v porovnání s některými jinými legovacími prvky je menší. Kritický rozsah teplot je menší a niklové oceli začínají s austenitickou přeměnou při nižších teplotách než uhlíkové oceli.

(Zdroj: Pavel Švanda)

Prvek	Kalení
Karbidotvorné prvky (Cr, Mo, V, W)	Všechny karbidotvorné prvky mají výrazný kladný vliv na tvrdost a prokalitelnost. Stabilita karbidů roste v řadě Cr, Mo, V, W, a protože karbidy jsou stabilní i za vysokých teplot, zůstávají rozpuštěny v matici, kde zvyšují austenitizační teplotu. V porovnání s ocelmi legovanými Ni a Mn může být vyšší izotermální transformační teplota využita při žhání (resp. Popouštění). Oceli s vyšším obsahem uhlíku a karbidotvorných prvků mohou být vytvrzovány nerozpuštěnými karbidy zadržnými v matici. Toto vytvrzení je však nižší než u prvků vytvrzujícími díky rozpuštění ve struktuře.
Chrom	Cr má velký vliv na prokalitelnost a tvrdost, ale jeho karbidy jsou poměrně nestabilní. Je to levný karbidotvorný prvek a proto je hojně využíván všude, kde je možné jej použít.
Molybden	Mo má velký vliv na tvrdost a pevnost, větší než Cr. Tvoří stabilnější karbidy než chrom, proto je doporučena vyšší austenitizační teplota pro úplné rozpuštění.
Vanad	VC je velmi obtížně rozpustný. Proto oceli obsahující vanad musí být zahřívány na velmi vysokou teplotu pro jeho úplné rozpuštění. Velmi silný vytvrzovací efekt nastává až, když je vanad rozpuštěn. V normalizačně žháných ocelích tvoří feriticko-perlitickou strukturu při chlazení do koncentrací 0.2 hm. % V. Po rozpuštění a vzniku karbidů vzniká při chlazení konečná velmi tvrdá struktura.
Wolfram	W není obsažen v běžných konstrukčních ocelích. Může být v malých koncentracích (1 hm. %) v ocelích pro břity a v tepelně opracovaných pásovinách. WC je velmi tvrdý a stabilní, ale v oceli se rozpouští až za velmi vysokých teplot. Nízkolegované uhlíko-wolframové oceli se obvykle zpracovávají bez úplného rozpuštění primárně vznikajícího karbidu (výsledná struktura není zcela homogenní). Legování velkým množstvím wolframu se používá hlavně u rychlořezných ocelí.
Bor	Legování borem je používáno pro jeho unikátní schopnost vytvrzovat oceli již ve velmi malých množstvích kolem 0.001-0.003 hm%, majících přesto obrovský kladný vliv na prokalitelnost. Dalším přídatkem B se již vlastnosti nezlepšují. Bor zvyšuje prokalitelnost díky potlačení vzniku feritu, což je také důvodem výraznějšího vlivu u nízkouhlíkových ocelí, tento vliv se uplatňuje až do eutektoidního bodu (0.8 hm. % u nelegovaných ocelí). Bor nesnižuje teplotu MS.
Hliník	Pokud je hliník přítomen v dostatečné koncentraci, má nepříliš výrazný vliv na prokalitelnost. Přesto je ve většině ocelí zastoupen v malých koncentracích (0.0015-0.06 hm. %), pro jeho schopnost zvyšovat teplotu, při níž dochází ke zhrubnutí zrna a tím udržuje jemnozrnnou strukturu během tepelného zpracování. Pokud je použit ke zjemnění zrna, dochází ke snížení.

(Zdroj: Pavel Švanda)

Příloha 3: Kategorie skeletovitosti a hloubky půdy

Kód	Skeletovitost		Hloubka	
	vní charakteristika	Zákl. kategorie	vní charakteristika	Zákl. kategorie
0	zskeletovitá	0	iboká	0
1	zskeletovitá až slabě skeletovitě	0 - 1	iboká až středně hluboká	0 - 1
2	bě skeletovitá	1	iboká	0
3	edně skeletovitá	2	iboká	0
4	edně skeletovitá	2	iboká až středně hluboká	0 - 1
5	bě skeletovitá	1	lká	2
6	edně skeletovitá	2	lká	2
7	z-až slabě skeletovitá	0 - 1	iboká až středně hluboká	0 - 1
8	edně až silně skeletovitá	2,3	iboká až mělká	0 - 2
9	z-až silně skeletovitá	0 - 3	iboká až mělká	0 - 2

(Zdroj: Vopravil, 2009)