

Optimalizace a intenzifikace procesu tepelného zpracování pružných prvků

Bc. Adam Novák

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam Novák**
Osobní číslo: **T13502**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Optimalizace a intenzifikace procesu tepelného zpracování pružných prvků**

Zásady pro vypracování:

1. Hodnoťte metody tepelného zpracování
2. Uveďte materiály vhodné pro výrobu pružných prvků
3. Popište metody hodnocení výstupních parametrů procesu tepelného zpracování
4. Proveďte optimalizaci procesu tepelného zpracování
5. Hodnoťte tvarové změny výrobků v důsledku tepelného zpracování

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. PÍŠEK, František a Ladislav JENÍČEK. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1962, 916 s., [8] s. obr. příl.
2. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, c2003, xii, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.
3. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3. *UŠLECHTILÉ NÁSTROJOVÉ OCELI POLDI, SONP Kladno 1985*
4. POKLUDA, Jaroslav, František KROUPA a Ladislav OBDRŽÁLEK. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: kovy, keramika, plasty. 1. vyd.* Brno: PC-DIR, 385 s. ISBN 8021405759.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

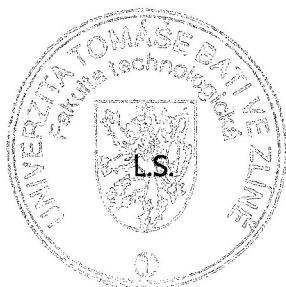
30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 20. dubna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



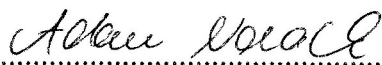

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 12.5.2015


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou tepelného zpracování pružných prvků, které patří mezi standartní výbavu osobních automobilů. Teoretická část popisuje funkci a výrobní proces pružných prvků, hlavní způsoby a principy tepelného zpracování ocelí. Uvádí materiály vhodné pro výrobu pružných prvků a metody, pomocí kterých dochází k vyhodnocení výsledných vlastností materiálu a dílů.

V praktické části je řešena problematika optimalizace a intenzifikace tepelného zpracování při výrobě pružných prvků. Hlavním cílem práce je zvýšení produktivity na kalící lince pomocí snížení časů popouštění a zároveň ověřit, že při snížení popouštěcích časů nedojde k výrazným tvarovým změnám dílů, které by negativně ovlivnily navazující operaci rovnání. V rámci praktické části je také provedeno zpracování neshodného materiálu tak, aby mu byly navráceny vyhovující vlastnosti.

Klíčová slova:

Tepelné zpracování, optimalizace, pružný prvek, popouštění, tvarové změny.

ABSTRACT

This master's thesis deals with issues about heat treatment process of flexible elements which belong to standard equipment of cars. The theoretical part describes function and production process of flexible elements, main ways and principles of steel heat treatment. It introduces suitable materials for the production of flexible elements and methods by which an evaluation of final material and piece properties occurs.

The practical part deals with optimization and intensification of heat treatment during the production of flexible elements. The main goal of this thesis is to increase productivity on heat treatment line with reducing a time of tempering and at the same time to check that reducing a tempering time does not have any significant influence on the contour changes of pieces, which could negatively affect next operation of straightening. Within the practical part treatment of nonconforming material is also carried out so that satisfactory properties will be returned.

Keywords:

Heat treatment, optimization, flexible element, tempering, contour changes.

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych poděkoval prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi im memoriam, který mě podpořil při výběru této diplomové práce a za svědomité vedení s řadou cenných připomínek. Dále děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za odborné vedení, čas věnovaný konzultacím nad danou problematikou a poskytnutí potřebných informací.

Rád bych poděkoval Ing. Josefu Kuželovi za jeho cenné rady a zkušenosti z praxe, za ochotu a čas, který mi věnoval během zpracování praktické části této diplomové práce. Poděkování patří také personálu obsluhující kalící linku za vstřícný přístup a pomoc při provádění experimentů a kolegům, kteří se podíleli na realizaci této práce.

Touto cestou chci poděkovat své rodině a mým rodičům za podporu a trpělivost během celého studia na vysoké škole.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně 12.5.2015

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PRUŽNÝ PRVEK	11
1.1 POPIS A DESIGN	11
1.2 FUNKCE.....	12
1.3 VÝROBNÍ PROCES	14
1.3.1 Výroba přesných trubkových polotovarů.....	14
1.3.2 Ohýbání	15
1.3.3 Kalení a popouštění.....	15
1.3.4 Vnitřní a vnější tryskání	16
1.3.5 Tváření konců.....	16
1.3.6 Práškové lakování, montáž a balení	17
1.3.7 Kontrola kvality	17
2 HODNOCENÍ METOD TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	19
2.1 AUSTENITIZACE	19
2.2 PŘEMĚNY AUSTENITU	20
2.2.1 Perlitická přeměna.....	21
2.2.2 Bainitická přeměna.....	22
2.2.3 Martenzitická přeměna.....	23
2.2.4 Transformační diagramy ocelí	24
2.3 KALENÍ	25
2.3.1 Kalicí teplota	25
2.3.2 Ohřev na kalicí teplotu	26
2.3.3 Kalicí prostředí.....	28
2.3.4 Kalitelnost oceli	29
2.3.5 Způsoby kalení	29
2.3.6 Vnitřní pnutí při kalení.....	31
2.4 POPOUŠTĚNÍ	32
2.4.1 Přeměny při popouštění.....	33
2.4.2 Způsoby popouštění a popouštěcí křehkost	34
3 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU PRUŽNÝCH PRVKŮ	36
3.1 VÝROBA Z OCELI.....	36
3.1.1 Vliv chemického složení a čistoty materiálu	38
3.1.2 Oceli pro výrobu pružných prvků	38
3.2 VÝROBA Z KOMPOZITU.....	39
3.2.1 Základní charakteristiky kompozitu.....	40
3.2.2 Vláknové kompozity	40
3.2.3 Charakteristiky vláken pro kompozity s polymerní matricí.....	41
3.2.4 Vláknové kompozity s polymerními matricemi.....	43
4 METODY HODNOCENÍ VÝSTUPNÍCH PARAMETRŮ PROCESU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	44

4.1	ZKOUŠKA TAHEM	44
4.2	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	47
4.2.1	Zkouška tvrdosti podle Brinella.....	47
4.2.2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	48
4.2.3	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	49
4.3	ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI MATERIÁLU Z HLEDISKA ÚNAVY	50
4.3.1	Mez únavy	50
4.3.2	Kmity napětí.....	51
4.3.3	Rozdělení únavy.....	51
4.3.4	Mechanismus vzniku šíření únavových trhlin	52
4.4	SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE.....	54
4.4.1	Základní princip	55
4.4.2	Konstrukční uspořádání	55
4.4.3	Měřicí sondy a doteky	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST	57
5	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	58
6	PODMÍNKY EXPERIMENTŮ	59
6.1	TYP PRUŽNÉHO PRVKU	59
6.2	POUŽITÝ MATERIÁL.....	59
6.3	KALÍCI LINKA	60
6.3.1	Kalící pec a generátor endoplynu.....	61
6.3.2	Popouštěcí pec.....	63
7	OPTIMALIZACE PROCESU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	65
7.1	SNÍŽENÍ POPOUŠTĚCÍCH ČASŮ NA MINIMUM	65
7.1.1	Metodika experimentu	65
7.1.2	Vyhodnocení výsledků.....	71
7.1.3	Měření teplotních křivek v popouštěcí peci.....	77
7.1.4	Vliv snížení popouštěcích časů na produktivitu kalící linky	83
7.2	ZPRACOVÁNÍ NESHODNÉHO MATERIÁLU	87
7.2.1	Metodika experimentu	88
7.2.2	Vyhodnocení výsledků.....	90
7.2.3	Doporučené parametry tepelného zpracování neshodného materiálu.....	96
8	TVAROVÉ ZMĚNY V DŮSLEDKU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ	98
8.1	METODIKA EXPERIMENTU	98
8.1.1	Měření tvaru před tepelným zpracováním	98
8.1.2	Nastavení procesu tepelného zpracování	100
8.1.3	Měření tvaru po tepelném zpracování.....	100
8.1.4	Měření tvaru dílů po rovnání	101
8.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	101
8.3	VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA TVAROVÉ ZMĚNY DÍLŮ.....	107
9	SHRNUTÍ.....	108
	ZÁVĚR.....	110

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	111
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	114
SEZNAM OBRÁZKŮ	116
SEZNAM PŘÍLOH.....	121

ÚVOD

Všudy přítomnost automobilů výrazným způsobem změnila člověka a jeho chování. Do značné míry změnila i naši krajinu a sídelní kulturu. Automobil a vše s ním spojené je tak každodenní součástí našeho života. Od dopravy využívající jen vlastních svalů, lidé postupně dospěli na počátku 20. století ke klasické konstrukci automobilu: motor, převodovka, podvozek a elektrický systém.

Doprava od nejstarších dob je závislá na mnoho dalších činnostech člověka. Automobilový průmysl a vše s ním související dnes zaměstnává snad většinu světového hospodářství. Na výrobu automobilu, bezpečnost, jízdu, parkování, ale také na řešení jeho negativních dopadů na prostředí se věnuje ohromné množství energie, materiálu, času a poznatků.

Růst celkové populace silně závisí v kterémkoliv období na stavu výroby výrobních prostředků a ty pak na kvalitě a kvantitě materiálu, ze kterých byly vyráběny. Z tohoto hlediska můžeme očekávat i zvýšení počtu automobilů v provozu. Materiál a jeho dosažitelné vlastnosti se tedy stávají limitujícím faktorem pro technický rozvoj lidské společnosti. Vývoj materiálů však běžně vyžaduje i vývoj technologií, tedy metod, pomocí, kterých je materiál zpracován. Tento iterační proces mezi člověkem, materiálem a technologií začal v okamžiku uvědomělé činnosti lidí a probíhá, čím dál tím větším tempem až doposud.

V dnešní době klade důraz především na aspekty bezpečnosti, komfortu a ekologie resp. trvalého snižování spotřeby paliva a úrovně emisí při jízdě. S využitím nových technologií odlehčené konstrukce, nových materiálů a metod zpracování je dosaženo inovativního řešení odlehčených částí automobilů a tím snížení spotřeby paliva. Podle těchto aspektů jsou vyráběny i pružné prvky, které se staly nedílnou součástí moderních automobilů.

Při přímém pozorování a provádění studií se často realita výrazně odchyluje od požadované kvality výroby. Správné popsání výchozího stavu je důležité při nastavování současných parametrů výroby, jakož i možnost zlepšení v dosahované kvalitě. Při analýzách používáme kombinaci metod, které jsou nápomocné pro získání reálného pohledu na současný stav a zčásti definování nutných kroků do budoucna. Studie jsou podpořeny analýzou dokumentace, historických údajů, postřehy a nápady pracovníků, ale i zkušenostmi z podobných projektů realizovaných v minulosti. Posledním krokem je dopracování návrhů do finálního řešení a jejich implementace do praxe.

I. TEORETICKÁ ČÁST

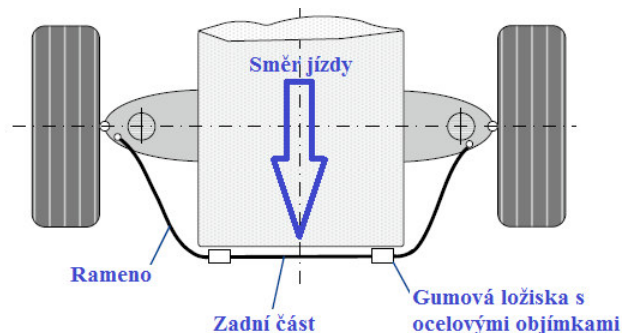
1 PRUŽNÝ PRVEK

Se vzrůstající rychlostí automobilů získává na významu nejenom pohodlí při jízdě, ale také bezpečnost a vlastnosti řízení. Propracovanější systémy zavěšení kol zvyšují limity pro přenos sil při zatáčení, stejně jako při akceleraci a brždění. Pro stabilizaci a snížení naklápění automobilu projíždějícího zatáčkou se používají speciální pružné prvky, které jsou pro tento účel vyvíjeny. [1]

První použití u automobilů je datováno v roce 1949 a na začátku 80. let se dostali pružné prvky do hromadné výroby. Dnes jsou používány téměř na každé přední nápravě moderních automobilů a na zadní nápravě automobilu jsou aplikovány z důvodů kinematiky všech kol, avšak tato aplikace se používá u vyšších a prémiových tříd osobních automobilů, které jsou doprovázeny vyššími pořizovacími náklady. [1]

1.1 Popis a design

Při jízdě je nutné udržovat jízdní dráhu vozidla stabilní. Jakmile začne vozidlo zatáčet, vznikají odstředivé síly, které způsobují naklápění. Dochází ke snížení třecí síly mezi vozovkou a pneumatikou, přičemž se automobil dostává do smyku. Na základě redukce naklápění a zvýšení přilnavosti automobilu v zatáčkách jsou používány pružné prvky. [1]



Obr. 1 Části pružného prvku [1]

Design pružného prvku by měl být co nejjednodušší, jak to jen jde a to z důvodů jednoduchého výrobního procesu. Pružný prvek je vyráběn ve tvaru U a spojuje osu levého a pravého kola. Skládá se se zadní částí a dvou ramen (Obr. 1), přičemž zadní část je připevněna přes gumová ložiska a ocelové objímky k nápravě podvozku, aby byla zajištěna jeho horizontální poloh. Konečný tvar je závislý na uložení dalších součástí v automobilu s ohledem na to, aby při jízdě nedocházelo ke vzájemným kolizím. Pružné prvky jsou vy-

ráběny v různých tvarech (Obr. 2), dále se liší používaným materiálem, polotovarem, upnutím k nápravě anebo tvarem ocelových objímek. [1]

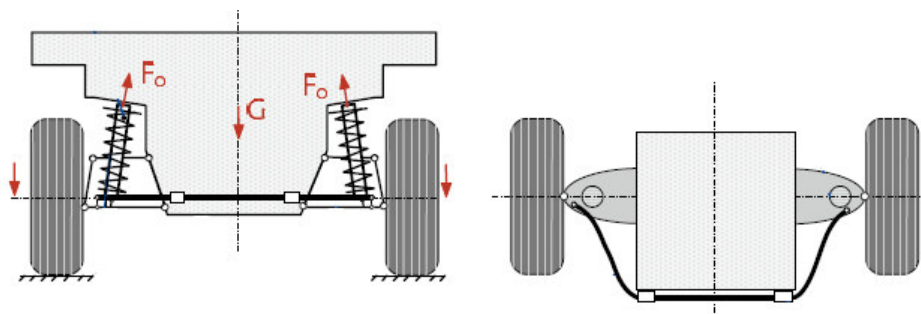


Obr. 2 Typy tvarů pružných prvků [1]

Při výrobě pružných prvků se používají dva profily polotovarů, tyčové a trubkové. Nicméně, v současné době kladou automobilky důraz na snižování hmotnosti vozidla a tím pádem i na snižování hmotnosti jednotlivých dílů. To je skvělé téma pro snižování hmotnosti vozidla vzhledem k vysoké ceně paliva, zvyšujícímu se ekologickému podvědomí mezi zákazníky a také k přísným zákonným předpisům znečišťujících emisí. [1]

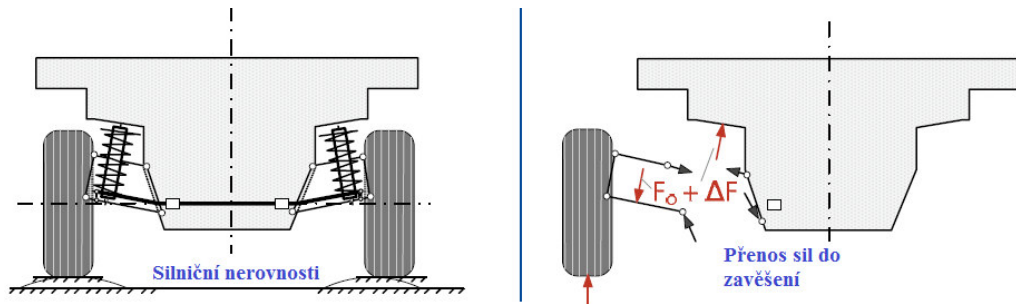
1.2 Funkce

Princip funkce pružného prvku je ukázáno na obrázku (Obr. 3). Přední náprava se skládá ze dvou zavěšení. Když se vozidlo pohybuje dopředu je vyvolána pouze síla F_0 , zatímco pružný prvek sílu nevyvolává. [1]



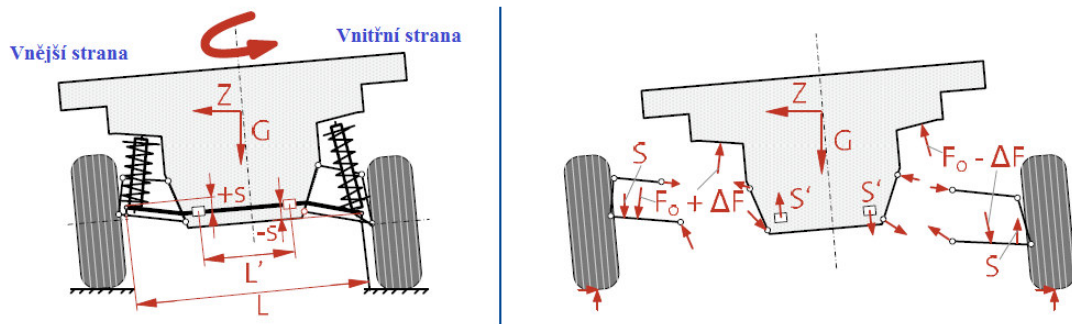
Obr. 3 Při jízdě dopředu [1]

Jestliže kola stlačí pružiny na obou stranách ve stejném rozsahu vlivem silničních nerovností (Obr. 4), síla působící na zavěšení se zvětší o ΔF . Pružný prvek se natočí v gumových ložiscích, ale není kroucen, tudíž nevyvolává žádnou sílu na obou koncích. [1]



Obr. 4 Při jízdě dopředu s nerovnostmi [1]

Při zatáčení (Obr. 5), odstředivá síla působí ven ze zatáčky a to způsobuje natáčení vozidla. Kolo na vnější straně pružinu stlačí a dochází ke zvýšení třecí síly mezi pneumatikou a vozovkou, naopak kolo na vnitřní straně pružinu roztahuje a třecí síla mezi pneumatikou a vozovkou se snižuje. [1]



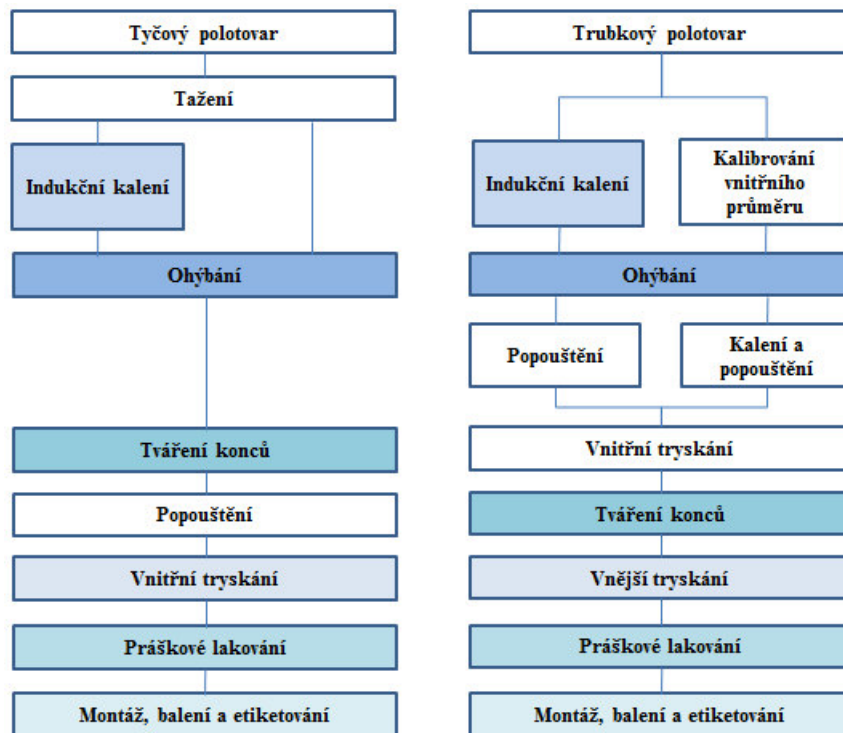
Obr. 5 Při jízdě zatáčkou [1]

Spojení pružného prvku se zavěšením zajišťuje, že rameno vyvolává sílu ΔF a pohybuje se v opačném směru než síly od pružin F_0 . Tento pohyb kroutí zadní část a ohýbá ramena pružného prvku. Díky těmto silám a celkové tuhosti pružného prvku se vytváří dodatečný moment pomocí sil S' , který narovná a působí proti naklápění vozidla. [1]

Kromě proti-naklápěcího účinku vykazují pružné prvky další dva efekty. Prvním je kopírovací efekt, který vzniká, když vozidlo jede rovně a setká se s nerovností pouze na jedné straně. Pružný prvek přeneše tuto nerovnost i na druhou stranu, což je nežádoucí. Druhým efektem je samo-řídící chování vozidla, kdy tento vliv je velmi výrazný. Jestliže zatáčející síla potřebná k udržení správné stopy, překročí hodnotu maximální přidržovací síly, kola se začnou smýkat. Mluvíme o nedotáčení, když se přední náprava smýká; o přetáčení, když se zadní náprava smýká. Když se obě osy smýkají zároveň, pak je řízení neutrální. Obvykle jsou osobní automobily navrženy jako lehce nedotáčivé, protože tento stav je snadnější pro jízdní kontrolu. [1]

1.3 Výrobní proces

Výrobní procesy a materiál pružného prvku je vybírán na základě požadavků na životnost a výpočtu namáhání. Geometrické vlastnosti mají také vliv na namáhání a mohou limitovat výběr výrobních technologií. Výrobní technologie je definována individuálně pro každý projekt. Na (Obr. 6) je znázorněn nejfrekventovanější výrobní postup pro tyčové a trubkové pružné prvky. [1]

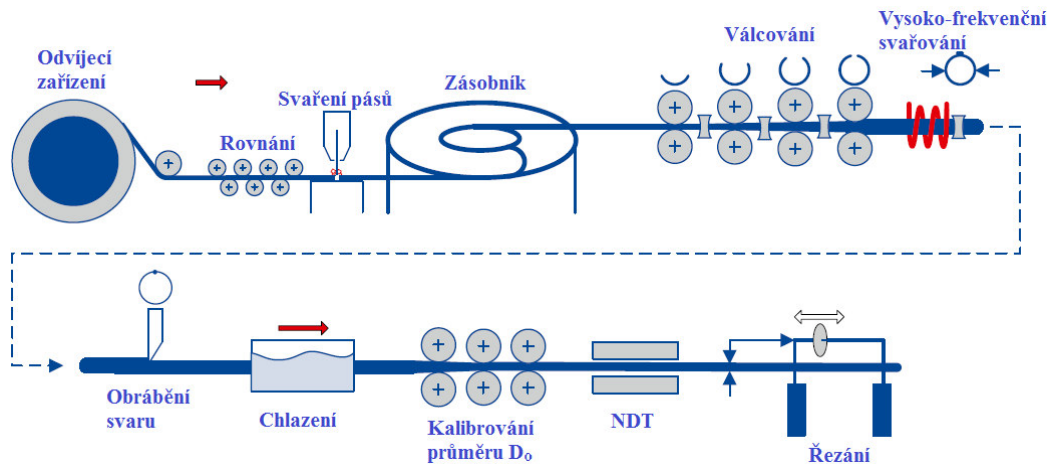


Obr. 6 Výrobní postup [1]

1.3.1 Výroba přesných trubkových polotovarů

Výroba trubkových polotovarů se provádí na kontinuální lince (Obr. 7). Na začátku jsou odvíjeny pásy plechů ze zásobníku, které jsou následně rovnány a válcovány na požadovanou tloušťku. Konce těchto pásů se dále příčně svařují, aby byla zabezpečena kontinuita linky. Takto svařený materiál pokračuje do zásobníku, který vyrovnává takt linky mezi rovnáním a další částmi linky. Plech je dále postupně válcován až do tvaru „O“, po dosažení tohoto tvaru je spojen pomocí vysoko-frekvenčního svařování. Ihned po svařování se tento svar obrábí, jak z vnější, tak i z vnitřní strany. Tento trubkový polotovár je ochlazen a kalibrován na vnější průměr D_o . Následuje řezání na požadovanou délku a svázání do

balíků k dalšímu zpracování. Při výrobě na této lince je zabezpečena automatická kontrola průřezu trubkového polotovaru a nedestruktivní testy materiálu (NDT). [1]



Obr. 7 Linka na výrobu trubkového polotovaru [1]

1.3.2 Ohýbání

Pro tváření pružného prvku se používá proces ohýbání za studena. Vstupní polotovar je upevněn do ohýbacího nástroje, který se skládá z ohýbací hlavy, upínací lišty, přítlačné lišty a opěrné lišty. Během rotace ohybového nástroje kolem ohybové osy je vstupní polotovar ohýbán do rádiusu ohýbací hlavy. [1]

Pro ohýbání se používají dva druhy ohýbacích strojů. Prvním typem jsou CNC ohýbací stroje, které mohou být flexibilně nasazeny pro použití v kusové výrobě. Druhým typem jsou stroje vyvinuté a vyrobené společností Mubea s ohledem na efektivní hromadnou výrobu pružných prvků, tj. dvouhlavý ohýbací stroj (DKB), který se skládá z několika ohýbacích stolů, mezi nimiž pro přemísťování pružného prvku je použito chapadlo s kleštěmi. [1]

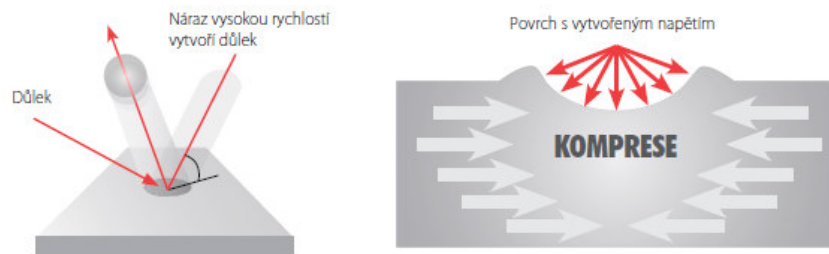
1.3.3 Kalení a popouštění

Proces kalení a popouštění se používá pro vysoce-zatěžované pružné prvky. Vzhledem k tomu, že po tepelném zpracování nenásleduje operace tváření za studena, může být dosaženo maximálních hodnot pevnosti materiálu. Tím se zvyšuje i únavová pevnost součástí. Diplomová práce je zaměřena na tuto operaci, tudíž přesnému popisu budou věnovány další kapitoly v praktické části diplomové práce.

1.3.4 Vnitřní a vnější tryskání

Se snižováním hmotnosti pružných prvků se ukazuje, že napětí na vnitřním povrchu trubkových pružných prvků výrazně roste, čím je stěna tenčí. Kvalita povrchu je rozhodující pro trvanlivost pružných prvků, a proto je zavedena operace vnitřního a vnějšího tryskání. [1]

Tryskání je technologický proces (Obr. 8), při kterém dochází k otryskávání povrchu malými sférickými částicemi z vysoce kvalitního materiálu formou technicky definovaného a řízeného procesu. Jako materiál se používají vysoce-pevnostní částice z ocelového drátu. [2]



Obr. 8 Podstata tryskání [2]

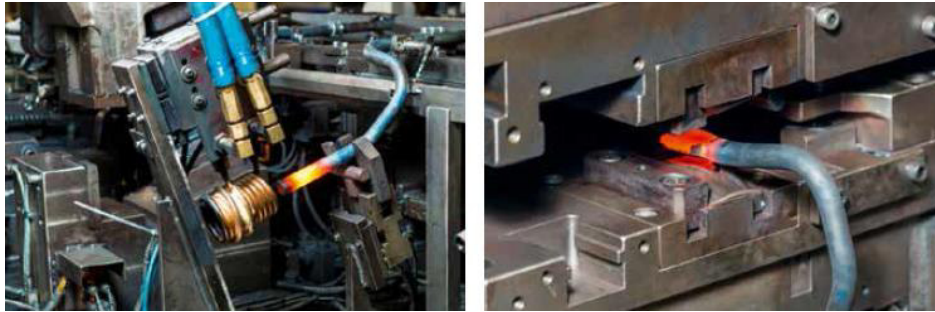
Každá vystřelená částice, která narazí do kovu, pak působí jako kladivo, které v povrchu vytvoří malý důlek nebo jamku. Tryskáním se povrchu materiálu zbaví tahového napětí a výsledkem je zbytkové napětí v tlaku. Toto tlakové napětí zamezuje vzniku trhlinek, které pak mohou případně způsobit předčasné vady materiálu. [2]

Vnitřní tryskání se provádí na automatizovaném vibračním stroji, kde se pružné prvky upnou do přípravku a dovnitř se nasype tryskací materiál. U vnějšího tryskání jsou pružné prvky zavěšeny na rotačních závěsech, které projedou tryskacími stroji. Tryskací závěsy jsou konstruovány individuálně podle typu pružného prvku, tak aby docházelo k optimálnímu dopadu tryskacího zrna na vysoce-zatěžované oblasti. [1]

1.3.5 Tváření konců

Konce pružných prvků jsou navrhovány pro spojení s dalšími elementy zavěšení a jejich tvar se značně liší. Nejčastěji využívaným typem zpracování konců je tváření za tepla na sériových lisech s dedikovaným nástrojem spojujícím operaci indukčního ohřevu, zploštění, stříhání a děrování díry, kdy tyto operace jsou prováděny na obou stranách současně (Obr. 9). Plochy těchto konců jsou kalibrovány na rovinnost a rovnoběžnost. Druhý způ-

sob výroby je svařování, ten se používá při speciálním spojení pružného prvku se zavěšením a využívá se zde závitové díry.



Obr. 9 Formování konců [1]

1.3.6 Práškové lakování, montáž a balení

Tento proces vede ke zvýšení korozní ochrany a tím ke zvýšení životnosti pružných prvků. K ochraně povrchu pružných prvků se používá lakovací systém skládající se ze zinko-fosfátové úpravy a následného nanášení epoxidové práškové barvy. Lakovací proces je navržen pro různé varianty, tj. lakují se jak těla pružných prvků, tak i formované konce. Nejdůležitější předúpravy a lakovací proces se dělí na tyto fáze: [1]

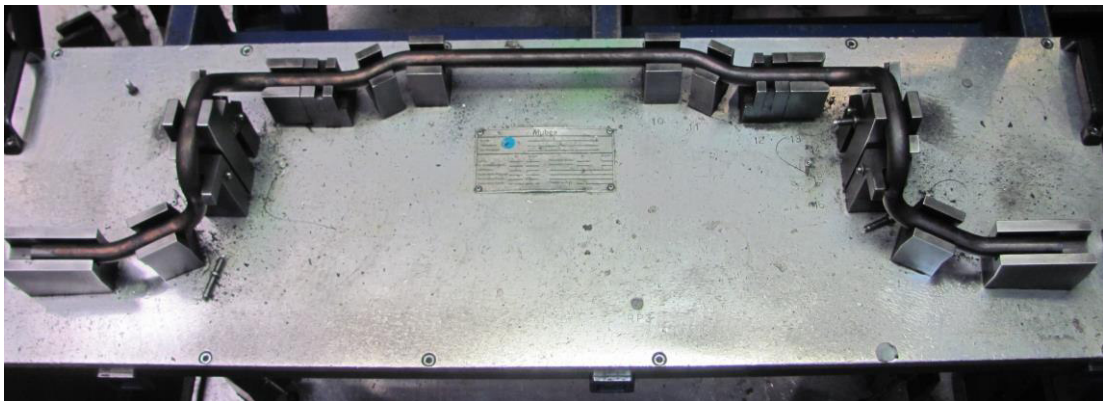
- Čistění povrchu.
- Zinko-fosfátová úprava.
- Nanesení epoxidové práškové barvy pomocí elektrostatického práškovacího zařízení.
- Vytvrzení práškové vrstvy v sušící peci při teplotě 150 °C.

Po lakování mohou být na pružný prvek namontovány systémové komponenty. Jedná se především o gumová ložiska s ocelovými objímkami, které se montují na specializovaných pracovištích podle typu projektu. Následně dochází k etiketování (označení) a balení pružných prvků do přepravních nádob, které jsou připraveny k expedici. [1]

1.3.7 Kontrola kvality

V důsledku dosažení požadované kvality je v průběhu výroby pružný prvek kontrolován. Kontrola pružného prvku se skládá s několika operací, probíhá kontrola geometrického tvaru, odolnosti a jeho životnosti. [1]

Kontrola tvaru se provádí ve speciálních kalibrech, které se nazývají „lehry“ (Obr. 10). Pomocí těchto kalibrů je zaručen správný tvar pružného prvku vzhledem k tomu, aby se pružný prvek bez problémů umístil do automobilu a nedocházelo při jízdě ke kontaktu s ostatními součástmi nacházející se na nápravě. Tyto kalibry se používají po výrobních operacích, kde dochází ke změně tvaru, tj. ohýbání, tepelné zpracování a formování konců s jediným rozdílem, že pro jednotlivé operace jsou tyto kalibry vhodně upravené. Pro přesné určení tvaru pružných prvků s požadavky zákazníka při začátku sériové výroby nebo prototypů se používá pro kontrolu souřadnicový měřicí systém. [1]



Obr. 10 Kontrola tvaru dílů ve speciálním kalibru tzv. lehre

Pružný prvek je při jízdě v automobilu dynamicky namáhán a z tohoto důvodu probíhá i kontrola životnosti. Pružné prvky jsou zatěžovány při dynamických testech za definovaných podmínek, které odpovídají standardům automotive. [1]

Jedná se o zkoušku kmitáním. Konce pružného prvku jsou zatěžovány zdvihem z jejich klidové polohy s opačnou fází. Pružný prvek je upevněn na speciálně navrhnutém stole, kde zadní část pružného prvku je upevněna v radiálních ložiscích a dva konce v pohybujících se ramenech. Test využívá rezonančního efektu, tj. jedno rameno je vybuzeno pomocí motoru, zatímco druhé rameno ho následuje v přesné proti fázi, naklápějí se vůči sobě o 180°. Frekvence testu je přibližně 10 až 30 Hz podle typu pružného prvku. Výhodou tohoto testování je, že vlivem vysoké frekvence kmitání získáme výsledky během krátké časové periody. [1]

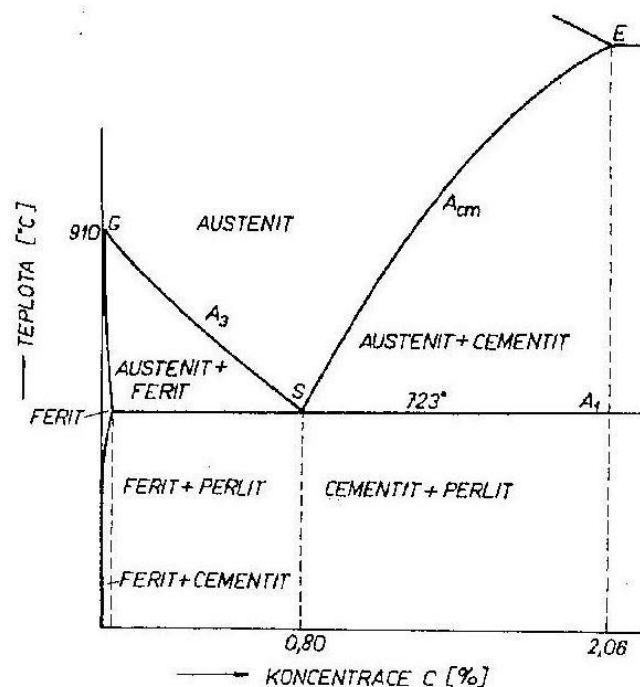
Nekontrolují se všechny vyráběné díly, ale pouze u 3-4 náhodně vybrané díly 1x ročně. Ostatní kmitání souvisí se změnami strojů, uvolnění dílů do sériové výroby atd.

2 HODNOCENÍ METOD TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

Tepelným zpracováním se rozumí řízené využívání fázových a strukturálních přeměn v tuhém stavu s cílem získat požadované mechanické, technologické či jiné užité vlastnosti výrobků nebo polotovarů. V průběhu tepelného zpracování se většinou využívá řízených změn teploty. Způsoby přeměny fází jsou velmi rozmanité, neboť různé jsou i používané slitiny i podmínky, za kterých k přeměnám dochází. [3]

2.1 Austenitizace

Hlavním principem u všech druhů tepelného zpracování ocelí s překrytalizací je austenitizace, tj. ohřev nad kritické teploty a přeměna feriticko-cementické struktury na strukturu austenitickou. Při austenitizaci jsou důležité dva pochody, prvním je tvorba a homogenizace austenitu, druhým je následný růst austenitického zrna. Pro pozorování tepelného zpracování ocelí nám pomůže rovnovážný diagram Fe-Fe₃C, a to jeho levá část (do obsahu uhlíku 1,7 % C) v překrytalizační oblasti (Obr. 11). [3]

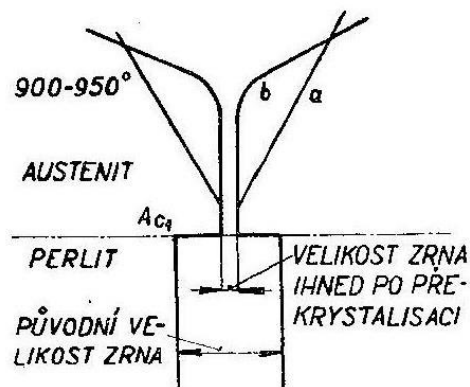


Obr. 11 Část rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C [4]

Tvorba austenitu probíhá v rozmezí teplot A₁ – A₃ (oceli podeutektoidní), A_{c1} – A_{cm} (oceli nadeutektoidní) a za konstantní teploty A₁ = A₃ (oceli eutektoidní). Při teplotě A₁ vznikají austenitická zrna, které pohlcují lamelky perlitického feritu a cementitu. S dalším zvyšo-

váním teploty ke křivkám A_3 a A_{c_m} se v austenitu postupně rozpouští feritická zrna nebo segregáčnící cementit. Při ukončení austenitizace nemusí být struktura zcela homogenní. Nejsnadnější vytvoření homogenního austenitu se dosáhne u eutektoidních ocelí. U pod-eutektoidních ocelí je potřeba ohřát ocel nad teplotu A_3 a po určitou dobu tuto teplotu udržovat, aby mohla účinně proběhnout difuze uhlíku. [4]

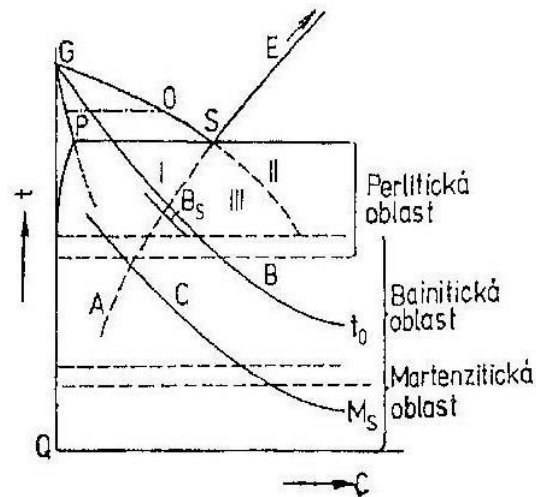
Velikost austenitického zrna je důležitou hodnotou při tepelném zpracování. Nejjemnější austenitická struktura vzniká překrytalizací jemného zrnitého perlitu; lamelární perlit dává již zrno poněkud hrubší a jeho hrubost vzrůstá s hrubostí sekundární feriticko-cementitické struktury. Při překročení teploty A_3 zrno austenitu roste; růst je tím větší, čím vyšší je teplota a čím delší je doba prodlevy. Různé druhy ocelí hrubnou zcela odlišně, některé hrubnou velmi snadno při poměrně malém prohřátí nad A_3 a jiné odolávají růstu zrna dlouho i za vyšších teplot. Rozličné chování různých druhů ocelí při ohřevu je příčinou, proč veškeré oceli se rozdělují na hrubo zrné a jemno zrné (Obr. 12). Velikost austenitického zrna ovlivňuje podstatným způsobem mechanické a technologické vlastnosti oceli. [4]



Obr. 12 Schéma růstu zrna eutektoidní oceli; a – hrubo zrné; b – jemno zrné [4]

2.2 Přeměny austenitu

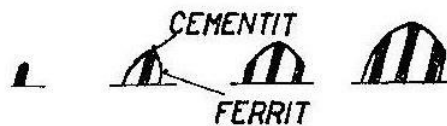
Klesne-li teplota oceli pod kritické teploty A_3 , A_{c_m} a A_1 , dochází k přeměně přechlazeného austenitu. Jedná se o přeměnu polymorfního železa γ na železo α , jež je doprovázena značnou změnou rozpustnosti uhlíku v odpovídajících tuhých roztocích. Oblasti výskytu hlavních druhů přeměn přechlazeného austenit jsou znázorněny na obrázku (Obr. 13). Čáry udávající počátek „přesycení“ austenitu feritem (GS) a cementitem (ES) jsou prodlouženy pod teplotu A_{c_1} . Čára tak odpovídá „rovnováže“ mezi tuhým roztokem γ a tuhým roztokem α téhož složení. [3]



Obr. 13 Oblasti výskytu hlavních druhů přeměn přechlazeného austenitu [3]

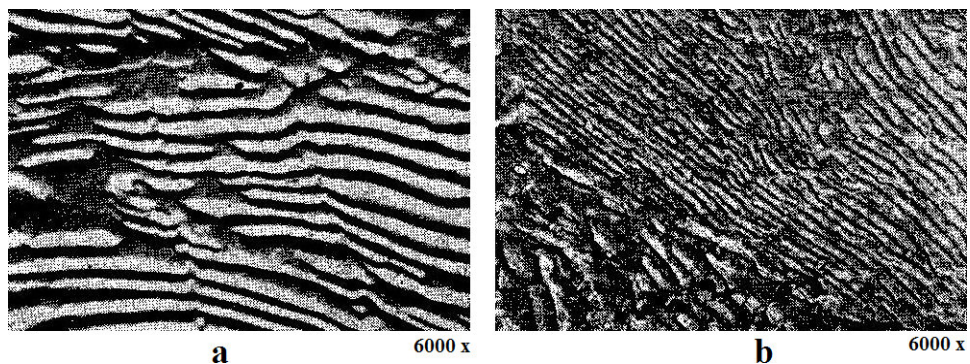
2.2.1 Perlitická přeměna

V teplotním intervalu A_1 až $500\text{ }^\circ\text{C}$, ve kterém je dostatečně účinná difuze uhlíku i železa, odpovídá perlitická přeměna. Austenit uhlíkové oceli o eutektoidním složením se rozpadá na perlit, tj. eutektoidní směs feritu a cementitu (karbidů), (Obr. 14). [3]



Obr. 14 Schéma vzniku lamelárního perlitu [4]

S klesající teplotou izotermické přeměny nebo s rostoucí rychlostí ochlazování se zvětšuje počet zárodků perlitu, a tedy ke zmenšování velikosti perlitických kolonií, která následuje zmenšením mezilamelárních vzdáleností perlitu (Obr. 15). [4]

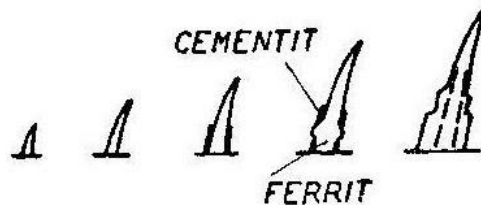


Obr. 15 Lamelární perlit po izotermickém rozpadu za teploty; a – $700\text{ }^\circ\text{C}$, hrubý; b – $600\text{ }^\circ\text{C}$, jemný [4]

Zmenšováním velikostí perlitických kolonií a mezimolekulární vzdáleností je příčinou zvýšení houževnatosti, tvrdosti a pevnostních charakteristik, přičemž charakteristiky tvárnosti se rapidně nemění. Mimo perlit s typickou lamelární morfologií se může vyskytovat i perlit zrnitý (globulární), ve kterém se cementit vyskytuje v podobě částic globulárního tvaru. [3]

2.2.2 Baitická přeměna

Mezi teplotami 500 až 200 °C má difuze uhlíku ještě dostatečnou rychlost, přičemž difuze železa je nulová. Vznikající roztok má nižší obsah uhlíku vůči původnímu austenitu k vylučování cementitu (karbidů), tj. baitická přeměna. Austenit se přeměňuje na směs feritu a jemných částic cementitu (Obr. 16). [3]

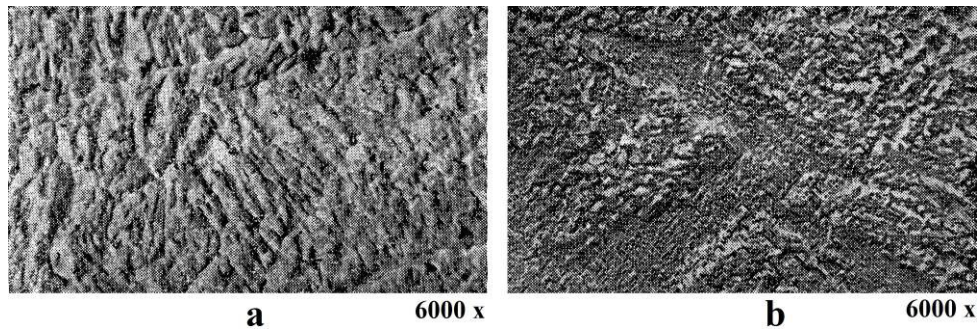


Obr. 16 Schéma vzniku bainitu [4]

Uspořádání feritická fáze má jehlicovitý tvar, který se stává výraznější s nižší teplotou přeměny, a tedy s dokonalejším potlačení možnosti samodifuze železa. S klesající teplotou se zmenšuje i velikost cementických částic, jejich vznik je způsoben difuzí uhlíku. Z tohoto důvodu je odlišný mechanismus přeměny bainitu, kdy v horních teplotách přeměny (teploty 550 – 350 °C) vzniká bainit horní a ve spodních teplotách (pod 350 °C) vzniká bainit dolní. [4]

Stejně jako u perlitické přeměny, tak i u baitické přeměny vzrůstá tvrdost s klesající teplotou přeměny, souběžně se zjemňováním částic baitického cementitu (Obr. 17). V oblasti přechodu z perlitického stupně k baitickému, je u uhlíkových ocelí struktura tvořena směsí perlitické a baitické struktury, tj. ve struktuře jsou obsaženy jak lamely jemného perlitu, tak i širší lamely horního bainitu, a pokud se tyto nezjemní, tvrdost se nezvětšuje. Spodní bainit je u uhlíkových ocelí výrazně odlišný od jemného perlitu. Karbidické částice většinou zrnitého tvaru jsou velmi jemné a struktura bainitu má jehlicovitý charakter. Jehlicovitý charakter spodního bainitu a také teplota, při které vznikají, nazna-

čuje, že jehlice feritické fáze vznikají kluzným mechanismem podobným martenzitickému. [4]



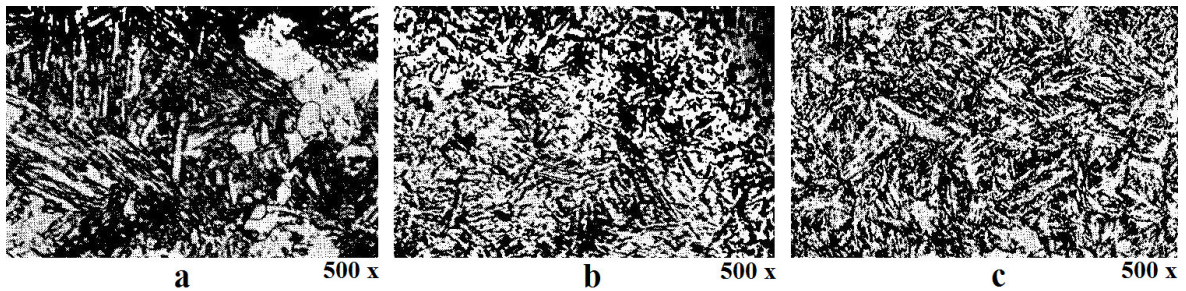
Obr. 17 Bainit po izotermickém rozpadu za teploty; a – 500 °C, horní; b – 250 °C, dolní [4]

2.2.3 Martenzitická přeměna

Je-li austenit přechlazen až do oblasti nízkých teplot, tak zde není možná difuze substitučních prvků, tak i intersticiálních prvků, tudíž se mění bezdifuzní přeměnou na martenzit, tj. nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α . Pro vznik této nerovnovážené fáze, je nutné ochladit ocel v austenitickém stavu pod teplotu M_s v čase kratším, než je doba potřebná pro vznik perlitické nebo bainitické fáze. Minimální rychlost, při které je potlačen vznik perlitu a bainitu se nazývá kritická rychlost kalení v_k . [3]

Martenzitická transformace je dána teplotně v intervalu (M_s , M_f), kde odpovídá určitý podíl martenzitu, který vznikne prakticky okamžitě, což odpovídá vysoké rychlosti růstu útvaru martenzitu. Úplné ukončení martenzitické transformace nastane až pod teplotou M_f , kde zůstává část austenitu netransformována – zbytkový austenit. Podíl martenzitu v závislosti na teplotě přeměny udává tzv. martenzitická křivka oceli, kdy teplota M_f může ležet i pod 0 °C, jejímž výsledkem je minimální množství zbytkového austenitu. V uhlíkových ocelích bývá podíl zbytkového austenitu 2 až 5 %. [4]

Martenzit vzniká smykovým mechanismem, kterým se vytváří desky (jehlice, disky), které mají velkou tendenci k soudržnosti s výchozím austenitem. Mřížka martenzitu je tetragonálně prostorově středěná a tetragonalita roste s obsahem uhlíku. Obsah uhlíku (Obr. 18) má rovněž rozhodující vliv na mechanismus neproměnné mřížkové deformace. Při obsahu uhlíku asi do 0,25 hm. % se tato deformace uskutečňuje skluzem (dislokační martenzit); s růstem obsahu uhlíku se postupně uplatňuje deformace dvojčatění (dvojčatový martenzit). [3]



Obr. 18 Martenzit v uhlíkových ocelích; a – 0,2 % C; b – 0,6 % C; c – 1,3 % C

[4]

Velká tvrdost martenzitu v ocelích je dána těmito zpevňujícími mechanismy: [3]

- Zpevnění tuhého roztoku, zejména intersticiálním uhlíkem,
- Zpevněním vyvolané hranicemi martenzitických útvarů,
- Substrukturním zpevněním (dislokační nebo dvojčatový martenzit).

Vzhledem k těmto zpevňovacím mechanismům společně se značným vnitřním pnutím, jehož hlavními zdroji jsou růst měrného objemu při přeměně austenitu v martenzit a tepelná pnutí spojená s nerovnovážným ochlazováním kalených součástí, způsobují vysokou křehkost martenzitu. Přílišná tvrdost a křehkost zakalené oceli spolu se zbytkovým austenitem se odstraňují popouštěním, které by mělo následovat bezprostředně po zakalení. [5]

2.2.4 Transformační diagramy ocelí

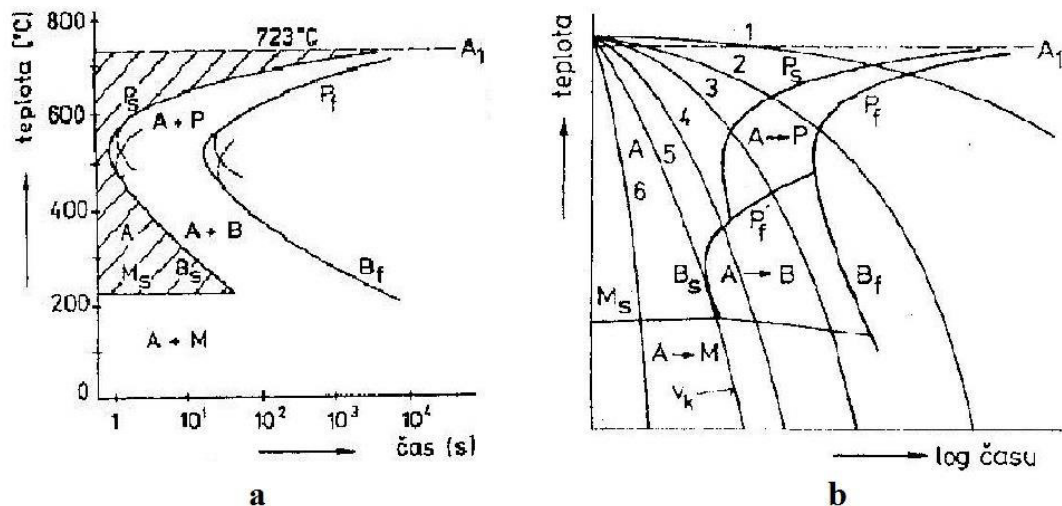
Při tepelném zpracování má praktický význam znalost kinematiky přeměn, z důvodu, že přeměna austenitu se neděje jediným způsobem. Tato kinematika je znázorněna pomocí časové a teplotní závislosti přechlazeného austenitu. Jsou využívány transformační diagramy dvojího druhu, a to izotermické a anizotermické. [6]

Diagramy izotermického rozpadu austenitu (diagram IRA)

Znázorňují dobu přeměn austenitu za izotermických podmínek (Obr. 19a). Počátky a konce perlitické a bainitické přeměny jsou křivky ve tvaru písmene „C“. Struktura austenitická se nachází vlevo od křivky (křivek) počátku perlitické a bainitické přeměny (P_s , B_s) až po teplotu přeměny martenzitu (M_s). Struktury tvořené produkty těchto přeměn jsou vpravo od křivky (křivek) přeměn (P_f , B_f) a pod teplotou M_s probíhá martenzitická přeměna. [3]

Diagramy anizotermického rozpadu austenitu (diagramy ARA)

Udávají dobu přeměn austenitu při různých rychlostech ochlazování (Obr. 19b). Při pomalém ochlazování eutektoidní oceli, křivky 1 a 2, dochází k perlitické přeměně, kdy s rostoucí rychlostí ochlazování se posouvá počátek i konec přeměny k nižším teplotám a časům. Dosáhneme-li určité rychlosti ochlazování (např. křivka 3) nedochází k perlitické přeměně do konce a zbylý austenit se přeměňuje na bainit, takže výsledná struktura perlitobainitická. Ochlazování odpovídající křivce 4 znázorňuje přeměnu austenitu na bainit a pod teplotu M_s pokračuje přeměna na martenzit. Se stále se zvyšující se rychlostí ochlazování se zvětšuje podíl martenzitu až do rychlosti větší než znázorňuje křivka 5 (resp. v_k), kde se austenit transformuje na martenzit. Kritická rychlost kalení v_k je nejmenší rychlost ochlazování, když je výsledná struktura tvořena martenzitem a jistým podílem zbytkového austenitu. [3]



Obr. 19 Transformační diagramy; a – diagram IRA; b – diagram ARA [3]

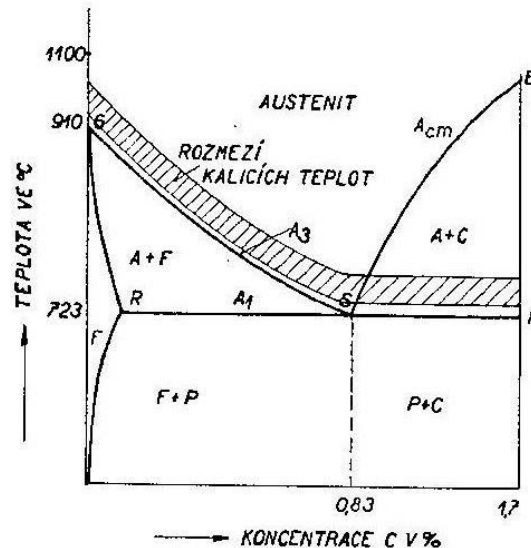
2.3 Kalení

Kalení je způsob tepelného zpracování, s cílem dosáhnout nerovnovážných stavů ocelí. Kalení rozdělujeme na bainitické a martenzitické, ale většinou je požadováno, aby vznikla struktura martenzitická. [7]

2.3.1 Kalicí teplota

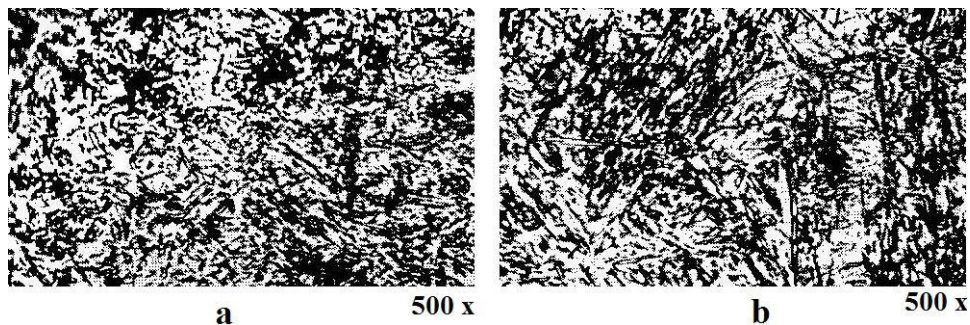
Kalicí teplota musí ležet nad překryštalizačními teplotami oceli, aby struktura oceli před kalením byla tvořena homogenním tuhým roztokem γ anebo směsí austenitu a cementitu u ocelí nadeutektoidních. Pro uhlíkové oceli je kalicí teplota v souladu s rovnovážným dia-

gramem, kdy správné kalící teploty leží od 30 do 50 °C nad teplotou A_3 (u ocelí podeutektoidních) nebo A_1 (u ocelí nadeutektoidních), (Obr. 20). Příliš vysoká teplota ohřevu je nežádoucí, neboť má za následek růst austenitického zrna, jehož důsledkem je zhoršení mechanických vlastností oceli. [4]



Obr. 20 Kalící teploty uhlíkové oceli [4]

Prudkým kalením ze správné teploty (30 až 50 °C nad A_3) vzniká struktura s poměrně jemnými jehlicemi (Obr. 21a). Zvyšováním kalící teploty vzrůstá i hrubost zakaleného martenzitu, vnitřní pnutí se zvětšuje a ocel se stává křehčí (Obr. 21b). [4]



Obr. 21 Martenzitická struktura podeutektoidní oceli; a – správně zakalená (jemný martenzit); b – kalená z příliš vysoké teploty (hrubý martenzit) [4]

2.3.2 Ohřev na kalící teplotu

Ohřev konstrukčních součástí a nástrojů, jež se tepelně zpracují, se provádí v pecích nebo v lázních. Rychlost ohřevu má značný vliv na zvýšení výkonu ohřívacích zařízení a je proto snaha co největší rychlost ohřevu. [4]

Jsme omezeni však tím, že v ohřívání oceli vzniká vnitřní pnutí, způsobené rozdíly teplot povrchové vrstvy a jádra (jádro je ohříváno vedením tepla povrchovými vrstvami). V souladu s koeficientem tepelné roztažnosti dilatuje povrch více než jádro, a tím vznikají objemové rozdíly způsobující vnitřní pnutí. Rovněž tvarová komplikovanost ohříváního předmětu, tj. rozdíly v tloušťkách stěn, ostré přechody, zápichy apod., působí nepříznivě. Po prohřevu součásti na teplotu ohřívacího prostředí se vnitřní pnutí vyrovná a došlo-li během ohřevu k pružné deformaci, tak tato deformace zmizí. [4]

Ohřev v pecích

Rychlost ohřevu je poměrně malá, a proto je ohřívání předmět dlouhou dobu vystaven působení atmosféry pece, což vede k chemickým změnám jeho povrchu. Povrchová vrstva se může oduhličít a okysličit, a proto se po tepelném zpracování nedosáhne požadované tvrdosti a čistého povrchu. [4]

Oduhličení probíhá v povrchové vrstvě ohřívání oceli jako důsledek reakce $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Okysličení nastává pouze v povrchové vrstvě, jež je v přímém styku s atmosférou pece, naopak oduhličení postupuje i do hloubky. Rychlost oduhličení a okysličení závisí na teplotě, čase, složení a druhu atmosféry. [4]

V atmosféře pece, podle druhu paliva i způsobu spalování, bývají přítomny tyto plyny: CO_2 , CO , O_2 , H_2 , H_2O , N_2 , CH_4 . Jejich působení na ocel je rozdílné; tak např. H_2 oduhličuje, CO_2 okysličuje, O_2 a H_2O okysličují i oduhličují, CO a CH_4 nahučují. Při určitém poměru obou plynů není atmosféra ani oxidační, ani redukční. Takové inertní atmosféry se označují jako ochranné a jsou dány určitým, na teplotě závislým poměrem oxidačních a redukčních složek atmosféry. [4]

Ohřev v lázních

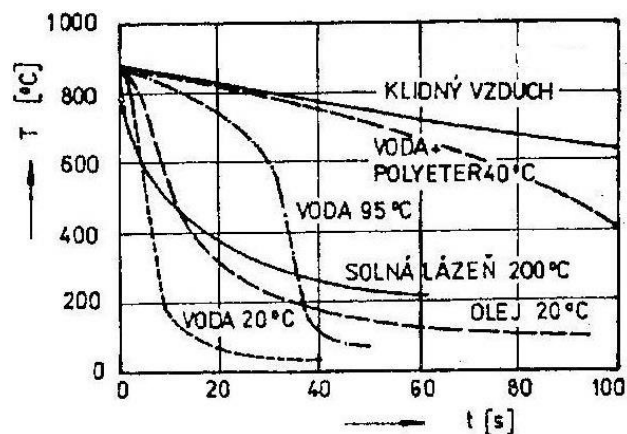
Rychlost ohřevu v lázních je větší než rychlost ohřevu v pecích. Předmět je zcela pravidelně ohříván ze všech stran, a proto je menší nebezpečí deformací. Není ve styku se vzduchem nebo s atmosférou peci a při volbě vhodného druhu lázně nedochází k žádným chemickým změnám povrchu ohříváního předmětu. [4]

Jako ohříváních lázní se užívá tavenin solí, kovů a slitin. Z kovů to bývá nejčastěji olovo, při jeho použití nesmíme zapomenout na to, že je jedovaté. Jako solných lázní se užívá nejčastěji směs chloridů, dusičnanů i fluoridů sodíku, draslíku a barya. Někdy užívané

kyanidové lázně sytí povrch oceli uhlíkem a dusíkem. K nesporným výhodám ohřevu v solných lázních je nutno přičítat i snadnou kontrolu teploty a při vhodném způsobu ohřevu i malé rozdíly teplot v různých místech lázně. [4]

2.3.3 Kalicí prostředí

Ochlazovací prostředí se musí volit tak, aby umožňovalo ochlazování součásti rychlostí jen o málo překračující rychlost kritickou, protože příliš vysoká ochlazovací rychlost má za následek růst vnitřních teplotních a strukturních pnutí. Účinnosti nejčastěji používaných kalících prostředí, tj. vody, oleje a vzduchu je znázorněno na (Obr. 22). [3]



Obr. 22 Ochlazovací křivky v uvedených prostředích [3]

Voda je nejběžnější intenzivně působící kalící prostředí. Je nenáročné, nehořlavé a levné. V oblasti martenzitické přeměny je velká ochlazovací rychlost nežádoucí, protože zvyšuje úroveň vnitřních pnutí. Pro zvýšení ochlazovací účinnosti je nutný pohyb vody, anebo přidáním kyselin (H_2SO_4), solí ($NaCl$, $NaNO_3$ a KNO_3) nebo louhu ($NaOH$). [3]

Oleje mají ve srovnání s vodou výrazně menší rychlost ochlazování (až 4x v perlitické oblasti a 10x v martenzitické oblasti). Výhodou kalení do tohoto prostředí je, že vznikají malá vnitřní pnutí, nevýhody jsou zejména nebezpečí vznícení a negativní vliv na životní prostředí. Nejvíce používanými oleji jsou oleje minerální s aditivy, dále méně používanými oleji jsou oleje syntetické (delší životnost, menší zatížení životního prostředí). [3]

Vzduch je nejmírnější kalící prostředí. Plynulé ochlazování, jehož účinek lze zvyšovat prouděním nebo kombinací s vodou (vodní mlha). V tomto prostředí se kalí vysoce legované oceli tzv. samokalitelné. [3]

Teplé lázně se výhradně používají pro termální kalení a izotermické zušlechťování. Jako ochlazovací prostředí se používá tavenin kovů (Pb, Sn a Sn), olejů nebo tavenin solí. Ochlazovací účinnost je poměrně malá, klesá s teplotou a zvětšuje se pomocí cirkulace nebo přidáním vody. [3]

2.3.4 Kalitelnost oceli

Kalitelnost je schopnost slitiny dosáhnout rychlým ochlazením z určité tzv. kalící teploty nerovnovážného stavu. Rozsah pro dosažení nerovnovážného stavu kalené oceli se používá nejčastěji hodnoty tvrdosti. Kalitelnost se obvykle vztahuje na vytvoření martenzitu bezdifuzní přeměnou austenitu. Za uvedených předpokladů lze tedy pro většinu případů (s výjimkou izotermického kalení) definovat kalitelnost, jako schopnost oceli získat kalením kritickou nebo větší rychlostí martenzitickou strukturu o vysoké tvrdosti. S ohledem na nutnost vztahovat kalitelnost na tělesa o určitých rozměrech a tvarech, jeví se účelné pojem kalitelnost ještě dále rozdělit a tak dospějeme k pojmům: [4]

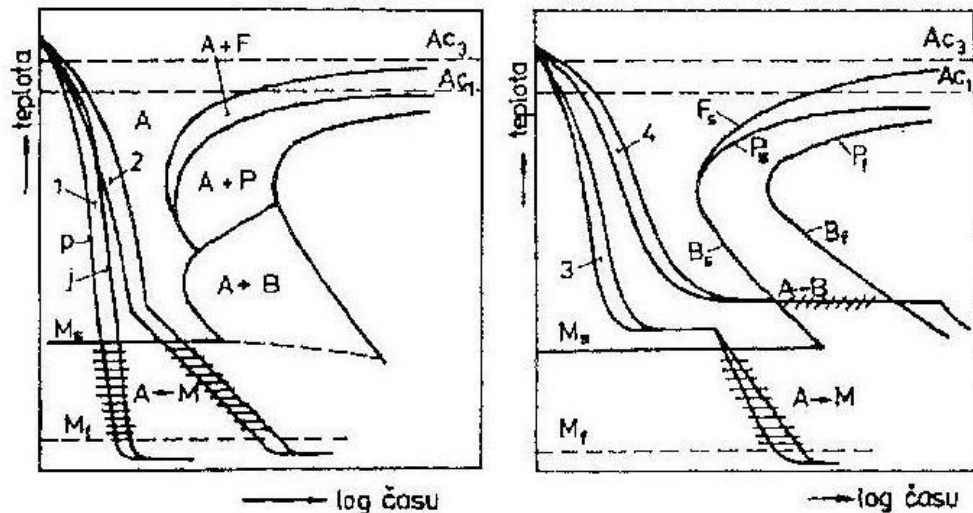
Zakalitelnost je schopnost dosáhnout nejvyšší hodnoty, kterou jsme zvolili za měřítko stavu po kalení dané slitiny. Vzhledem k nejčastěji užívanému měřítku tvrdosti se tedy jeví jeho schopnost nabýt nejvyšší tvrdosti, jež je možná u dané oceli. [4]

Prokalitelnost lze za stejných podmínek definovat jako schopnost dosáhnout tvrdosti odpovídající zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem. [4]

2.3.5 Způsoby kalení

Způsob kalení, který zvolíme, závisí na požadovaných vlastnostech kalného předmětu, tj. na jeho velikosti, tvaru a na druhu použité oceli. Použijeme-li kalení (ochlazování) v prostředí o pokojové teplotě (do studené lázně), tak mluvíme o plynulém ochlazování. Ochlazujeme-li do dvou prostředí o pokojové teplotě, ale s rozdílnou intenzitou ochlazování, nebo teplé lázně, jedná se o přetržité kalení. Důvodem, proč používáme více variant přetržitého chlazení, je snížení úrovně vnitřního pnutí a tím omezit deformace kalené součásti, popř. zabránit vzniku trhlin. Způsoby kalení jsou znázorněny na (Obr. 23). [3]

Nejednodušší a nejčastěji používaný způsob je *martenzitické kalení do studené lázně* (voda, olej, vzduch) Hlavní výhody tohoto kalení jsou technologická nenáročnost a nízká cena. Nevýhody jsou vysoká úroveň vnitřních pnutí, především po kalení do vody a následné deformace až praskání součástí. [3]



Obr. 23 Způsoby kalení; 1 – do studené lázně; 2 – lomené; 3 – termální; 4 - izotermické zušlechťování [3]

Dalším způsobem je *přerušované (lomené) kalení*, které spočívá v rychlém ochlazení těsně nad teplotu M_s , což zabrání v perlitické přeměně. Následuje přemístění součásti do mírnějšího ochlazovacího prostředí, ve kterém proběhne martenzitická přeměna. Nejpoužívanější kombinace ochlazovacího prostředí jsou voda-olej, voda-vzduch nebo olej-vzduch. Výhodou tohoto kalení je, že slouží ke snížení úrovně strukturních pnutí, a využívá se zejména u tvarově složitých a rozměrných součástí, anebo u součástí praskajících při kalení do studené lázně. [8]

Způsob, kdy se součást ochlazuje v lázni, jejíž teplota leží těsně nad teplotou M_s kalené součásti, se nazývá *termální kalení*. Díky výdrži na této teplotě, dojde k vyrovnání teplot mezi povrchem a jádrem součásti, což vede k potlačení teplotních pnutí ještě před kalením. Následuje ochlazení na vzduchu, kdy proběhne martenzitická přeměna. Tento způsob kalení se používá u součástí vyrobených z legovaných ocelí, nebo u menších tenkostěnných a tvarově složitých výrobků z uhlíkových či nízkolegovaných ocelí. [9]

Stejně jako při termálním kalení se předmět rychle přesune z kalící teploty do termální lázně (roztavené soli, slitiny kovů), jejichž teplota je v oblasti bainitické přeměny (300 až 400 °C), jedná se o způsob *izotermického zušlechťování*. Po ukončení bainitické přeměny v lázni se součást ochlazuje na vzduchu. Výhodou je dosažení minimální úrovně teplotních a strukturních pnutí, tudíž deformace a praskání kalených součástí je minimální. [3]

Naposledním způsobem je *kalení se zmrazováním*, kdy se zakalený předmět v co nejkratší době přesune do prostředí s teplotou pod bodem mrazu (až -196, teplota kapalného dusí-

ku). Cílem je zmenšit podíl zbytkového austenitu ve struktuře na minimum. Používá se zejména u výrobků, u nichž je důležitým požadavkem rozměrová stabilita (měřidla, nástroje, valivá ložiska), a které se zpravidla vyrábějí z ocelí s teplotou M_f pod bodem mrazu. [3]

2.3.6 Vnitřní pnutí při kalení

Každá ocelová součást po zakalení má vnitřní pnutí. Vnitřní pnutí v zakaleném předmětu vyvolává pružné i plastické deformace, jež se projevují deformací kaleného předmětu. Překročí-li hodnota vnitřních pnutí mez pevnost materiálu, dojde k jeho porušení a objevují se trhlinky. [4]

Podle vzniku lze vnitřní pnutí zhruba rozdělit do tří skupin: [4]

1. Vnitřní pnutí vyvolané nepravidelnostmi v mřížce,
2. Vnitřní pnutí vyvolané rozdíly ve struktuře,
3. Tepelné vnitřní pnutí.

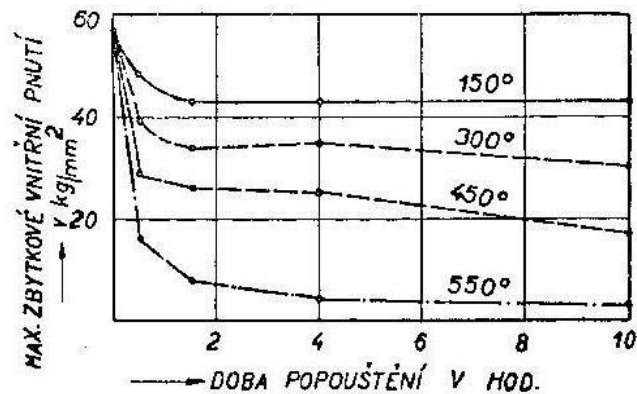
Vnitřní pnutí vyvolané nepravidelnostmi v mřížce vznikají důsledkem násilného zadržení uhlíku v mřížce α při kalení se krychlová mřížka mění v mřížku tetragonální za současného růstu objemu kalené oceli. Vznik vnitřních pnutí, která vyvolávají v mřížce zadržené atomy uhlíku, je neoddelitelně spjat s kalením, tj. se vznikem martenzitu. Protože tato pnutí vznikají uvnitř krystalové mřížky a kalená ocel se stává z velkého počtu zrn o zcela náhodné orientaci mřížek, nedávají tato pnutí v makroskopickém měřítku žádné výslednice, tzn. vnitřní pnutí se neprojeví. [4]

Vnitřní pnutí vyvolané nestejnorodostí struktury. Strukturní vnitřní pnutí mají svůj původ v nestejnorodosti struktury. Většinou vznikají vedle martenzitu, který má největší měrný objem, přechodové struktury (troosit, jemný perlit, bainit) s menším měrným objemem a také zůstává zachováno jisté množství zbytkového austenitu, jehož měrný objem je nejmenší ze všech strukturních součástí zakalené oceli. V jednotlivých místech předmětu jsou pak objemové změny rozdílné a mohou vyvolat tak velká pnutí, že dochází ke vzniku mikrotrhlinek. [4]

Tepelná vnitřní pnutí vznikají v každém ochlazovaném předmětu bez ohledu na to, zda dochází nebo nedochází současně k fázovým přeměnám. Jsou způsobena rozdílem teplot v různých bodech průřezu ochlazovaného předmětu, neboť smršťování probíhá v souladu s koeficientem tepelné roztažnosti podle okamžité teploty v uvažovaném místě. Mezi obě-

ma částmi průřezu vznikají značná vnitřní pnutí, a to v povrchové vrstvě tlaková a v jádře tahová. Velikost vnitřního pnutí závisí na druhu materiálu (tepelná roztažnost, tepelná vodivost a tvárnost) a na rychlosti ochlazování. [4]

Zbytková vnitřní pnutí v zakalené oceli je nutno odstranit nebo snížit. To se děje popouštěním, jež má následovat ihned po kalení. Ohřev na popouštěcí teplotu zvyšuje tvárnost oceli a pružné deformace se mohou přeměnit v plastické a tím se pnutí snižují. Dále probíhají strukturální přeměny provázené změnami objemu, které většinou vedou ke snížení napětí. Se zvyšující se teplotou popouštění klesá hodnota vnitřního pnutí (Obr. 24). Z obrázku je zřejmé, že doba popouštění delší než 2 hodiny nevede k dalšímu snížení vnitřního pnutí. [4]



Obr. 24 Vliv teploty na dobu popouštění na velikost vnitřního pnutí [4]

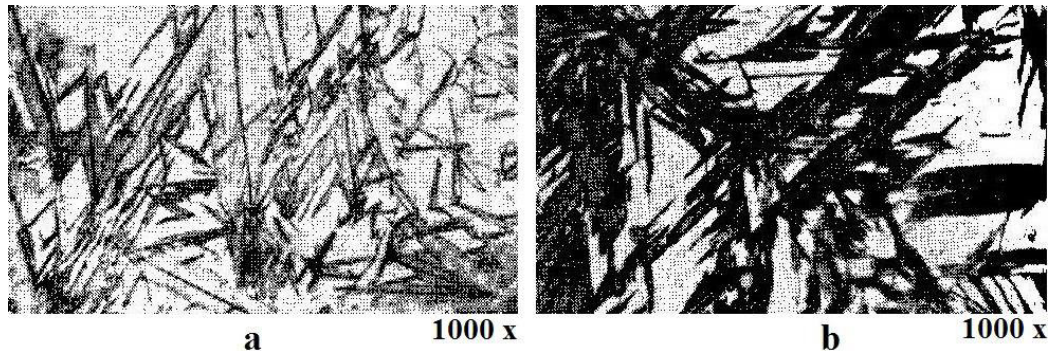
2.4 Popouštění

Zakalením získaná martenzitická struktura oceli má velkou tvrdost a křehkost, jež je způsobena vnitřním pnutím a značnou deformací krystalové mřížky. Je metastabilní a má silný sklon se přeměnit ve strukturu stabilnější. Zvýšením teploty zakalené oceli, tj. jejím popouštěním, se umožňuje dosažení vyšší stability. [5]

Při popouštění zakalené oceli dochází k řadě fázových přeměn; značná komplikovatelnost pochodů probíhajících při popouštění vyplývá jednak z heterogenity zakalené oceli (martenzit, zbytkový austenit) a jednak je dána poměrně širokým rozmezím teplot, ve kterých se popouštění provádí. [4]

2.4.1 Přeměny při popouštění

Až do teplot asi 80 °C nedochází ke změnám. V rozsahu teplot 80 až 170 °C se měrný objem zmenšuje. Tetragonální martenzit s největším objemem se přeměňuje a změna se projevuje zmenšováním tetragonálnosti, tj. tetragonální mřížka se mění na mřížku kubickou. Při této první přeměně se světlý tetragonální martenzit mění ve tmavý martenzit kubický (popouštěcí martenzit), (Obr. 25). [4]



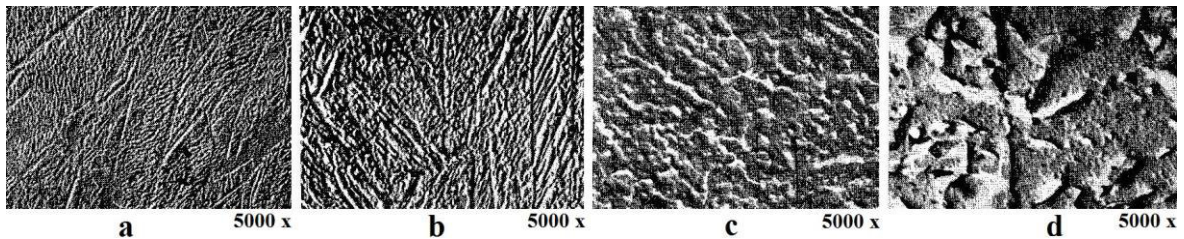
Obr. 25 Mikrostruktura oceli; a – tetragonální martenzit (po zakalení); b - kubický martenzit (po popouštění na 150 °C) [4]

V rozsahu popouštěcích teplot 200 až 300 °C probíhá tzv. druhá přeměna zakalené oceli. Zbytkový austenit se přeměňuje ve směs přesyceného tuhého roztoku α a karbidu železa Fe_3C ; přeměňuje se tedy v kubický (popouštěcí) martenzit. Rozpad austenitu je doprovázen růstem objemu, snížením vnitřních pnutí a přeměna je ukončena za teploty kolem 300 °C. Lze pozorovat, že jehlicová stavba, rozlišující původní oblasti martenzitických jehlic a zbytkového austenitu, zůstává ještě zachována, ale strukturně již není mezi nimi zásadní rozdíl (Obr. 26a). [4]

Při popouštění za vyšších teplot se objem opět zmenšuje. Dochází k precipitaci karbidů a k odstraňování vnitřních pnutí, jež vznikly v důsledku dříve probíhajících přeměn, doprovázených objemovými změnami. Vznikající karbidy se oddělují a probíhá jejich koagulace. Za teploty kolem 400 °C končí třetí přeměna a struktura zakalené části se skládá z feritu a cementitu. Je patrné, že jemně vyloučené precipitáty mají lamelární charakter a v jejich orientaci je zřejmá dědičnost původní martenzitické jehlicové struktury (Obr. 26b). [4]

Se zvyšující se teplotou postupuje dle koagulace původně velmi jemných útvarů cementitu; její rozsah je tím větší, čím je vyšší popouštěcí teplota. Za teploty 550 °C jsou cementické útvary již dosti hrubé (Obr. 26c) a většinou již nemají lamelární tvar ani určitou uspořáda-

nost. Za nejvyšších popouštěcích teplot jsou ve struktuře částečně sferoidisované částice cementitu (zrnitý perlit), (Obr. 26d). [4]



Obr. 26 Mikrostruktura oceli popuštěné na teplotu; a – 300 °C; b – 400 °C; c – 550 °C; d – 700 °C [4]

2.4.2 Způsoby popouštění a popouštěcí křehkost

Cílem popouštění je odstranit nebo zmenšit vnitřní pnutí vzniklá kalením a upravit mechanické vlastnosti na požadované vlastnosti. Podle výšky popouštěcí teploty, která má na výsledné vlastnosti převládající vliv, rozlišujeme popouštění při nízkých a vyšších teplotách. [6]

Popouštění při nízkých teplotách se uskutečňuje obvykle v rozmezí teplot 100 až 300 °C. Jeho účelem je snížit úroveň vnitřních pnutí, zmenšit podíl zbytkového austenitu, odstranit křehký tetragonální martenzit, zlepšit houževnatost, popř. stabilizovat rozměry, při zachování vysoké tvrdosti. Používá se zejména u nástrojových ocelí, u nichž základním požadavkem je vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení. [6]

Popouštění při vyšších teplotách, obvykle v rozmezí 400 až 650 °C, se používá, jsou-li požadovány vysoké pevnostní vlastnosti (R_m ; $R_{p0,2}$) a současně plasticita a houževnatost oceli. Takovou kombinací vlastností poskytuje sorbitická struktura, která se získá kalením a následným popouštěním při vyšších teplotách; celý tento postup tepelného zpracování se nazývá zušlechťování. Zušlechťují se silně namáhané součásti z konstrukční oceli. [6]

V určitých oblastech popouštěcích teplot však není pokles pevnostních vlastností doprovázen odpovídajícím vzrůstem houževnatosti. Příčinou tohoto jevu je vývoj *popouštěcí křehkosti*. Rozvoj popouštěcí křehkosti v oceli zpravidla vede k poklesu hodnot vrubové a lomové houževnatosti, zvýšení tranzitní teploty, zvýšení náchylnosti ke koroznímu praskání atd. [10]

Rozlišujeme tři druhy popouštěcí křehkosti (oblasti I až III), a to podle teplotních a časových podmínek popouštění. Za izotermických podmínek se vyvíjí popouštěcí křehkost ve

dvou intervalech. Při nízkých teplotách, většinou v rozmezí 350 až 450 °C, vzniká tzv. *nízkoteplotní popouštěcí křehkost* – NTPK (oblast I). Za relativně vysokých popouštěcích teplot, s maximálním poklesem houževnatosti v okolí teploty 550 °C, se vyvíjí *vysokoteplotní popouštěcí křehkost* – VTPK (oblast II). Při pomalém ochlazování z popouštěcí teploty může dojít ke zkřehnutí v důsledku rozvoje tzv. anizotermické složky VTPK (oblast III) popouštěcí křehkosti. Popouštěcí křehkost je dána chemickým složením ocelí, ale především pak obsahem tzv. povrchově aktivních prvků (P, S, Sn, As, Sb aj.) [10]

3 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU PRUŽNÝCH PRVKŮ

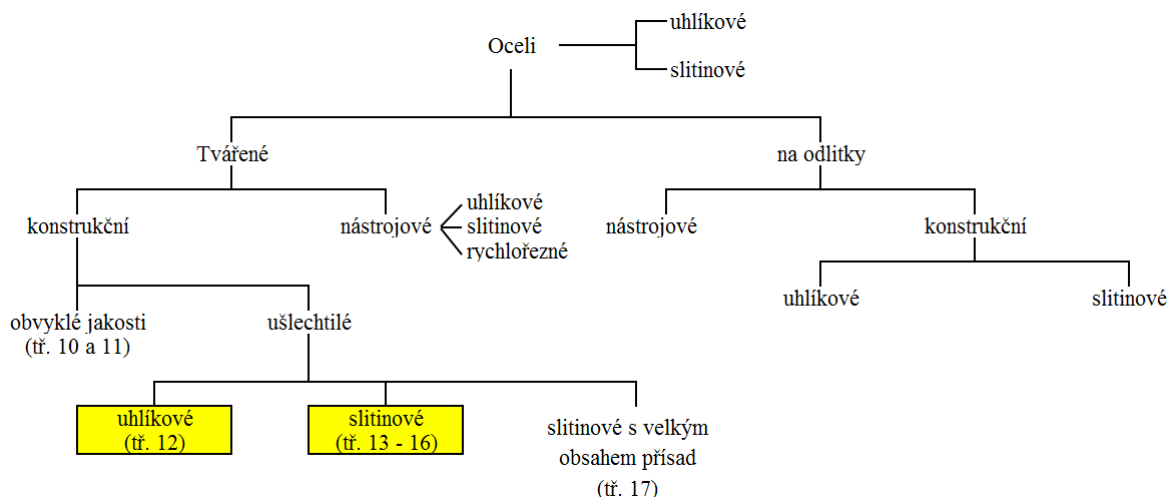
Prvním podkladem pro volbu vhodného konstrukčního materiálu na určitou součást, pokud nepracuje za zvláštních podmínek (koroze, opotřebení atd.), je velikost a druh mechanického namáhání a z něj plynoucí požadavek na mechanické vlastnosti materiálu. [12]

Pružný prvek musí být schopný přenášet značné pružné deformace, většinou při cyklickém, a často rázovém namáhání, aniž se mění závislost mezi zatěžující silou a deformací (charakteristika pružiny) a aniž dojde k porušení. Hlavním požadavkem na materiál je co nejvyšší mez pevnosti při vysoké houževnatosti. [12]

V současné době jsou pružné prvky používané u osobních automobilů vyráběny převážně z oceli. Se zvyšující se přísností emisních norem pro automobilový průmysl, musí automobily ubírat hmotnost, kde se dá. To je důsledkem, že například tradiční ocelové vinuté pružiny jsou nahrazovány pružinami kompozitními využívající plast.

3.1 Výroba z oceli

Oceli rozdělujeme podle chemického složení na uhlíkové a slitinové a dále podle způsobu výroby a charakteristického použití, jak je uvedeno přehledně na (Obr. 27). [13]

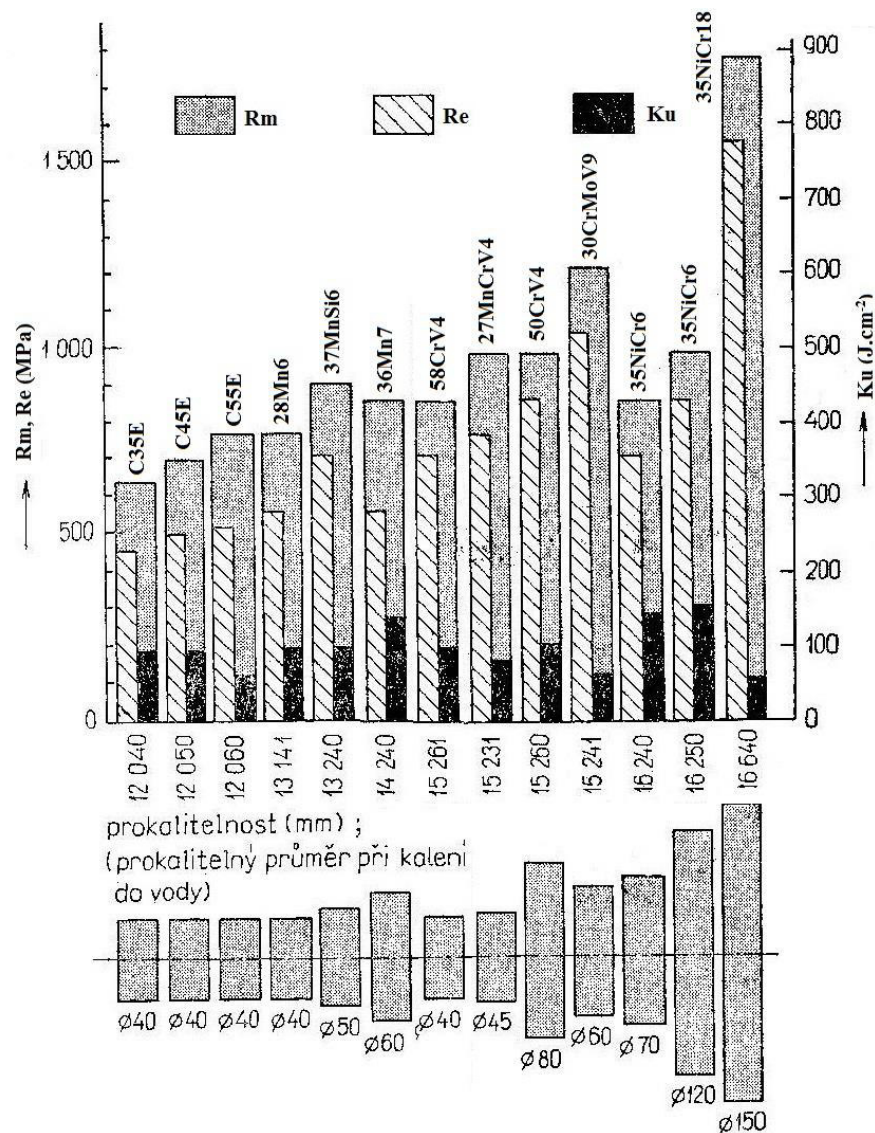


Obr. 27 Rozdělení ocelí [13]

Pro výrobu pružných prvků se zaměříme na ušlechtilé konstrukční oceli. Ušlechtilé oceli mají ve srovnání s ocelí obvyklé jakosti lepší a stejnoměrnější vlastnosti, vyšší čistotu a zaručené chemické složení. Kromě ušlechtilých uhlíkových ocelí (třída 12) obsahuje tato skupina konstrukční oceli slitinové (třída 13 až 16) s celkovým obsahem legujících prvků

nejvýše okolo 6 %. Do konstrukčních slitinových ocelí patří i oceli třídy 17, obsahující většinou nad 10 % legujících prvků (oceli se zvláštními vlastnostmi). [12]

Konstrukční legované oceli jsou vždy dražší než uhlíkové, a proto je nutné používat je pouze v zušlechtném stavu, kdy mají větší poměr meze kluzu, pevnosti a maximální houževnatosti (Obr. 28). [14]



Obr. 28 Hlavní mechanické vlastnosti a prokalitelný průměr [12]

Z obrázku vyplývá, že při stejném obsahu uhlíku a stejné celkové úrovni legování (např. pro obsah uhlíku 0,4 % a celkový obsah přísad 2 % - tj. oceli 13 240, 14 240, 15 240, 16 240) vznikají nepodstatné rozdíly v pevnosti a houževnatosti. Oceli se však značně liší mezi kluzu a prokalitelným průměrem. Právě tyto charakteristiky musí být hlavním vodítkem pro volbu oceli k zušlechťování. [12]

3.1.1 Vliv chemického složení a čistoty materiálu

K legování konstrukčních ocelí se běžně používají křemík, mangan, chrom, nikl, vanad, wolfram, molybden, méně často kobalt, titan, niob, tantal, měď, dusík, olovo, zirkon nebo bór. Kombinací těchto legujících prvků při různém obsahu uhlíku získáme velké množství ocelí s nejrůznějšími vlastnostmi při normálních, snížených i zvýšených teplotách. [14]

Zatímco modul pružnosti závisí zejména na druhu základního kovu, tak ostatní základní charakteristiky lze podstatně ovlivnit i malou změnou chemického složení materiálu. Všimneme si vlivu některých legujících prvků na základní mechanické charakteristiky ocelí. [15]

- *Uhlík* – zvyšuje pevnost a tvrdost, avšak snižuje hodnoty charakteristik houževnatosti a tvárnosti.
- *Mangan* – zvyšuje mez kluzu i pevnost, do 2 hm. % nedochází ke snížení hodnot charakteristik tvárnosti.
- *Křemík* – zvyšuje výrazně tvrdost a pevnost, zhoršuje houževnatost a tvárnost. Leguje se do maximálního obsah 2 %.
- *Chrom* – příznivě ovlivňuje všechny mechanické vlastnosti.
- *Nikl* – poněkud zvyšuje pevnost, výrazně zvyšuje houževnatost, zvláště za snížených teplot.
- *Wolfram a molybden* – zvyšují pevnost a tvrdost ocelí, zvláště za zvýšených teplot. Při popouštění dochází k sekundární tvrdosti a k potlačení popouštěcí křehkosti.
- *Vanad* – zvyšuje pevnost a tvrdost, zejména za vyšších teplot.

3.1.2 Oceli pro výrobu pružných prvků

Hlavními parametry při výběru jsou nejenom vysoké základní mechanické vlastnosti, tj. vysoká pružnost a mez kluzu (aby nedocházelo při namáhání k plastické deformaci), ale také vysoká mez únavy (zatěžování střídavým namáháním) a dobrá tažnost, aby nepraskaly při stlačení a byly schopny tlumit špičky napětí vznikající při provozu. [16]

Vysokých mechanických vlastností dosahují oceli tepelným zpracováním nebo tvářením za studena. Tryskáním se zvyšuje mez únavy. Pro výrobu pružných prvků se používá uhlíkových ocelí tř. 12 i nízkolegované oceli tř. 13, 14 a 15. Při výrobě pružných prvků je důleži-

tý nízký obsah vměstků, které působí jako vruby. Je nutné zabránit oduhličení materiálu, kdy dochází ke snížení meze únavy. [14]

Oceli vhodné k zušlechťování a jejich chemické složení je znázorněné v (Tab. 1).

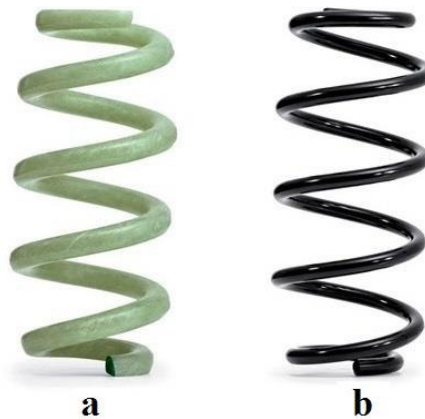
Tab. 1 Chemické složení některých ušlechtilých konstrukčních ocelí k zušlechťování [12]

Označení oceli ČSN	Označení oceli DIN	Chemické složení [%]					
		C	Mn	Si	Cr	V (Mo)	Ni
12 040	C35	0,32	0,50	0,17	max.	—	max.
		0,40	0,80	0,37	0,25	—	0,30
12 090	CK 85	0,80	0,20	0,10	—	—	—
		0,90	0,60	0,30	—	—	—
13 141	28Mn6	0,27	1,20	1,17	—	—	—
		0,35	1,60	1,37	—	—	—
13 240	37MnSi5	0,33	1,10	1,10	—	—	—
		0,40	1,40	1,40	—	—	—
13 270	65Si7	0,58	0,65	1,50	max.	—	max.
		0,68	0,90	1,90	0,30	—	0,40
14 240	36Mn7	0,32	1,50	0,11	0,20	—	—
		0,40	1,90	0,37	0,40	—	—
14 260	54SiCr6	0,50	0,50	1,30	0,50	—	max.
		0,60	0,80	1,50	0,70	—	0,40
15 241	30CrMoV9	0,35	0,60	max.	1,70	0,10	max.
		0,42	0,75	0,35	2,00	0,20	0,60
15 260	50 CrV 4	0,47	0,70	0,17	0,90	0,10	—
		0,55	1,00	0,37	1,20	0,20	—

3.2 Výroba z kompozitu

Nejdůležitější vlastnosti pružin vyráběných z kompozitu je jejich váha. Oproti tradiční ocelové vinuté pružině je sice mohutnější, ale je lehčí (Obr. 29). Vinuté pružiny z kompozitu vyráběné automobilkou Audi jsou o 40 % lehčí než ocelové, hmotnost pružiny klesne z 2,7 kg na 1,6 kg, a tedy na celém voze automobilka uspoří až 4,5 kg. Zvýší se tím dynamika jízdy a zlepšuje se komfort odpružení. [17]

Pružiny jsou vyrobeny z kompozitu vyztuženy skelnými vlákny. Jádrem pružiny jsou dlouhá vzájemně stočená skelná vlákna impregnovaná epoxidovou pryskyřicí. V dalším výrobním kroku jsou kolem této jen několik milimetrů tlusté „duše“ strojově navíjena další vlákna střídavě pod úhlem $+45^\circ$ a -45° k podélné ose. Jednotlivé vrstvy se při stačování i roztahování vzájemně dokonale doplňují, takže mohou optimálně pohlcovat působící síly. V poslední fázi výroby je polotovár vytvrzen v peci při teplotách více než 100°C [17]



Obr. 29 Pružina automobilky Audi; a – kompozitní; b – ocelová [17]

Pružiny v kompozitu vyztuženého skelnými vlákny lze precizně nastavit pro příslušné použití a jejich materiál nabízí vynikající vlastnosti. Nepodléhá korozi, ani po dopadech odletujících kamenů, a je odolný vůči chemikáliím, jakou jsou prostředky pro čištění kol. V neposlední řadě vyžaduje výroba mnohem méně energie než u ocelových pružin. [18]

3.2.1 Základní charakteristiky kompozitu

Kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně rozdílných složek (fází). Tvrdší, tužší a pevnější složka se nazývá *výztuž*, spojitá a poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá *matrice*. [19]

Hlavním úlohou matrice je vzájemně spojovat vyztužující fázi a přenášet do ní zatížení. Matrice také chrání výztuž před vlivy okolí. Funkci pojiva si matrice udrží i po prvních deformacích výztuže. [3]

3.2.2 Vláknové kompozity

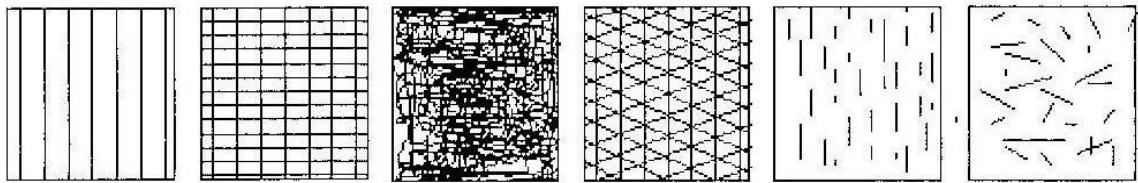
Při dělení vyházáme jednak z materiálu vláken, jednak z materiálu matrice. Vlákna mohou být *skleněná, uhlíková, polymerní, keramická a kovová*. Matrice může být *polymerní, kovová, keramická, uhlíková, skleněná a sklokeramická*. Vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě (Tab. 2). [3]

Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, protože přirozené defekty se také zmenšují. Tahová pevnost vlákna závisí také na jeho délce. Části vzniklé porušením vlákna mají větší pevnost než původní vlákno, protože k lomu vlákna došlo v místě největšího defektu. [3]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti vláken a kompaktních materiálů [3]

Materiál	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]
Skleněné vlákno typu E	72	2 100 až 3 500
Sklovina E	72	100
Uhlíkové vlákno	190 až 850	2 000 až 7 000
Polykrystalický grafit	10	20
Keramické vlákno SiC	400	3 900
Monolitický SiC	410	500
Polyethylenové vlákno z UHMW PE	80 až 120	3 000

Vláknová výztuž může být v matrici orientována jednoose (jednosměrně), dvouose, víceose v rovině, prostorově (třidimenzionální výztuž) a nahodile v rovině. Také krátká (diskontinuální) vlákna a whiskery mohou být orientovány přednostně nebo nahodile. Příklady uspořádání vláknové výztuže v rovině (Obr. 30). [3]



Obr. 30 Příklady rovinného uspořádání vláken [3]

Výhoda vláknových kompozitů je to, že negativní mechanické vlastnosti složek se u výsledného materiálu neprojeví. Kompozit dosahuje lepších vlastností, než by odpovídalo z vlastností složek. Jedná se o tzv. *synergetický efekt* (synergismus = spolupůsobení několika složek vedoucí k zesílení účinku). Poruchy vláken a matrice mohou být častější a přesto nevedou ke katastrofálnímu lomu. Křehká trhlinka v matrici se totiž po interakci s vláknem šíří přednostně podél rozhraní matrice/vlákno. [20]

3.2.3 Charakteristiky vláken pro kompozity s polymerní matricí

Příklady hlavních typů vláken pro polymerní kompozity jsou uvedeny v (

Tab. 3). Použité zkratky a termíny jsou mezinárodní: [3]

- *E sklovina* je tvořena směsí oxidů SiO_2 (54 %), Al_2O_3 (14 %), CaO (20 %), a B_2O (10 %). Používají se většinou s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi a vinyllestery.

- *S sklovina* je pevnější a má i mírně větší modul pružnosti. Obsahuje zvýšený podíl SiO_2 (65 %), Al_2O_3 (25 %) a též MgO (10 %). Jsou určena pro dynamicky namáhané kompozity s epoxidovými matricemi (letecký průmysl), jsou opatřena povlakem speciální epoxidové pryskyřice.
- *Standartní uhlíková vlákna* jsou vyráběna z polymerního prekurzoru, polyakrylonitrilového (PAN) vlákna jeho stabilizací (teploty 200 – 280 °C v oxidačním prostředí) a karbonizací (při teplotě 900 až 1 200 °C v inertním prostředí). Jsou křehčí než vlákna skleněná. Pro zvýšení odolnosti vláken proti vzájemnému poškozování a pro lepší soudržnost se uhlíková vlákna povrchově upravují.
- *IM* je zkratka středně modulová uhlíková vlákna („Intermediate Modulus“) vyráběná také z PAN, jejichž předností je největší pevnost ze všech kontinuálních vláken. V epoxidové matrici mají velmi vysokou odolnost proti poškozování při dynamické únavě.
- *HM* je zkratka pro vysokomodulová uhlíkové vlákno („High Modulus“) vyráběné z mezofázofázové smoly, která obsahuje tekuté krystaly, tvořené paralelně uspořádanými aromatickými vrstvami. Zvlákněním smoly, stabilizací vláken v oxidačním prostředí (350 °C), karbonizací (1 000 až 2 000 °C v inertním prostředí) a dloužením při grafítizaci (2 000 až 2 900 °C v inertním prostředí) se dosahuje modulu pružnosti E až 950 GPa.
- *PPTA* je polymerní vlákno z aromatického polyamidu - polyparafenyletereftalamiidu. Nejznámější je kevlar. Vysoké tuhosti a pevnosti vlákna je dosaženo téměř dokonalou orientací tuhých lineárních makromolekul v podélném směru vlákna. V příčném směru jsou srovnatelné s vlastností obyčejného polyamidu.
- *UHMW PE vlákno* je vyrobeno z ultravysokomolekulárního („Ultra High Molecular Weight“) polyethylenu. Dosahuje vysoké tuhosti a pevnosti pomocí dosažení téměř dokonalé orientace tuhých lineárních makromolekul v podélném směru vlákna.

Tab. 3 Vlastnosti vláken pro kompozity s polymerní matricí [3]

Vlákno	E sklo	S sklo uhlíkové vlákno	Standard- ní vlákno	IM uhlík. vlákno	HM uhlík	PPTA	UHMW PE
Hustota [kg.m ⁻³]	2 540	2 490	1 800	1 800	2 000	1 440	970
Průměr [mm]	5 – 25	5 – 15	6 – 10	6 – 10	10	12	13 – 15
Modul E [GPa]	75	85	230	290	517	124	120
Pevnost [GPa]	2,4	4,5	3,6	5,0	2,1	3	2,6
Cena [Kč.kg ⁻¹]	70	250	1 400	3 000	7 000	2 500	2 200
Pracovní teplota [°C]	250	250	Vzduch 500	Vzduch 500	Vzduch 500	300	80

3.2.4 Vláknové kompozity s polymerními matricemi

Reaktoplasty mají při teplotě 20 °C pevnost v tahu 20 až 80 MPa a modul pružnosti E v rozmezí 2 až 5,2 GPa. Při výběru vhodné polymerní matrice rozhodují požadované mechanické vlastnosti kompozitu a jeho tepelná či mechanická odolnost, eventuálně další vlastnosti. Přehled reaktoplastů používaných při výrobě kompozitů (Tab. 4). [3]

Tab. 4 Přehled reaktoplastů používaných jako matrice vláknových kompozitů [3]

Pryskyřice	Reaktivní ředidlo	Vlastnosti	Pracovní teplota [°C]	Určení, aplikace
Orthoftalová nenasycená polyesterová	ano	Nejlevnější, krátká doba vytvřování	70	Běžné výrobky, sanitární zboží
Vinylesterová (z bisfenolu A)	ano	Dobrá chemická odolnost, houževnaté, krátká doba vytvřování	100	Pro chemický průmysl
Třífunkční epoxidová	ne	Dobrá tepelná odolnost, větší odolnost proti vlhkosti, vytvřování při zvýšené teplotě	190	Letecký průmysl
Polyimidová	ne	Nejlepší tepelná odolnost	320	Letecký průmysl, odolnost, houževnatá

4 METODY HODNOCENÍ VÝSTUPNÍCH PARAMETRŮ PROCESU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

Jednou z cest, která umožňuje lepší využití kovových materiálů, je hlubší poznání jejich vlastností a chování ve složitých podmínkách namáhání. Rozvoj vědy si vynucuje stále vyšší nároky na vlastnosti konstrukčních materiálů. Tyto stále rostoucí požadavky na zlepšené a nové vlastnosti kovových materiálů musí být splněné při zaručené bezpečnosti, spolehlivosti a živostnosti vyráběných součástí, strojů a konstrukcí. [18]

4.1 Zkouška tahem

Tato zkouška je předepsána normou ČSN 42 0310 a jedná se o jednu z nejdůležitějších zkoušek. Vlivem působení tahového namáhání dochází k deformaci zkušební tyče, u které dochází k prodloužení až do přetržení. Výstupem z této zkoušky, jsou napětěvé a deformační charakteristiky, tj. pevnost v tahu, mez kluzu, tažnost a kontrakce. Dále lze určit i modul pružnosti, mez úměrnosti a smluvní mez pružnosti. [21]

Zkušební postup spočívá v upnutí zkušební tyče do čelistí zkušebního stroje tak, aby byla shodná s osou čelistí stroje. Tyč se začne plynule zatěžovat rostoucí silou F , tyč se deformuje a při určitém tahovém napětí dojde k deformaci. Tyč se prodlužuje z počáteční délky L_0 na konečnou délku L_u , kdy dojde k přetržení a počáteční plocha příčného průřezu S_0 se přitom zmenší na konečnou plochu S_u . Působící síla F se vztahuje na jednotku plochy a nazývá se napětí R (jedná se o napětí normálové). V průběhu zkoušky lze stanovit napětí jako podíl zatížení F a plochy původního průřezu S_0 . [21]

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

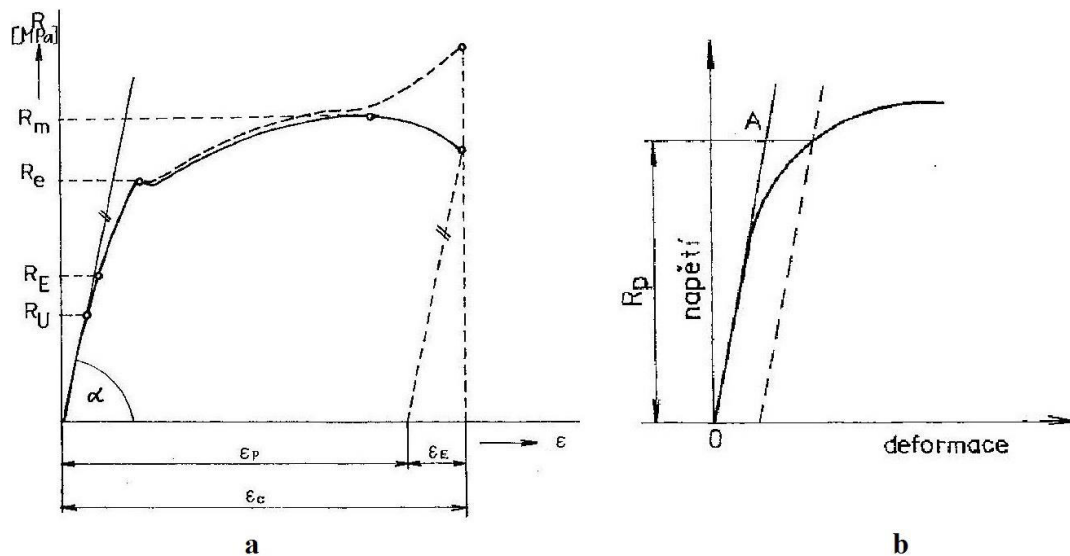
Absolutní prodloužení zkušební tyče po přetržení.

$$\Delta L = L_u - L_0 \quad [\text{mm}]$$

To lze vyjádřit též jako poměrné prodloužení.

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [-]$$

Z těchto vztahů lze vyjádřit závislost $(F - \Delta L)$, které zároveň odpovídá závislosti $(R - \varepsilon)$ a ta se nazývá smluvní nebo pracovní diagram zkoušky tahem (Obr. 31a). [21]



Obr. 31 Pracovní diagram zkoušky tahem; a – u měkkých uhlíkových ocelí; b – s výraznou mezí kluzu [21]

Začátek diagramu přísluší pružné deformaci, má přímkový průběh a vyjadřuje napětí a deformace podle Hookova zákona: [21]

$$R = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}]$$

kde E je modul pružnosti v tahu. Hodnota, do které platí Hookův zákon se nazývá mez úměrnosti (R_u), po této hodnotě se křivka odchyluje od přímkového průběhu a deformace roste rychleji. Pokud však zrušíme vnější tahové síly, tak se zkušební tyč zkrátí na původní délku, tj. pružná deformace. Tato pružná deformace se předpokládá až do mezní hodnoty napětí, označované jako mez pružnosti (R_E), tj. mezní napětí, které po odlehčení nezanechává trvalé deformace. [21]

U materiálů (u měkkých uhlíkových ocelí) můžeme zaregistrovat rychlejší průběh prodlužování, který se objevuje na počátku oblasti plastické deformace. Tato část diagramu je označována mezí kluzu R_e . Je to tedy nejmenší napětí, při kterém dochází k podstatné deformaci, aniž by docházelo ke zvyšování napětí. Tento charakteristický úsek se na diagramu zkoušky nemusí vůbec objevit (u kovů s výraznou mezí kluzu), a proto se tato hodnota zjišťuje jako smluvní mez kluzu R_p (Obr. 31b). Stanovení smluvní meze kluzu se provádí buď grafickou metodou z tahového diagramu, nebo pomocí průtahoměru během zatěžování. Hodnota trvalé deformace zkušební tyče se uvádí v označení např. $R_{p0,2}$. Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ je tedy mezní napětí, které způsobí trvalou deformaci 0,2 % původní měřené délky L_0 . [21]

S dalším růstem napětí nad mez kluzu se zkušební tyč plasticky deformuje po celé délce až do okamžiku, kdy tahová síla dosáhne nejvyšší hodnoty před přetržením zkušební tyče. Z tohoto maximálního zatížení se stanovuje pevnost v tahu R_m : [21]

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}]$$

Po překročení maximální hodnoty zatížení materiálu, klesá křivka tahového digramu až do okamžiku přetržení. Deformace, která byla až do meze pevnosti rovnoměrná po celé délce zatěžované tyče, se nakonec soustřeďuje do jednoho místa, dochází k zmenšení průřezu tyče a na zkušební tyči vznikne krček. Zátěžná síla začíná klesat, i když se skutečné napětí v tyči vztažené na plochu skutečného průřezu zvyšuje. Tyč se přetrhne v místě nejmenšího průřezu. U materiálů, které vykazují charakteristické zúžení tyče (krček), neodpovídá pevnost v tahu R_m skutečnému maximálnímu napětí, neboť se síla vztahuje na počáteční průřez S_0 . Proto diagram získaný z trhacího stroje je diagram smluvní. Průběh skutečných napětí, odpovídajících měnícímu se průřezu, je na (Obr. 31a) vyznačen čárkovanou čarou. [21]

Po přetržení tyče lze z poměrného prodloužení vypočítat tažnost materiálu A , která je měřítkem tvárnosti: [21]

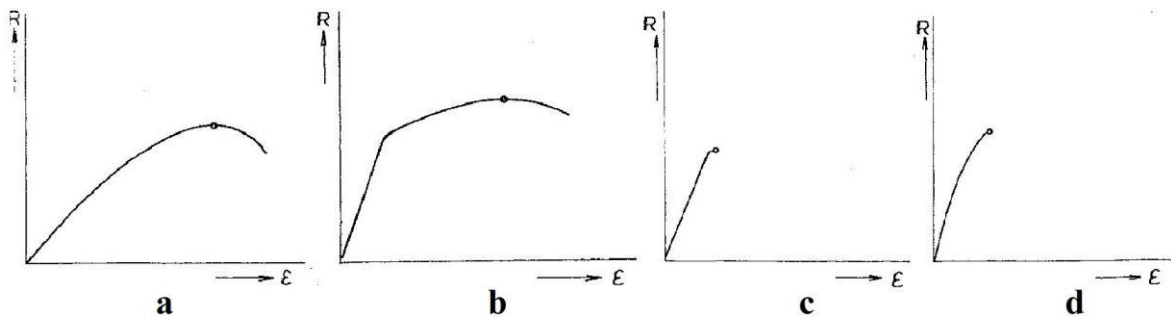
$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad [\%]$$

Další charakteristikou tvárnosti je kontrakce Z . Určuje se ze změny průřezu zkušební tyče před zkouškou a po zkoušce: [21]

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100 \quad [\%]$$

Tvar pracovního diagramu tahové zkoušky závisí na druhu materiálu. Diagram na (Obr. 32a) je charakteristický pro většinu tvárných kovů, jako měď, železo a slitiny lehkých kovů. Tvar na (Obr. 32b), který má zpočátku přímkový průběh, je typický pro uhlíkové oceli po zušlechtnění a slitiny lehkých kovů po vytvrzení. Diagram na (Obr. 32c) je podobný typu a) i b), má však jen malé protažení a po dosažení maximální hodnoty napětí se tyč přetrhne. Tento typ diagramu vykazuje křehký materiál, jako např. šedá i bílá litina. U těchto materiálů nastává při zkoušce pouze pružná deformace. Tvrdé zakalené oceli mají

pracovní diagram s počáteční přímkovou částí, na niž navazuje mírné zakřivení (Obr. 32d). [21]



Obr. 32 Pracovní digramy tahové zkoušky dle druhu materiálu [21]

4.2 Zkoušky tvrdosti

Tvrдость je mechanická vlastnost materiálu vyjádřená odporem materiálu proti deformacím jeho povrchu vyvolaný působením geometricky definovaného tělesa. [18]

V principu existují dva způsoby měření tvrdosti. První způsob, používaný u kovu a keramiky, kdy je indentor zamáčknut do materiálu tak, aby došlo k plastické (trvalé) deformaci materiálu, tj. metoda vnikající (indentační). Druhý způsob měření tvrdosti je založen na principu elastické interakce povrchu materiálu a zkušebního tělíska a v současné době se používá většinou pro hodnocení pryží a plasty, tj. metoda odrazová. [22]

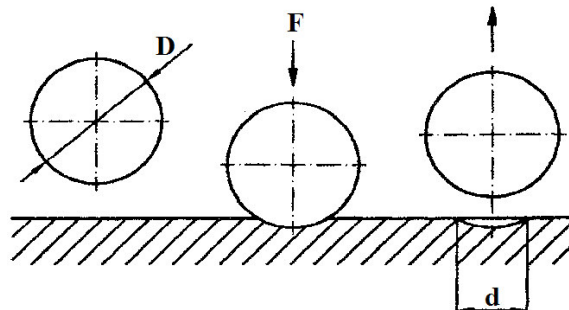
Při vyhodnocování zpracovaných vzorků používáme zkoušky vnikající a z tohoto důvodu se na tyto metody níže zaměříme.

4.2.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Podstatou zkoušky tvrdosti podle Brinella je vlačování vyleštěné kalené ocelové kuličky nebo tvrdokovové kuličky daného průměru, určitou silou po stanovenou dobu do zkoušeného materiálu. Výsledkem je vtisk kulového tvaru, který v průmětu zobrazí jako kruh o průměru d (Obr. 33). [23]

Tvrдость podle Brinella se označuje písmeny HBW při použití kuličky tvrdokovové, HBS při použití kuličky ocelové. V praxi se tvrdost nevypočítává, ale pokud není vyhodnocení provedeno na moderních přístrojích automaticky, odečítá se z tabulek, které jsou zpracovány pro různé průměry zkušebních kuliček D , použitá zatížení F a změřené průměry vtis-

ků d . Doba zatížení je u ocelí 10 až 15 s, u neželezných kovů a jejich slitin je doba delší. Průměr indentoru D se volí v závislosti na tloušťce a druhu zkoušeného materiálu. [23]

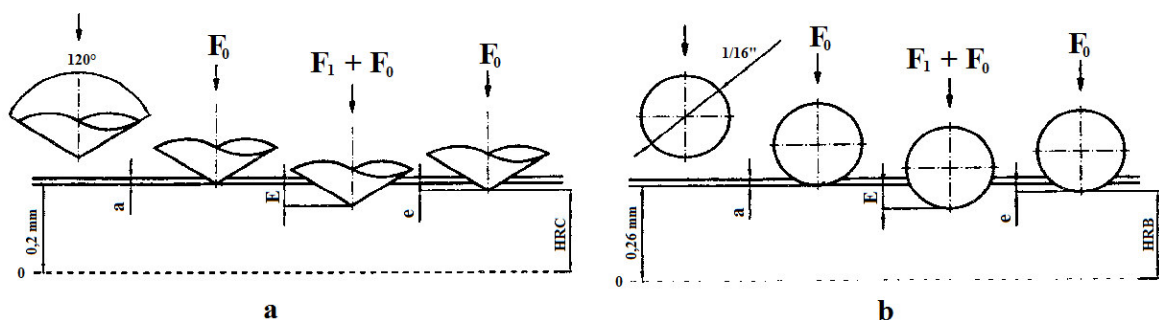


Obr. 33 Zkouška tvrdosti podle Brinella [23]

Zkouška tvrdosti podle Brinella je nejužívanější zkouškou pro měkké a středně tvrdé materiály – do 450 HB. Výhodou Brinellovy zkoušky je zjištění průměrné tvrdosti materiálu z větší plochy, zvláště jestliže je materiál tvořen dvou a více fázovou strukturou o značně rozdílných tvrdostech jednotlivých fází. Nevýhodou je poměrně velký vtisk, který poruše vzhled povrchu. [23]

4.2.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Podstatou zkoušky podle Rockwella je vtláčování diamantového kuželu nebo tvrdokovové, popř. ocelové kuličky do zkoušeného materiálu (Obr. 34). Vrcholový úhel kuželu je 120° (s poloměrem zaoblení vrcholu 0,2 mm), kulička má průměr $1/16''$ (1,5875 mm) nebo $1/8''$ (3,175 mm). [23]



Obr. 34 Zkouška tvrdosti podle Rockwella; a – HRC indentorem je kužel; b – HRB indentorem je kulička [23]

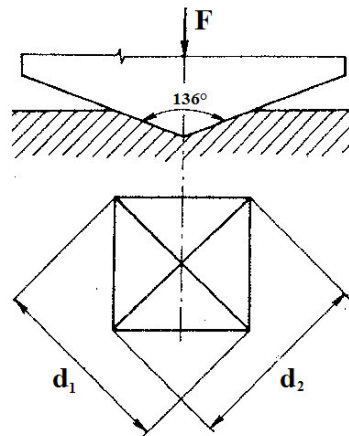
Zkoušení se provádí tak, že se indentor zatíží předběžnou silou F_0 , čímž zaujme polohu v hloubce a od povrchu. Při tomto zatížení se nastaví na stupnici tvrdoměru nulová hodno-

ta. Pak se indenter zatíží po dobu 2 s až 8 s další tzv. přídatnou silou F_1 , která je pro každou stupnici normou určená, takže celkové zatížení indenteru $F=F_0+F_1$. Po odlehčení na původní sílu F_0 se indenter vrátí do polohy, která se bude od polohy a lišit o délku E (Obr. 34ab). Mírou tvrdosti u této zkoušky, je tedy hloubka vtisku indenteru e do zkoušeného materiálu po odstranění přídatného zatížení. [23]

Největší výhodou zkoušky tvrdosti podle Rockwella je její jednoduchost a rychlost, protože hodnota tvrdosti se získává přímým odečtením na stupnici tvrdoměru. Pomocí této zkoušky lze určovat tvrdost jak měkkých, tak i velmi tvrdých materiálů. [23]

4.2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Podstatou zkoušky tvrdosti podle Vickerse je vtlačování diamantového indenteru ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136° do povrchu zkoušeného materiálu stanovenou silou (Obr. 35). Doba působení síly je 10 až 15 s. Vtiskem vznikne čtyřúhelník, jehož tvar se blíží čtverci. [23]



Obr. 35 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [23]

Pro běžné používanou zkoušku tvrdosti se používají zkušební zatížení od 49 do 981 N. Tvrdost při zkušebním zatížení 2 až 30 N se nazývá tvrdost při nízkém zatížení a tvrdost při zatížení 0,1 až 2 N se označuje jako mikrotvrdost. Při měření tvrdosti HV1 se používá zatížení 9,807 N a při měření tvrdosti HV30 zatížení 294,2 N. Tvrdost se při znalosti zatížení F a aritmetického průměru obou uhlopříček d v mm nejrychleji zjišťuje výpočtem podle vztahu. V praxi se číselná hodnota odečítá z tabulek. [23]

Zkoušky tvrdosti podle Vickerse je nejpřesnější užívanou vnikající metodou a je univerzální pro všechny materiály. Výhodou je velmi malý vtisk a tím je i dána možnost změření

tvrdosti pro nejtenčí plechy a pásy jedním indentorem, což je umožněno používání různě velkých zatěžovacích sil. Zkouška tvrdosti podle Vickerse je ze všech metod tvrdosti jediná, která dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích ocelí až po nejtvrďší kalené oceli, přičemž jsou tvrdosti na zatížení prakticky nezávislé. [23]

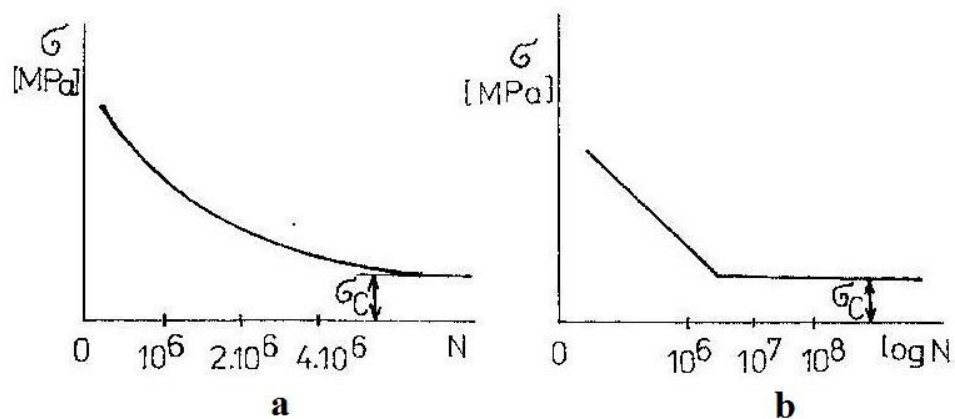
4.3 Zkoušení odolnosti materiálu z hlediska únavy

Zkoušky únavy patří mezi mechanické zkoušky dynamické. Slouží k získání základních podkladů o chování materiálu za působení kmitavého (cyklického) zatěžování. Důležitost zkoušek únavy je dána tím, že velká část konstrukcí je při provozu zatěžována časově proměnlivými silami. Jde při tom zásadě o dynamické zatížení, které většinou působí opakovaně. [21]

Zkoušky únavy patří mezi mechanické zkoušky dynamické. Slouží k získání základních podkladů o chování materiálu za působení kmitavého (cyklického) zatěžování. Důležitost zkoušek únavy je dána tím, že velká část konstrukcí je při provozu zatěžována časově proměnlivými silami. Jde při tom zásadě o dynamické zatížení, které většinou působí opakovaně. [21]

4.3.1 Mez únavy

Kritérium odolnosti materiálu proti opakovanému mechanickému namáhání je mez únavy σ_c , vyjádřené amplitudou (výkmitem) napětí nebo amplitudou deformace, které materiál vydrží teoreticky při nekonečném počtu kmitů (cyklů). V praxi je to napětí, při kterém zkušební tyč vydrží základní počet kmitů N_c pro stanovení meze únavy. [21]



Obr. 36 Wöhlerův diagram; a – lineární stupnice; b – logaritmická [21]

Při určování meze únavy se zjišťují počty kmitů, které při různém napětí postupně klesají a vedou při kmitavém zatížení k lomu. Zjištěné hodnoty počtu kmitů N u každé zkušební tyče se vynesou v diagramu napětí σ – počet kmitů do lomu N , což je tzv. Wöhlerův diagram (Obr. 36). [21]

4.3.2 Kmity napětí

U kmitů napětí se rozlišují tyto charakteristiky (Obr. 37): [21]

T – doba jednoho kmitu (perioda),

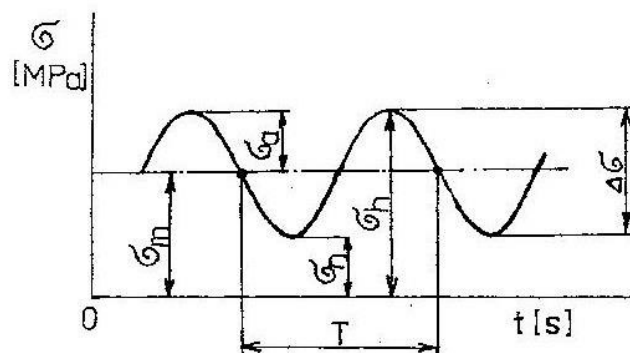
f – kmitočet (frekvence), tj. počet kmitů za jednotku času,

σ_h – horní napětí kmitu,

σ_n – dolní napětí kmitu,

σ_m – střední napětí kmitu,

σ_a – amplituda (výkmit) napětí.



Obr. 37 Kmit napětí [21]

Průběh kmitů může být pravidelný (např. sinusový) nebo nepravidelný. Nepravidelný kmit se opakuje nebo působí náhodně. V praxi je nejčastější náhodné působení, u kterého se zjišťuje kumulativní spektrum zatížení. Podle typu nesouměrnosti kmitu má namáhání charakter střídavý (souměrně či nesouměrně), pulsující (v tahu nebo tlaku) nebo míjivý (v tahu nebo tlaku). [21]

4.3.3 Rozdělení únavy

Podle počtu kmitů je možno kmitavé zatěžování, resp. únavu rozdělit do následujících skupin: [21]

- a) *Opakované statické zatěžování* – životnost do 10^2 kmitů.
- b) *Nízkokmitová (nízkocyklová) únava* – životnost do 10^5 kmitů. Vzniká při opakovaném namáhání nad mezí kluzu v podmínkách, kdy dochází k výrazným opakovaným plastickým deformacím v makroobjemu materiálu. O životnosti součásti rozhoduje rychlost šíření únavové trhliny.
- c) *Vysokokmitová (vysokocyklová) únava* – životnost nad 10^5 kmitů. Vzniká v podmínkách převážně elasticky opakovaných deformacích, napětí je vždy pod mezí kluzu. Pro životnost součásti je důležité, aby byl dlouhý časový úsek, potřebný ke vzniku zárodku únavové trhliny. V okamžiku, kdy trhlina dosáhne kritické velikosti, dojde k náhlému únavovému lomu.

4.3.4 Mechanismus vzniku šíření únavových trhlin

Vznik trhlin

Únavové trhliny jsou iniciované nejčastěji na volném povrchu. Potvrzuje to dobře známý fakt z praxe, že odolnost proti porušení únavou je výrazně ovlivněn stavem a kvalitou povrchu. Povrch je místo změn tvarů a průřezů, ostrých vrubů (závity, drážky, otvory apod.), častých korozních jamek a jiných koncentrátů napětí. Při tepelně a chemicko-tepelně zpracovaných výrobcích i po tváření za tepla vzniká často chemická a strukturní nehomogenita povrchu (oduhličení, nauhličení, oxidace apod.) [18]

Při cyklickém zatěžování se na povrchu kovu vytvářejí malé, velmi tenké výstupky - *extruze*. Současně s extruzemi jsou pozorované i prohlubně do povrchu, jsou to *intruze*. Intruze jsou velmi malé koncentrátoři napětí na povrchu, které mohou během zatěžování dále růst a ve formě únavové trhliny způsobit únavový lom (Obr. 38a). [18]

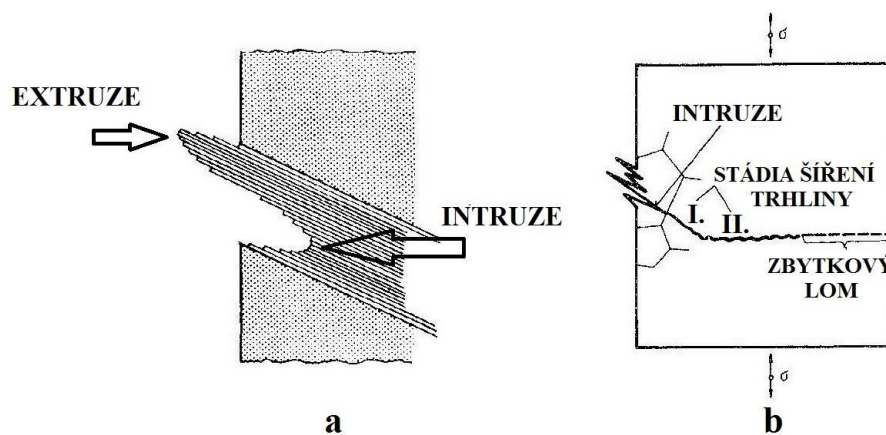
Šíření trhlin

Trhliny, které vznikly v kritickém místě na povrchu ve skluzových pásech, anebo v jiných oblastech s lokalizovanou deformací, např. intruzí apod. (Obr. 38b), se mohou dále šířit ve dvou stádiích. [18]

I. stádium zahrnuje krystalografické šíření trhliny podél aktivních skluzových rovin v mřížce v rovině maximálního smykového napětí, tj. asi pod úhlem 45° ke směru cyklického tahového napětí. S narůstající délkou se trhliny vychylují z aktivních skluzových rovin

a mění směr, stlačují se do směru kolmého na směr tahového napětí. Toto stádium zabírá jen malou část lomové plochy (několik desetin mm), i když může představovat až 90 % - ní podíl celkového počtu cyklů do lomu. [18]

II. stádium je charakterizované nekystalografickým šířením trhliny ve směru kolmém na směr zatížení. Její šíření v tomto stádiu je ovládané normálovým napětím. Trhlinka se šíří zpravidla transkrystalicky. I když růst trhliny v tomto stádiu představuje jen asi 10 % - ní podíl celkového počtu cyklů do lomu, převážná část lomové plochy je tvořená zpravidla růstem trhliny v tomto stádiu. [18]



Obr. 38 Únavová trhlina; a – vznik; b - šíření [18]

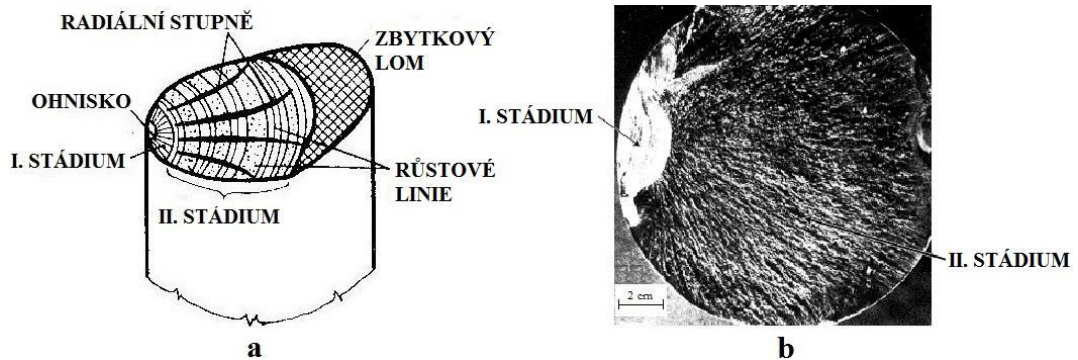
Únavový lom

Posledním stádiem únavového procesu je nestabilní lom, který vzniká v okamžiku, když velikost trhliny a napětí ve zbytkové části průřezu zeslabeného únavovou trhlinou dosáhne kritické hodnoty pro daný materiál. Porušení zbytkové části průřezu probíhá zpravidla rychle, má křehký charakter a uskutečňuje se podle principu lomové mechaniky. Podle mikroskopického vzhledu má povrch únavového lomu tyto typické oblasti: (Obr. 39). [18]

- a) *Únavová oblast*, která je relativně makroskopicky hladká a s charakteristicky viditelnými znaky po šíření trhliny. Jsou to růstové čáry vzniklé žlábkováním, které mohou mít v závislosti na druhu materiálu a podmínkách namáhání různé velikosti a vzdálenosti, a mají obvykle tvar zakřivených čar se středem zakřivení v místě, kde vzniká únavová trhlina. Struktura povrchu únavové oblasti se s růstem vzdálenosti od ohniska postupně zdrsňuje v důsledku změny napjatosti, který souvisí se zmenšováním nosného průřezu při růstu trhliny. Dále se na povrchu únavové části lomu

mohou vyskytovat radiální stupně, které jsou přibližně paralelní se směrem šíření lomu. [18]

- b) *Oblast zbytkového (silového) lomu má výrazně hrubší strukturu a členitý povrch. Jeho vzhled závisí od toho, jakým mechanismem vznikl. Může mít charakter štěpný transkrystalický, interkrystalický anebo vláknitý a může vznikat za podmínek stavu rovinné napjatosti anebo rovinné deformace.* [18]



Obr. 39 Únavový lom; a – makroskopický vzhled [18]; b – fotografie povrchu [5]

4.4 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje (dále jen SMS) představují jednu z nejvýznamnějších inovací v oblasti měření ve strojírenství. Konstrukce souřadnicových měřicích strojů (Obr. 40) byla vynucena potřebou měření karosérií v automobilovém a leteckém průmyslu a potřebou měření při obrábění na CNC strojích. V anglickém překladu se jedná o Coordinate Measuring Machines, nebo-li CMM. [24]

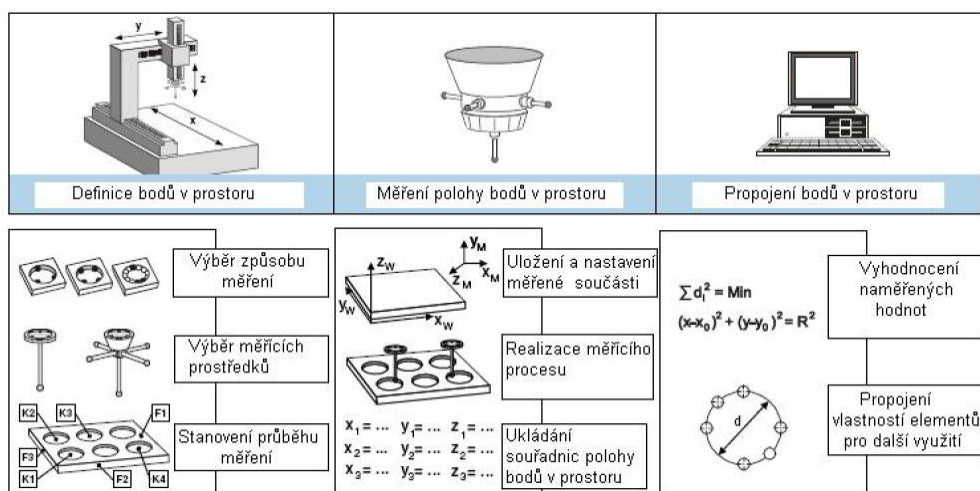


Obr. 40 Souřadnicový měřicí stroj [25]

4.4.1 Základní princip

Proces měření skládá ze tří důležitých částí (Obr. 41). V první části se jedná o definici bodů pro měřicího zařízení v prostoru. Této oblasti se týká výběr vhodného způsobu měření, výběr vhodných měřicích prostředků (sondy a jejich doteky) a nakonec stanovení vhodného průběhu měření, aby měření bylo co nejpřesnější. [26]

Druhá část se týká vlastního zkušební vzorku. V této oblasti dochází k jeho upnutí k měřicímu stolu měřicího zařízení, vlastní realizaci měření jednotlivých bodů na dané součásti a také k ukládání informací pro určení vlastní polohy bodu zkušební vzorku. [26]



Obr. 41 Princip měření pomocí SMS [26]

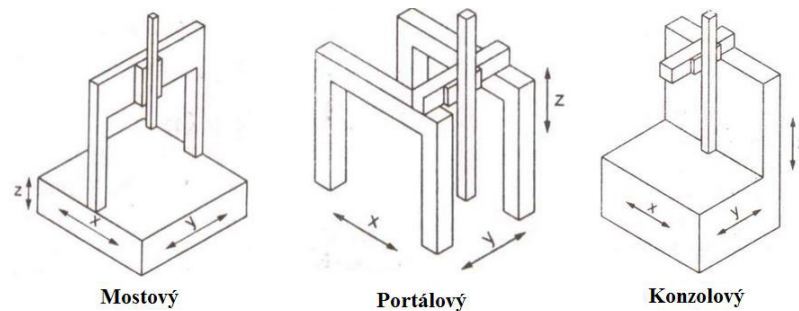
V poslední části se jedná o práci s uloženými informacemi, zejména s jejich interpretací – vyhodnocení naměřených hodnot a další využití získaných informací. Díky těmto informacím lze pak získat informace (přímo nebo přepočtem) o základních vlastnostech měřeného vzorku. [26]

Počítačová technika s využitím matematických závislostí generuje povrch součásti na základě snímaných bodů a zabezpečuje kontrolu obrobku při minimálním počtu těchto bodů. Na základě polohy vybraných bodů se určují průsečíky osy symetrie, vzdálenosti, tvary a vzájemná poloha. [27]

4.4.2 Konstrukční uspořádání

Hlavní typy konstrukcí (Obr. 42) používaných pro stavbu hlavní nosné části celého SMS se dají rozdělit na konstrukce „klasického typu“ (mostové, portálové, konzolové atd.) a na specializované (např. pro měření ozubených kol atd.) Výběr typu konstrukce bude podléhat

požadavkům na měření, tj. kde a jak měření probíhá, rozměry měřených součástí, rozměry místa měření, požadovaná přesnost atd. [26]



Obr. 42 Hlavní typy konstrukcí SMS [28]

4.4.3 Měřicí sondy a doteky

Používají se sondy (Obr. 43) na principu změny magnetické indukce, odporu nebo optickém principu (při interakci doteku s měřeným vzorkem dojde k vychýlení světelného nebo laserového paprsku v soustavě zrcadel, které zaznamenává optické čidlo a informaci o této změně předává dál). Mohou být též sondy tenzometrické. Celá tato skupina se řadí mezi *spínací dotykové sondy*. Tyto sondy měří nespojitě body a jsou ideální pro kontrolu trojrozměrných prizmatických dílů a známých geometrických tvarů. [26]



Obr. 43 Sondy s doteky na měření [29]

Další možností jsou *skenovací sondy*. Jedná se o miniaturní měřicí stroje, které každou sekundu snímají stovku bodů na povrchu a umožňují tak určení přesného tvaru, velikosti i polohy. Lze je také použít ke snímání nespojitých bodů. [26]

Existuje několik druhů doteků, lišících se dle konstrukce a vhodnosti pro dané aplikace. Jedná se zejména o doteky přímé, hvězdicové, bodové, s dutou kulovou plochou, válcové, diskové a další. Na konci doteků je použita většinou průmyslově vyrobená rubínová kulička. [26]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části diplomové práce je zaměřením se na proces tepelného zpracování, který je nezbytnou součástí výrobního postupu u vysoce-namáhaných pružných prvků a jeho následné optimalizace a intenzifikace.

Prvním cílem je zvýšení produktivity výroby na kalící lince. Při analýze současného stavu nastavení a možnostech kalící linky, bylo nalezeno úzké místo tepelného zpracování, které brání zvýšení produktivity na lince. Jsou to popouštěcí pece, resp. časy popouštění. Bude použito experimentu, při kterém se pro daný typ materiálu bude snižovat čas popouštění na minimum tak, aby bylo dosaženo obdobných vlastností materiálu, požadavků zákazníka a zároveň zvýšení produktivity na kalící lince.

Druhým cílem je zpracování neshodného materiálu pro výrobu pružných prvků, který je dodáván externí firmou. Při standardním výrobním procesu tohoto neshodného materiálu dochází k předčasnému únavovému lomu pružných prvků (k jejich praskání), než je požadováno zákazníkem a tím pružný prvek ztrácí svoji funkci. Při tomto experimentu budou nastaveny různé parametry tepelného zpracování tak, aby materiálu byly navráceny vyhovující vlastnosti a dodrženy požadavky zákazníka.

Dále vyhodnotíme vliv tepelného zpracování na tvarové změny dílů. Porovnáme tvar pružných prvků před a po tepelném zpracování při různých parametrech zpracování. Výsledkem tohoto měření bude možnost předpovědět, jak se tvar pružných prvků chová během tepelného zpracování a jaký to má vliv na operaci, která následuje bezprostředně po tepelném zpracování, tj. rovnání.

6 PODMÍNKY EXPERIMENTŮ

Popsání podmínek experimentů jsou nezbytnou součástí praktické části diplomové práce. Jedná se o vstupní parametry, které jsou důležité při navrhování experimentů a porovnávání výsledků s jinými experimenty zaměřené na tepelné zpracování materiálu. Práce se zabývá procesem tepelného zpracování materiálu při výrobě pružných prvků, tedy podmínkami experimentu je, kde se tepelné zpracování provádí, jaký materiál se při tomto procesu používá a typ pružného prvku vybraný pro tento účel.

6.1 Typ pružného prvku

Pro všechny experimenty je vybrán jeden typ pružného prvku, který je dále uveden jako vzorový projekt. Jedná se o pružný prvek, který se používá na přední nápravě osobních automobilů (Obr. 44), vyrábí se z trubkového polotovaru o průměru 22,5 mm, tloušťce stěny 3,7 mm a jeho hmotnost činí 3,14 kg.



Obr. 44 Charakteristický tvar pružného prvku

Trubkový polotovar má délku 1410 mm a pro dosažení požadovaného tvaru se ohýbá za studena na ohýbacím stroji DKB. Po operaci ohýbání je tvar pružného prvku kontrolován na speciálním měřicím přípravku nazývaným “lehra“, takto zpracovaný a zkontrolovaný díl je připravený na operaci tepelného zpracování.

6.2 Použitý materiál

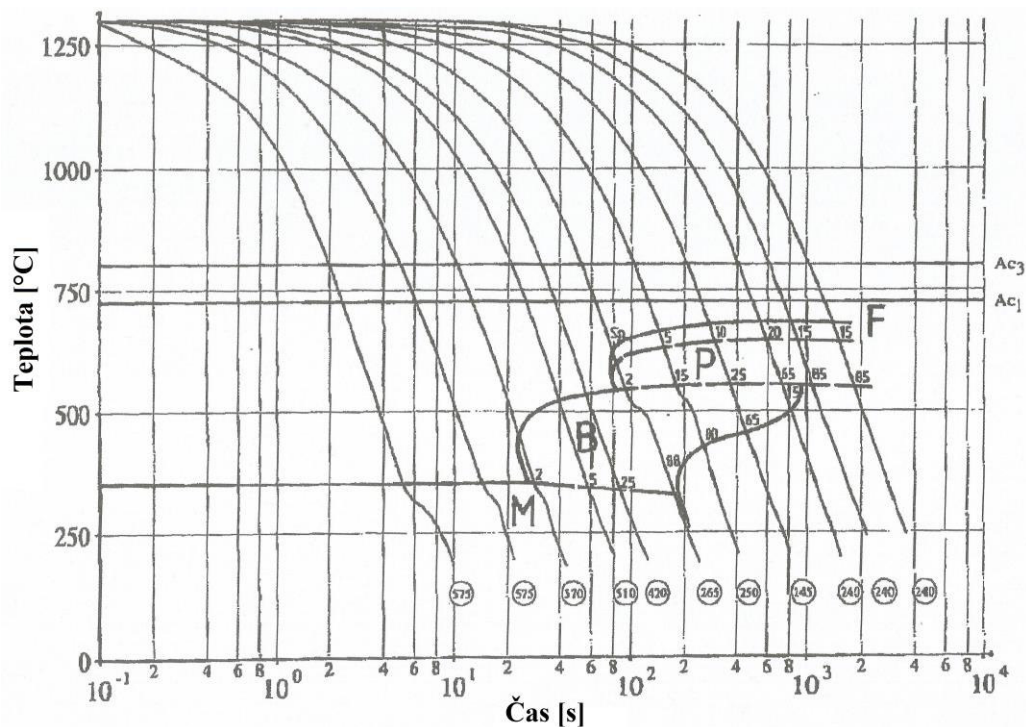
Při výrobě tohoto typu pružných prvků je použit materiál (typ A), který se používá u většiny součástí používaných u zavěšení a podvozku automobilu. Z důvodu, aby nedošlo ke zneužití výsledků této diplomové práce, není uvedeno označení a chemické složení materiálu. Materiál je dodáván v podobě bezešvých trubek tažených za studena, vyráběných

z nízkolegované uhlíkové oceli, se zaručeným chemickým složením a mechanickými vlastnostmi (Tab. 5).

Tab. 5 Mechanické vlastnosti použitého materiálu

Mechanické vlastnosti		
R _m [N/mm ²]	R _{p0,2} [N/mm ²]	A5 [%]
400 - 700	250 - 500	≥ 20

Materiál je určený k tepelnému zpracování. K procesu kalení je dostupný diagram ARA (Obr. 45), který nám udává doby přeměny austenitu při různých rychlostech ochlazování, spolu s dosažitelnými tvrdostmi pro jednotlivé ochlazovací křivky.



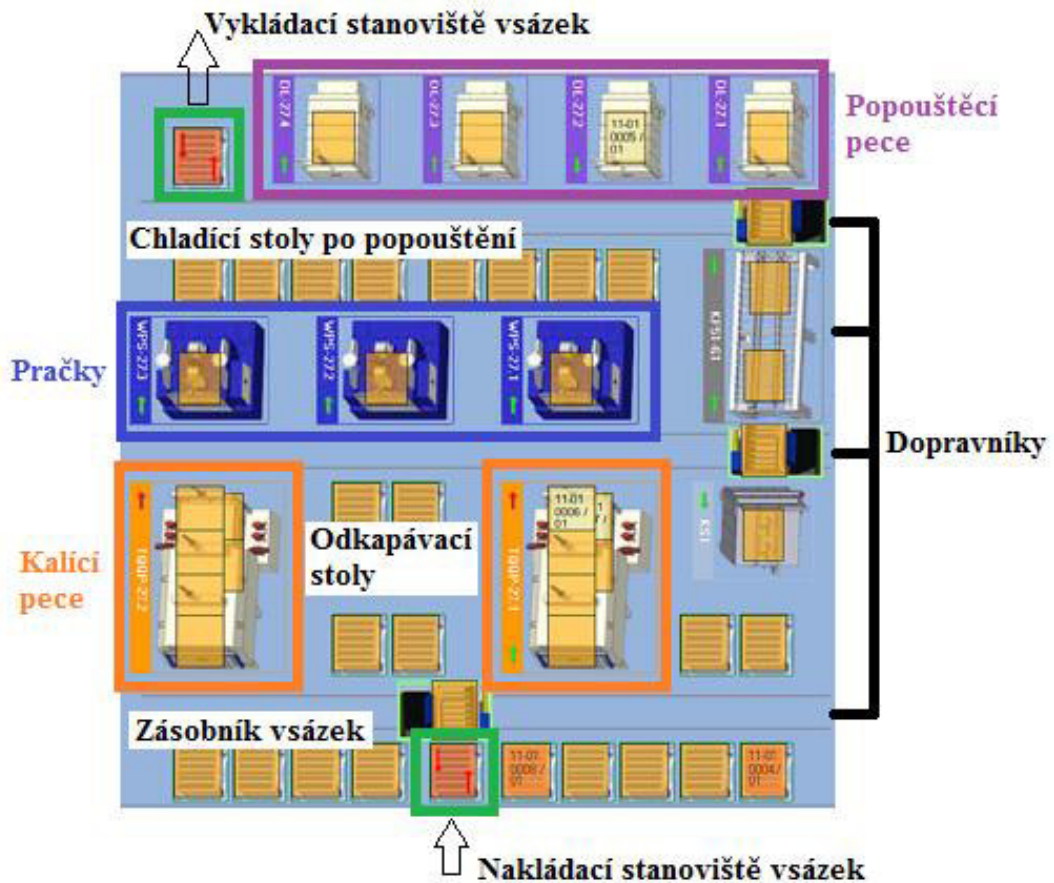
Obr. 45 Diagram ARA pro materiál typu A

6.3 Kalící linka

Proces tepelného zpracování se provádí na kalící lince od společnosti IPSEN International GmbH, která se skládá z několika zařízení a dopravníků (Obr. 46). Kalící linka se rozkládá na ploše 900 m², kdy její rozměry jsou 30 m na šířku a 30 m na délku. Hlavní zařízení, které ovlivní výsledné vlastnosti materiálu je kalící pece s generátory endoplynu a popouštěcí pece, tyto zařízení budou níže detailně popsány. Další zařízení používané na lince jsou

odkapávací stoly, pračky na mytí zbytků oleje, chladicí stoly a dopravníky pro manipulaci s jednotlivými vsázkami.

Maximální rozměry vsázky umístěné na kalici linky jsou 1520 x 1220 x 910 mm (D x Š x V) a hmotnost 1300 kg. Procesní nastavení jednotlivých zařízení je řízeno pomocí softwaru Carb-o-Prof. Pohyb jednotlivých vsázek na lince je ovládán přes software AutoMag, jehož úkolem je řídit pohyb vsázek tak, aby docházelo k co nejefektivnějšímu využití linky.



Obr. 46 Schéma kalicí linky s jednotlivými zařízeními [32]

6.3.1 Kalicí pec a generátor endoplynu

Kalicí pec

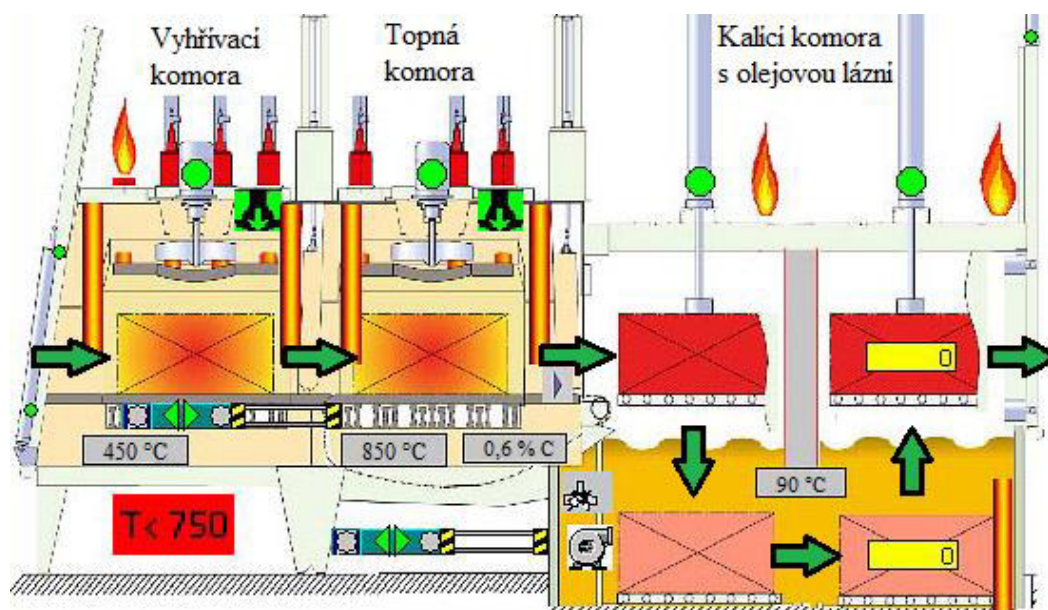
Jedná se o víceúčelovou komorovou pec, která pracuje na průchodovém principu, kde zpracování a přeprava vsázek probíhá v zařízení automaticky. Zařízení je koncipováno a určeno pro tepelné zpracování vsázek. Postup zpracování se provádí kompletně za použití ochranného plynu (endoplynu), čímž se během procesu zabrání nadměrného oduhličení nebo nauhličení materiálu. Druh vytápění je proveden pomocí plynem vytápěných sála-

vých trubek. Teplota v peci je kontrolována pomocí termočlánků umístěných v boční stěně předkomory a topné komory. Obsah uhlíku v atmosféře je řízen pomocí sondy. Hlavní technická specifikace je popsána v Tab. 6.

Tab. 6 Hlavní technické údaje kalící pece [33]

Pracovní teplota	Min. 750 °C Max. 1000 °C
Druh kalení	Olej
Množství plnění olejové kalící nádrže	cca 13 500 litrů
Regulační ohřev olejové lázně	20 – 150 °C
Ohřev	Plyn
Postup zaplynování	Zemní plyn + vzduch Propan
Výkon	149 kVA

Těleso kalící pece (Obr. 47) se skládá z vyhřívací komory, ve které probíhá přehřev vsázky na teplotu 450 °C. Topné komory, kde dochází k ohřevu na kalící teplotu a výdrži na této teplotě 5 min. V obou těchto komorách pro lepší cirkulaci ochranného plynu a přenos tepla je pod stropem umístěno cirkulační zařízení, čímž je zaručena optimální teplotní rovnoměrnost v rámci celé vsázky.



Obr. 47 Těleso kalící pece [33]

Dále následuje kalící komora, kde se při kalení vsázka na přední plošinu ponoří do olejové lázně. Během druhého kroku se ponořená vsázka předá na zadní plošinu, poté se zadní

plošina nazvedne a vsázka odkapává nad olejovou lázní. Kalící olej o teplotě 90 °C se silně pohybuje pomocí cirkulačního zařízení.

Generátor endoplynu

Generátor endoplynu (Obr. 48) se používá k výrobě endotermního ochranného plynu. Tento ochranný plyn a reakční plyn se používá na mnohé postupy tepelného zpracování. Endotermní ochranný plyn (endoplyn) se vyrábí stechiometrickým spalováním zemního plynu a vzduchu v generátoru. Pomocí připojeného regulačního zařízení se reguluje atmosféra pece přidáním plynu propanu na požadovanou hodnotu hladiny uhlíku. Hlavní technické parametry jsou zapsány v Tab. 7.

Tab. 7 Hlavní technické údaje generátoru endoplynu [34]

Výkon ochranného plynu	20 až 60 m ³ /h endoplynu
Provozní teplota	1000 °C
Ohřev	Plyn
Připojení plynu	Zemní plyn Vzduch
Výkon	6,2 kVA



Obr. 48 Generátory endoplynu

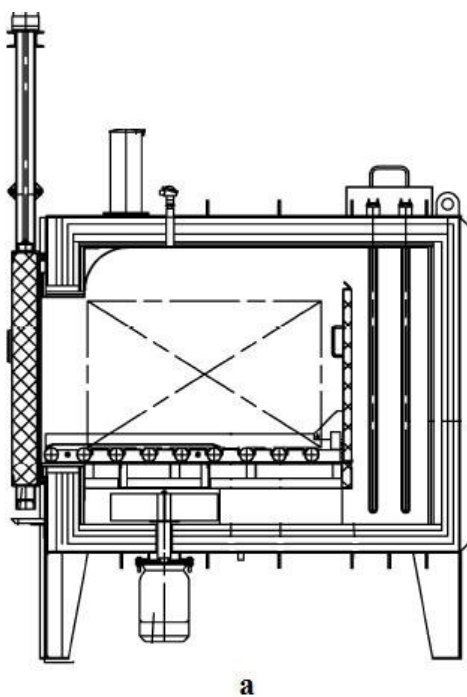
6.3.2 Popouštěcí pec

Jednokomorová popouštěcí pec (Obr. 49) se používá k popouštění pod vzduchovou atmosférou. Ohřev se provádí pomocí plynových hořáků vytápěných plynem. Těleso pece obsa-

huje pouze topnou komoru, kde ke zvýšení cirkulace pecní atmosféry a tím k lepšímu přenosu tepla se používá cirkulační zařízení. Hlavní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Hlavní technické údaje popouštěcí pece [35]

Pracovní teplota	Min. 150 °C Max. 300 °C
Roztápěcí teplota na 200 °C	800 kg/h ocel
Ohřev	Plyn
Výkon	11 kVA



Obr. 49 Popouštěcí pec; a – schéma [35]; b - fotografie

7 OPTIMALIZACE PROCESU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

Proces optimalizace tepelného zpracování je zaměřen na snížení popouštěcích časů na minimum a zpracování neshodného materiálu tak, aby bylo dosaženo vyhovujících vlastností. U obou těchto experimentů bude detailně popsána příprava experimentu, nastavení parametrů tepelného zpracování, výběr vzorků pro získání dat v laboratoři a následné vyhodnocení výsledků.

7.1 Snížení popouštěcích časů na minimum

Při analýze kalící linky bylo zjištěno, že nejužším místem na lince jsou popouštěcí pece, tedy čas popouštění. Cílem tohoto experimentu je tedy snížení popouštěcích časů na minimum tak, abychom zvýšili produktivitu na kalící lince, resp. sladili výrobní takt popouštěcích pecí s kalícími pecemi. Materiál typu A použitý pro tento experiment má výrobní číslo šarže 3592687.

7.1.1 Metodika experimentu

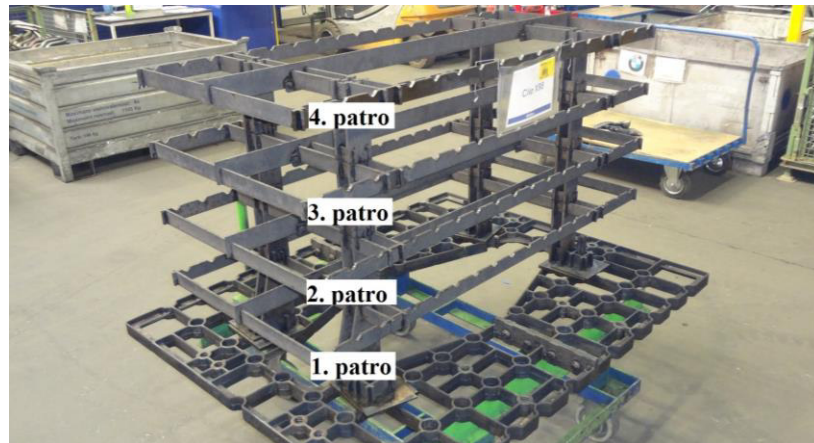
Uložení dílů na gestelle a příprava vsázky na kalící linku

Naohýbané díly jsou připraveny na proces tepelného zpracování (Obr. 50). Díly jsou naskládány na "gestelly" (Obr. 51), tj. speciální stojan, který slouží k přesnému a bezpečnému uložení dílů, aby nedošlo k jejich pádu do kalící pece. Dojde-li k pádu do kalící pece, musí se pec odstavena a následně uvedena do provozu, což trvá v řádu 24 hodin. Většina gestellů je vyrobena z kompozitu, který je tvořen karbonovými vlákny (CFC) a to z důvodů snazší manipulace a maximalizování počtů dílů v peci.



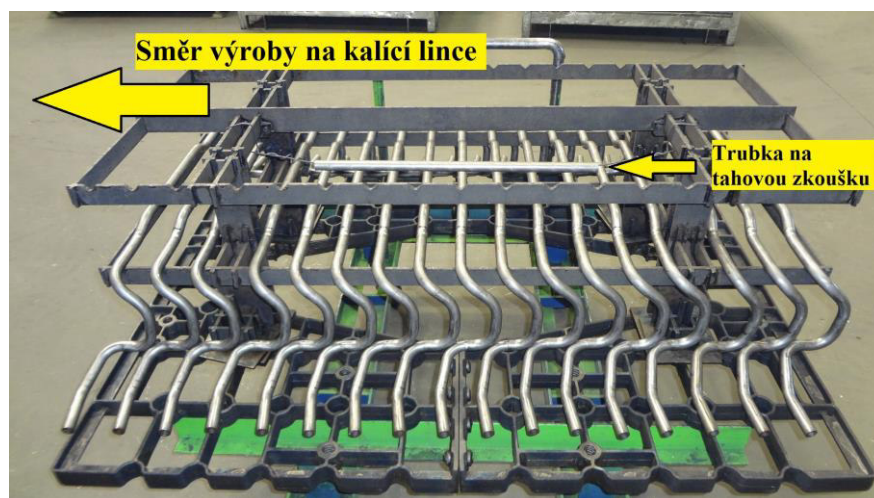
Obr. 50 Tvar dílu po operaci ohýbání

Gestell má celkem 4 patra, na každé patro se příčně umístí 17 dílů, tudíž celkové množství dílů na gestellu je 68. Na 2. až 4. patro je podélně zavěšena trubka o délce 600 mm (celkem 3 tyče), která nám poslouží pro získání mechanických vlastností materiálu z tahové zkoušky (Obr. 52).



Obr. 51 Gestell pro vzorový projekt

Plně naložený gestell je zkontrolován a přepraven na nakládací stanoviště kalící linky, kde obsluha nastaví parametry tepelného zpracování a vsázka je připravena na zpracování v kalící lince.



Obr. 52 Uložení dílů a trubky na tahovou zkoušku na gestell

Nastavení procesu tepelného zpracování

Pro provedení experimentu jsou nachystány 3 vsázky. Pro každou vsázku jsou nastaveny jiné parametry tepelného zpracování vzhledem ke snížení popouštěcích časů, které jsou

přehledně uvedeny v Tab. 9. Pro sériovou výrobu jsou popouštěcí parametry nastaveny na teplotu 280 °C a výdrž na této teplotě 40 min., tj. 280 °C / 40 min.

Tab. 9 Parametry tepelného zpracování – snížení popouštěcích časů

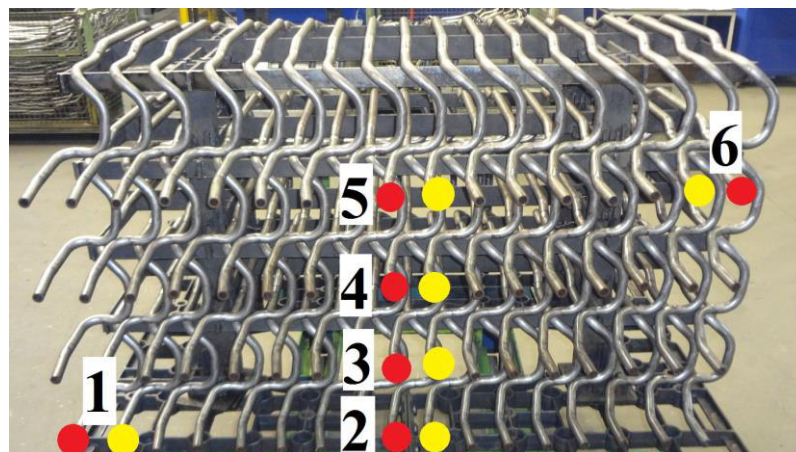
Vsázka č.	Kalící pec		Popouštěcí pec
	Teplota kalení / výdrž na této teplotě [°C/min]	Obsah uhlíku v atmosféře [% C]	Teplota popouštění / výdrž na této teplotě [°C/min]
1	850 / 5	0,6	280 / 35
2			280 / 30
3			280 / 25

Vsázka prochází linkou těmito operacemi:

- Kalící pec – zakalení vsázky v olejové lázni při teplotě 90 °C.
- Pračka – odstranění zbytků oleje po dobu 40 min při teplotě 75 °C.
- Popouštěcí pec – popouštění dílů.
- Chladicí stůl – vychladnutí vsázky po dobu 20 min.
- Vykládací stanoviště – odvezení vsázky a uložení dílů do přepravních boxů.

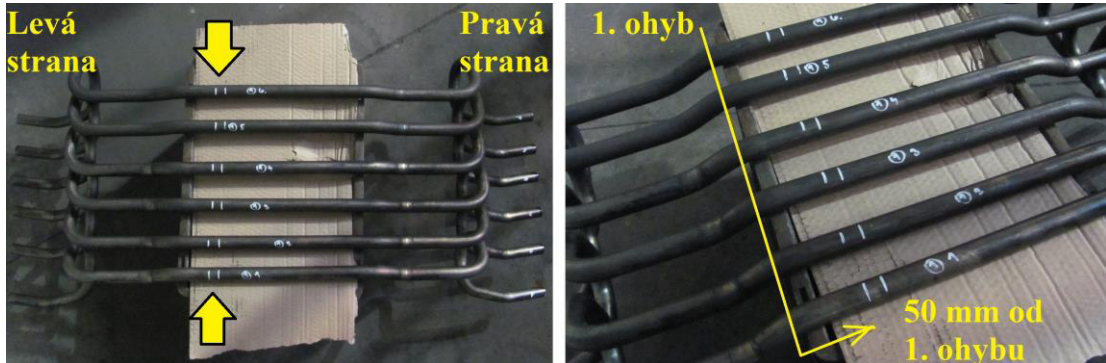
Výběr dílů pro laboratoř a pro dokončení ve výrobě

Pro získání informací o chování materiálu při různých teplotách popouštění, je nutné z gestellu odebrat tepelně zpracované díly. Z každé vsázky se odebere 6 dílů určených pro laboratoř a dalších 6 dílů, které je zpracovány v sériové výrobě. Díly jsou odebrány dle pozice na gestellu s označením 1-6 (Obr. 53).



Obr. 53 Odebrané díly z gestellu

U dílů určených pro laboratoř (červené) se na vyznačeném místě vyřízne pomocí metalografické pily vzorek, jehož šířka je 20 mm (Obr. 54). U všech experimentů prováděných v této diplomové práci je toto místo totožné, abychom docílili zpřesněných výsledků.



Obr. 54 Místo vyřezání vzorků pro laboratoř

Tyto vzorky jsou v laboratoři broušeny, leštěny, leptány a následně je na nich provedena metalografická analýza. Provádí se měření průběhu tvrdosti od vnějšího k vnitřnímu průměru, vyhodnocení nauhličení na vnějším průměru, oduhličení na vnitřním průměru a výsledné struktury materiálu.

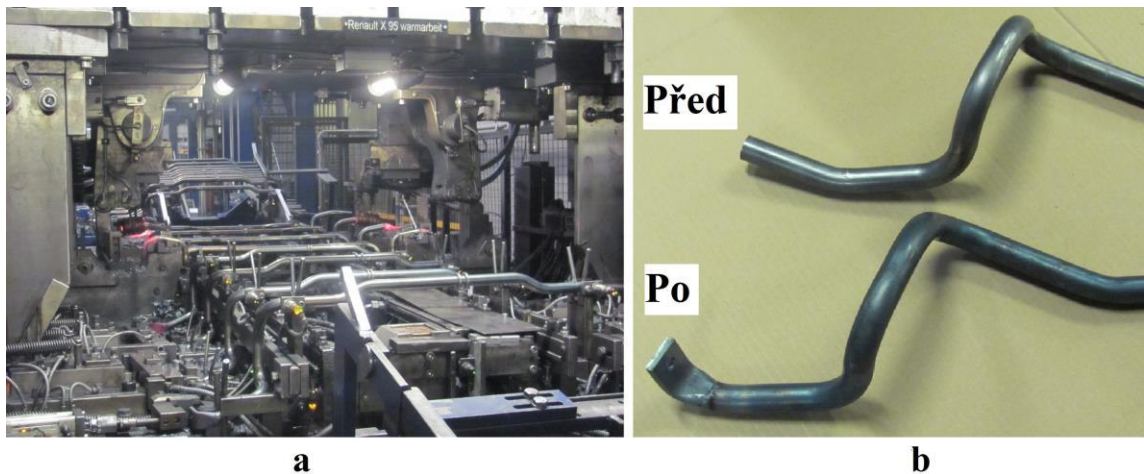
Díly určené pro dokončení (žluté) jsou dále zpracovány v sériové výrobě, tj. rovnány, jsou jim tvářeny konce a tryskány na vnějším povrchu. Na takto zpracovaných dílech je následně provedena zkouška kmitáním, která nám určí životnost jednotlivých dílů.

Při tepelném zpracování dochází ke tvarovým změnám dílů, aby byl tvar pružného prvku dodržen, je do výroby zařazen proces rovnání. Při tomto procesu musí pružný prvek volně zapadnout do rovnací lehry (Obr. 55a), pokud se tak nestane, obsluha pomocí rovnacího lisu upraví jeho tvar tak, aby mohl volně zapadnout (Obr. 55b).



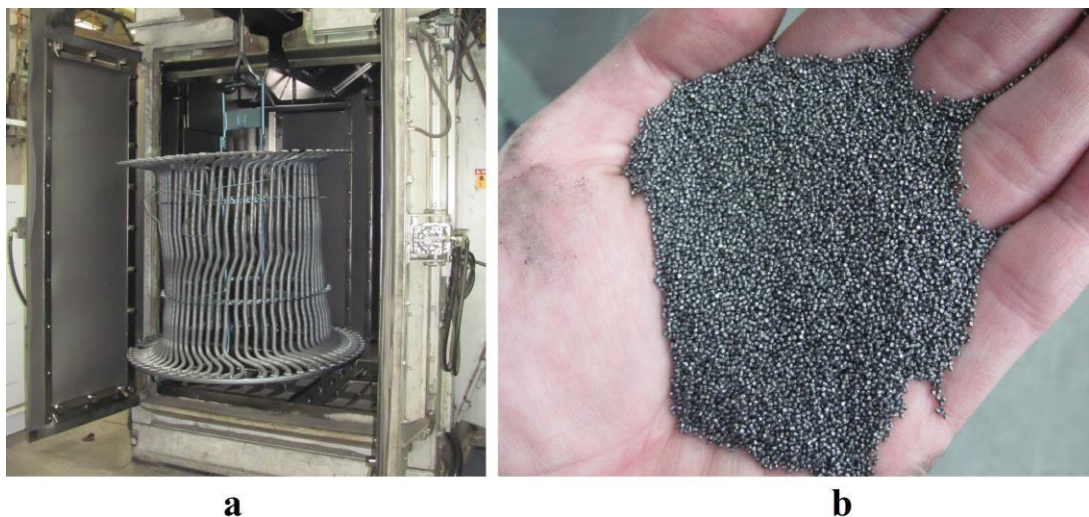
Obr. 55 Proces rovnání; a – rovnací lehry; b – rovnání pomocí lisu

Další operací je tváření konců pružných prvků (kap. 1.3.5). Operace se provádí na lisovací stroji (Obr. 56a), díl je založen do zásobníku a pomocí ohřevu, tváření, děrování a stříhání jsou jeho konce zpracovány do požadovaného tvaru (Obr. 56b). Tvar pružného prvku se spolu s tvářenými konci kontroluje v lehre. Další kontrolou je rovinnost, rovnoběžnost a také tloušťka funkčních ploch tvářených konců.



Obr. 56 Tváření konců; a – lisovací stroj; b – tvar před a po tváření

Následuje operace vnějšího tryskání (kap. 1.3.4), která má za následek zvýšení životnosti pružných prvků. Díly jsou zavěšeny na rotační tryskací závěs tak, aby docházelo k optimálnímu zasažení vysoce-namáhaných oblastí pružného prvku tryskacím zrnem (Obr. 57a).



Obr. 57 Vnější tryskání; a – zavěšení dílů; b – tryskací zrno

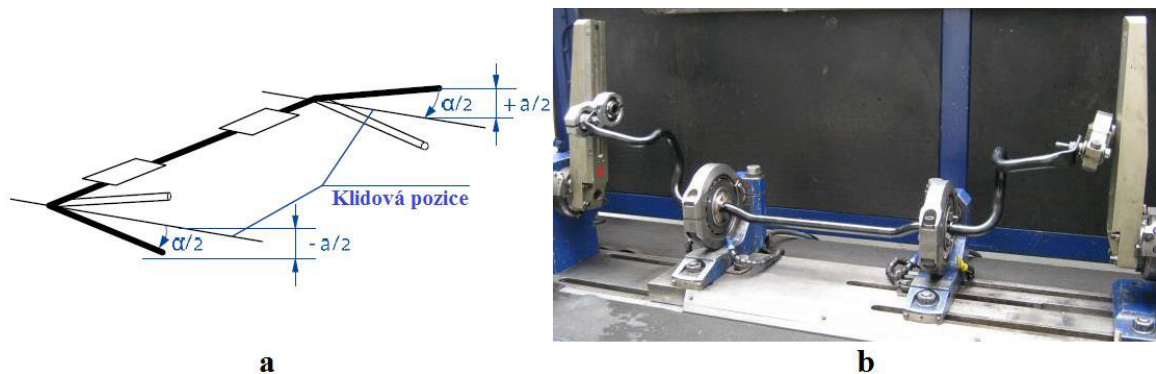
Tryskací závěs je dopraven do tryskacího stroje, kde je povrch dílu bombardován po dobu 5 min částičky nasekaného drátu (tryskací zrno), které má tvrdost 640 HV a rozměr 0,8

mm (Obr. 57b). Rozdíl povrchu před a po tryskání je výrazný, povrch je zmatnělý, očištěný a hrubý (Obr. 58).



Obr. 58 Vzhled povrchu před a po tryskání

Po výše popsaných operacích ve výrobě následuje zkouška kmitáním (kap. 0). Je to test, který je prováděn za specifikovaných podmínek, kdy jsou ramena dílu zatěžována z jeho klidové polohy v opačné fázi (Obr. 59).



Obr. 59 Zkouška kmitáním; a – princip; b – zkušební zařízení [1]

V první fázi zkoušky se díl kmitá při maximální zatížení do 750 kmitů, v druhé fázi je díl podroben nižšímu zatížení, při kterém se kmitá do 150 000 kmitů. Podmínky zkoušky jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Podmínky zkoušky kmitáním – snížení popouštěcích časů

1. fáze kmitání do 750 kmitů	Úhel natočení ramene $\alpha/2 = 27^\circ$
	Zdvih ramene $a/2 = 49,5 \text{ mm}$
	Frekvence kmitání $f = 17,5 \text{ Hz}$
2. fáze kmitání do 150 000 kmitů	Úhel natočení ramene $\alpha/2 = 19,5^\circ$
	Zdvih ramene $a/2 = 34 \text{ mm}$
	Frekvence kmitání $f = 17,3 \text{ Hz}$

Test se provádí do doby, kdy u dílu dojde k lomu, tj. k jeho prasknutí. Životnost dílu je určena zákazníkem na 150 000 kmitů, je-li životnost nižší, díl je nevyhovující a provede se u něj analýza lomu, tak abychom mohli určit příčinu vzniku (prasknutí vlivem vady v materiálu, nevhodným tepelným zpracováním, nedostatečným tryskáním atd.).

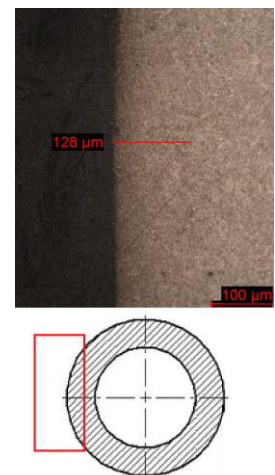
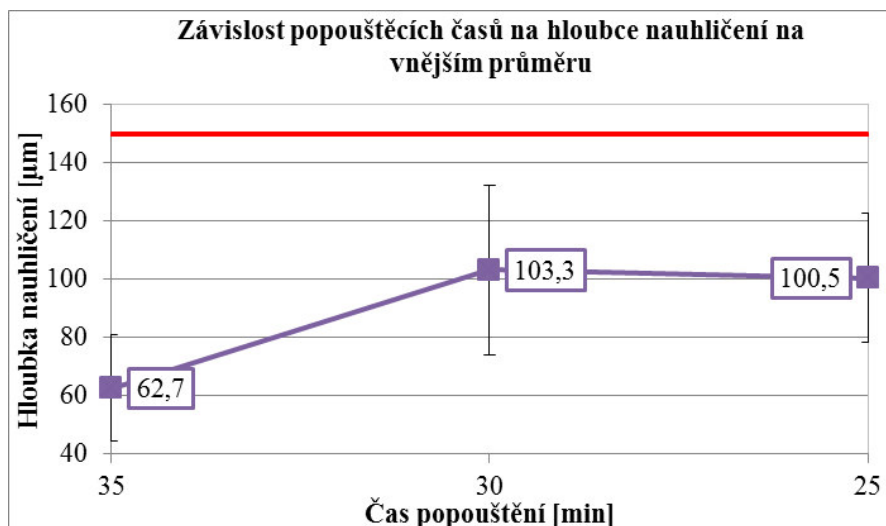
7.1.2 Vyhodnocení výsledků

Hloubka nauhličení na vnějším průměru

Prvním vyhodnocovaným parametrem je hloubka nauhličení materiálu na vnějším průměru dílu. Struktura materiál po tepelném zpracování je tvořena popuštěným martenzitem. Hloubka nauhličení je hodnocena vizuálně na základě zkušeností pracovníků laboratoře a maximální dovolená hloubka nauhličení je 150 μm . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 11 a zobrazeny na Obr. 60. Výsledky nauhličení jsou k dispozici v příloze 1.

Tab. 11 Hloubka nauhličení na vnějším průměru dílu.

Čas popouštění [min]	Hloubka nauhličení na vnějším průměru dílů dle pozice na gestellu [μm]							Průměr \bar{x}	Směr. odchylka s
	1	2	3	4	5	6			
35	38	84	65	83	53	53	62,7	18,3	
30	101	66	117	72	136	128	103,3	29,1	
25	123	128	105	88	72	87	100,5	22,1	



Obr. 60 Hloubka nauhličení na vnějším průměru dílů

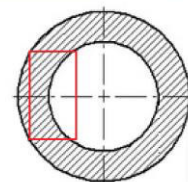
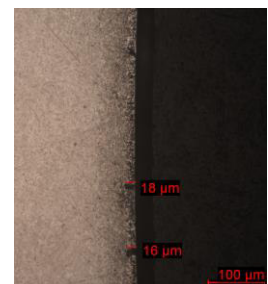
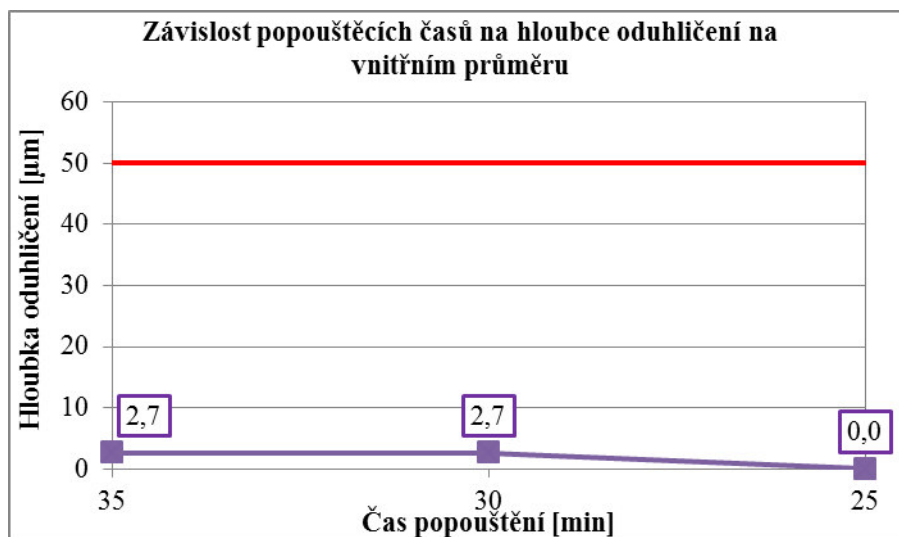
Z grafu vidíme, že vliv času popouštění nemá významný vliv na nauhličení. Hloubka nauhličení je především dána nastavením obsahu uhlíku atmosféry v kalící peci. Dochází k minimálním změnám nauhličení a všechny naměřené hodnoty leží pod hranicí 150 μm , což je pro náš záměr dostačující.

Hloubka oduhličení na vnitřním průměru

Druhým hodnocením materiálu je oduhličení materiálu na vnitřním průměru dílu. Hodnoty těchto parametrů nesmí překročit 50 μm , protože negativně ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu (nižší nebo nerovnoměrná tvrdost povrchu, nižší mez únavy). Naměřené hodnoty jsou znázorněny Tab. 12 a vyobrazeny na Obr. 61. Výsledky oduhličení jsou k dispozici v příloze 1.

Tab. 12 Hloubka oduhličení na vnitřním průměru

Čas popouštění [min]	Hloubka oduhličení na vnitřním průměru dílů dle pozice na gestellu [μm]							
	1	2	3	4	5	6	Průměr \bar{x}	Směr. odchylka s
35	0	0	9	0	7	0	2,7	4,2
30	16	0	0	0	0	0	2,7	6,5
25	0	0	0	0	0	0	0	0



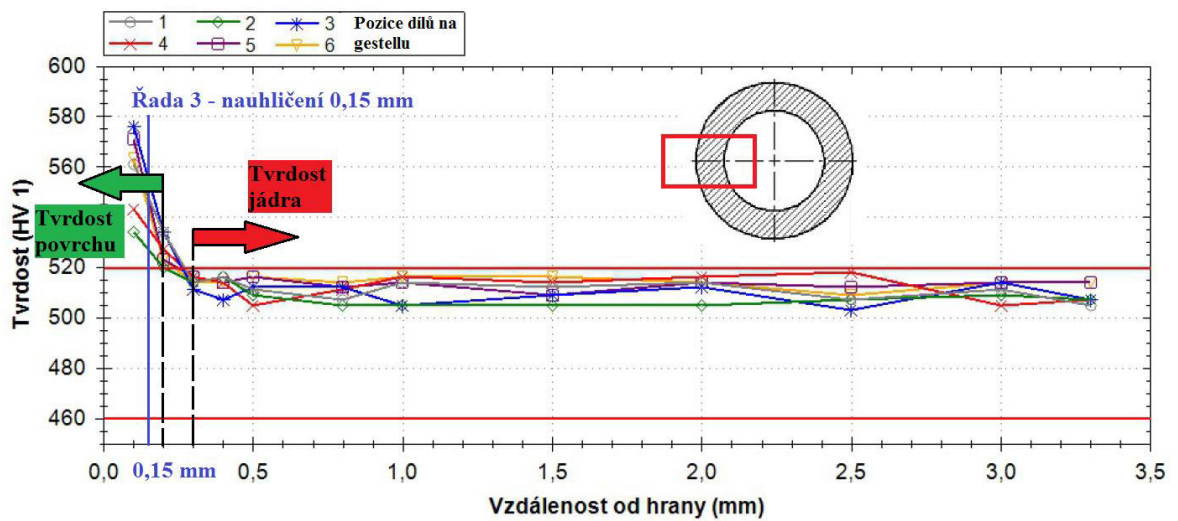
Obr. 61 Hloubka oduhličení na vnitřním průměru dílů

V našem případě během snižování časů popouštění nedochází k výraznému růstu hloubky oduhličení, což je pro nás vyhovující, aby nedocházelo ke zhoršení mechanických vlastností. Objevují se pouze špičky oduhličení, které mohou být způsobeny vadou na povrchu

materiálu. Vliv popouštění je zde minimální, na oduhlíčení má primární vliv teplota kalení a obsah uhlíku atmosféry v kalící peci.

Tvrdość povrchu a jádra dílů

Následuje vyhodnocení tvrdosti, kdy z měření průběhu tvrdosti od vnějšího k vnitřnímu průměru se určí tvrdost na povrchu a v jádře. Tvrdość na povrchu dílu je určena v závislosti na hloubce nauhličení, kde hranice nauhličení už nezasahuje, tak se jedná o tvrdost v jádře. Příklad určení tvrdosti na povrchu a v jádře je znázorněn na Obr. 62.



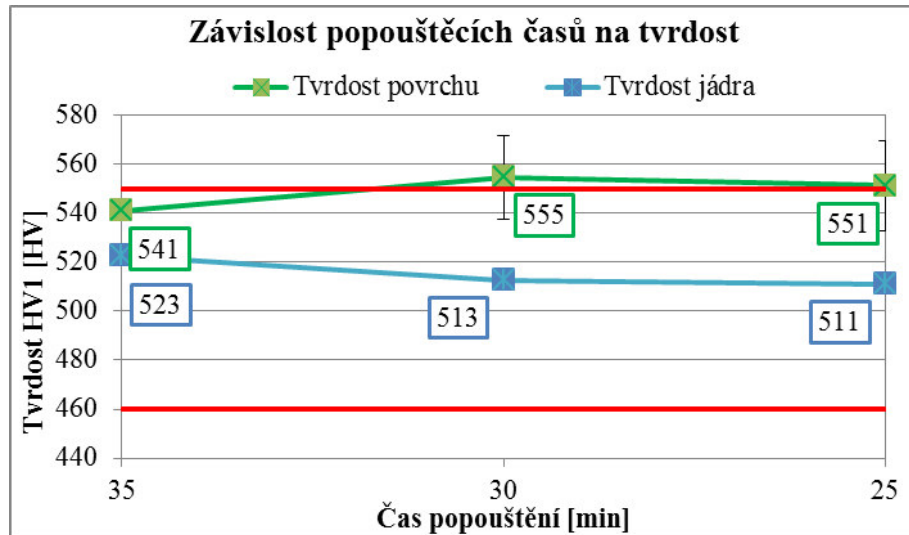
Obr. 62 Příklad určení tvrdosti povrchu a jádra

Průměrné hodnoty tvrdosti povrchu a v jádře v závislosti na poloze dílů na gestellu jsou uvedeny v Tab. 13. Závislost popouštěcích časů na průměrné tvrdosti povrchu a jádra dílů je vyhodnocena na Obr. 63. Výsledky tvrdosti jsou k dispozici v příloze 1.

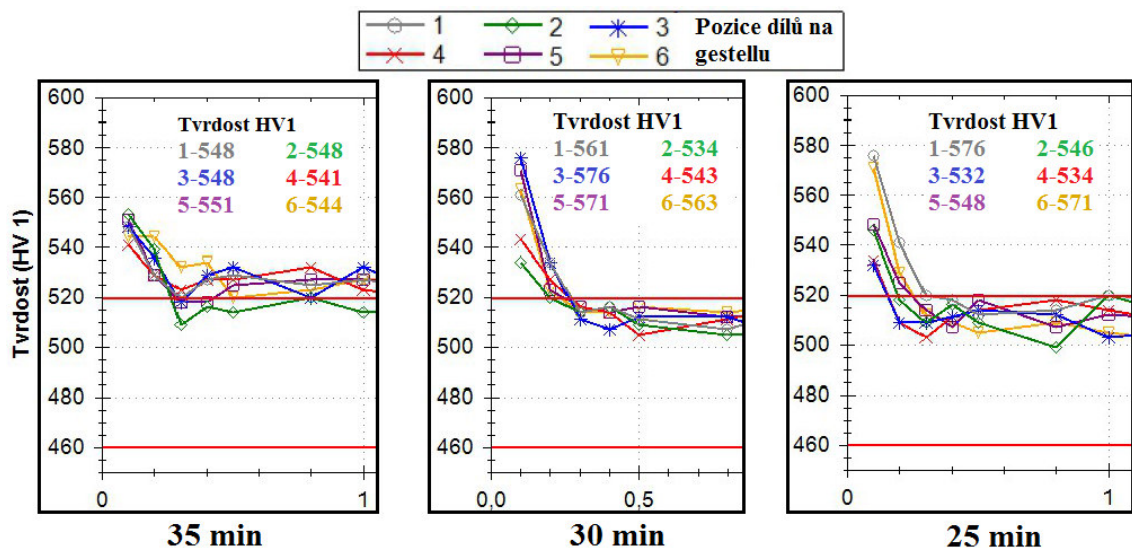
Tab. 13 Tvrdość povrchu a v jádře

Čas popouštění [min]		Tvrdość HV1 dle pozice dílů na gestellu [HV]						Průměr \bar{x}	Směr. odchylka s
		1	2	3	4	5	6		
35	Povrch	539	546	542	535	540	544	540,9	3,95
30		561	534	576	543	571	543	554,7	17,09
25		576	546	532	534	548	571	551,2	18,49
35	Jádro	524	516	523	523	524	527	522,8	3,80
30		513	509	512	514	514	515	512,8	2,09
25		518	509	509	510	513	508	511,1	3,66

Vlivem snížení popouštěcích časů dochází ke zvýšení tvrdosti na povrchu materiálu. Zvýšení tvrdosti na povrchu je zřejmé i při porovnání grafů průběhu tvrdosti při různých časech popouštění (Obr. 64). Hodnoty tvrdosti HV1 jádra leží nad tvrdostí 460 HV a to je vyhovující.



Obr. 63 Tvrdość povrchu a jádra dílů.



Obr. 64 Tvrdość povrchu při různých časech popouštění

Cílem je dosáhnout takových podmínek popouštění, aby byl proces zpracování stabilní, kdy budou díly vykazovat podobné hodnoty tvrdosti s malými odchylkami. Toto je dosaženo pouze při čase popouštění 35 min. Při nižších časech popouštění se ukazuje, že lokální hodnoty tvrdosti na povrchu (0,1 mm od hrany) dosahují až 580 HV1, a to u dílů umístěných na pozici č. 1, 3, 5 a 6.

Interní předpisy uvádějí, že tvrdost na povrchu nesmí být větší než 115 % tvrdosti v jádře, pokud tomu tak není, popouštění je nevyhovující a neúčinné. Výsledky rozdílu mezi tvrdostí na povrchu a jádře je uveden v Tab. 14. Jsou použity průměrné hodnoty z Tab. 13, kde k průměrné hodnotě tvrdosti na povrchu je připočtena směrodatná odchylka a od průměrné hodnoty jádra je směrodatná odchylka odečtena, abychom získali co největší rozdíl.

Tab. 14 Rozdíl mezi tvrdostí povrchu a jádra

Čas popouštění [min]		Prům. tvrdost ± směr. odchylka [HV]	Rozdíl mezi tvrdostí povrchu a jádra [%]
35	Povrch	$540,9 + 3,95 = 544,85$	103,5
	Jádro	$522,8 + 3,80 = 526,6$	
30	Povrch	$554,7 + 17,09 = 571,79$	111,9
	Jádro	$512,8 - 2,09 = 510,71$	
25	Povrch	$551,2 + 18,49 = 569,69$	112,3
	Jádro	$511,1 - 3,66 = 507,44$	

Z výsledků vyplývá, že všechny varianty popouštění jsou z hlediska rozdílu mezi tvrdostmi povrchu a jádra dostačující. Z hlediska stability procesu, hodnot tvrdosti a jejich odchylek je nejvhodnější zpracování při čase popouštění 35 min.

U variant popouštění s nižšími časy jsou odlišné hodnoty tvrdosti na povrchu pravděpodobně zapříčiněné nižší teplotou popouštění nebo krátkou výdrží na této teplotě vzhledem k tomu, na jaké pozici je díl umístěný na gestellu. Tato problematika je níže vyhodnocena v kap. 7.1.3.

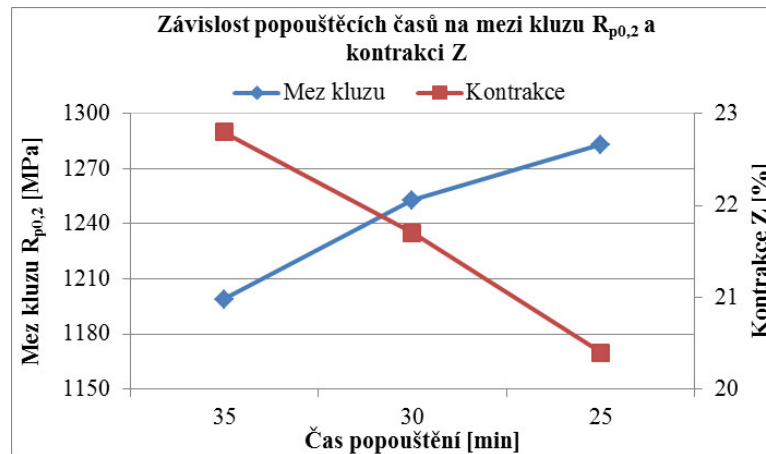
Porovnání mechanických vlastností

Trubky umístěné na gestellu jsou tepelně zpracovány a následně pomocí tahové zkoušky jsou určeny jejich mechanické vlastnosti. Hodnoty mechanických vlastností ze tří trubek jsou zprůměrovány a uvedeny v Tab. 15. Hodnoty z tahových zkoušek jsou k dispozici v příloze 1.

Tab. 15 Průměrné hodnoty mechanických vlastností z tahové zkoušky

Čas popouštění [min]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Kontrakce Z [%]	Tažnost A_5 [%]
35	1747	1199	22,8	19,5
30	1723	1253	21,7	18,4
25	1735	1283	20,4	19,2

Z výsledků tahové zkoušky je zřejmé, že se nám mění mechanické vlastnosti materiálu, a to především mez kluzu $R_{p0,2}$ a kontrakce Z (Obr. 65). Tyto změny mohou být způsobeny zvýšením tvrdosti na povrchu materiálu při snižování popouštěcích časů. Tvrdost na povrchu zvyšuje mezní napětí způsobující trvalou deformaci a zároveň se snižuje kontrakce, tj. zúžení. Spolu s klesající tvrdostí jádra může mít tento vliv příznivé účinky na životnost dílů.



Obr. 65 Závislost meze kluzu a kontrakce na čase popouštění

Zkouška kmitáním

Výsledky zkoušky kmitáním jsou uvedeny v Tab. 16. Následné vyhodnocení průměrných hodnot v závislosti na popouštěcích časech je zobrazena na Obr. 67.

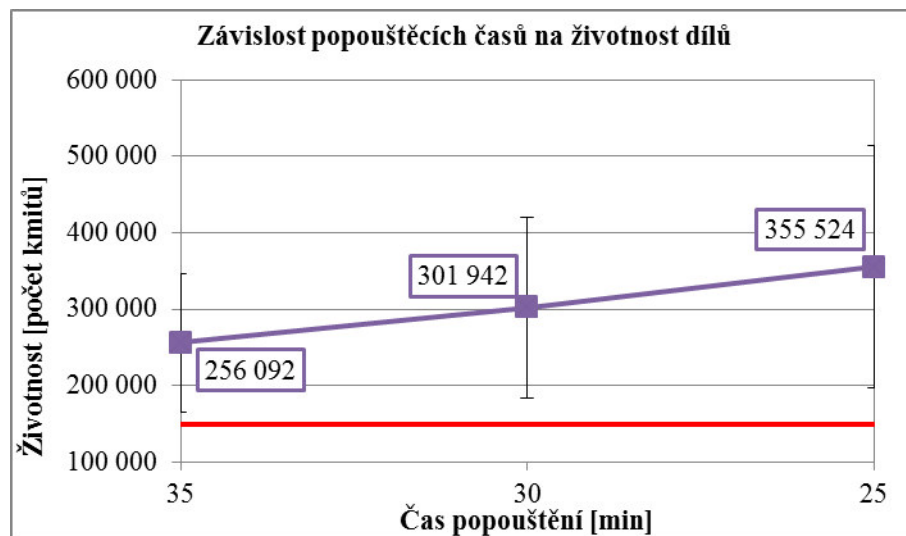
Tab. 16 Výsledky životnosti dílů

Čas pop. [min]	Životnost dílů [počet kmitů]						Průměr \bar{x}	Směr. odchylka s
	220 430	106 961	85 833	275 112	157 381	371 446		
35	220 430	106 961	85 833	275 112	157 381	371 446	256 092	90 708
30	266 082	269 998	533 420	303 595	238 710	199 846	301 942	118 586
25	202 522	282 019	308 665	424 395	643 016	272 525	353 524	158 299

Červeně vyznačené výsledky, jsou díly, které nedosáhly požadované životnosti, a u těchto dílů byla provedena analýza lomu. V prvním případě došlo k iniciaci lomu na vnitřním průměru dílu, která byla způsobená vadou v surovém materiálu (Obr. 66a). Druhou příčinou je rýha v oblasti svaru, která vznikla při výrobě surového materiálu (Obr. 66b). V obou případech se nejedná o příčinu způsobenou tepelným zpracováním, a proto jsou tyto hodnoty vyškrtnuty, aby nedošlo ke zkreslení výsledků.



Obr. 66 Iniciace vzniku lomu u dílů s nízkou životností



Obr. 67 Životnost v závislosti na čase popouštění

Z grafu vidíme, že průměrná životnost dílů roste s klesajícím časem popouštění, ale zároveň se zvětšuje směrodatná odchylka. Tento jev může být zapříčiněn tím, že u vyššího času popouštění dosahujeme podobných hodnot tvrdosti na povrchu a tedy i životnosti dílů. Naopak u nižších časů popouštění jsou hodnoty tvrdosti na povrchu výrazně odlišné a tím se i životnost jednotlivých dílů výrazně mění z důvodu náhlých lomů.

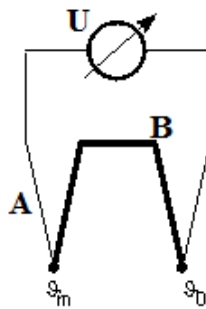
7.1.3 Měření teplotních křivek v popouštěcí peci

Cílem tohoto experimentu, je zjištění teplot v popouštěcí peci na různých místech vsázky. Teplota v peci je regulována na základě měření teploty pouze na jednom místě a to v místě nad vsázkou, tudíž teploty v různých místech pece se mohou lišit. V důsledku snižování popouštěcích teplot je nutné zabezpečit, aby došlo k rovnoměrnému ohřevu vsázky na požadovanou teplotu, a aby bylo dosaženo požadované výdrže na popouštěcí teplotě.

V opačném případě nebude materiál dostatečně tepelně zpracován a jeho výsledné vlastnosti budou tímto negativně ovlivněny.

Metodika experimentu

Měření je provedeno pomocí termoelektrických snímačů teploty, které využívají termoelektrických článků. Termoelektrický článek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů A a B (Obr. 68). Jestliže teplota jednoho ϑ_m spoje bude různá od teploty ϑ_0 druhého spoje, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. Výstupní napětí termočlánku je ukládáno a vyhodnocováno pomocí převodníku tzv. datalogger, který vedle úpravy vstupního signálu zajišťuje i automatickou kalibraci, filtraci, digitální zobrazení a obousměrnou komunikaci s počítačem nebo nadřazeným řídicím systémem. [36]



Obr. 68 Zapojení termočlánku [36]

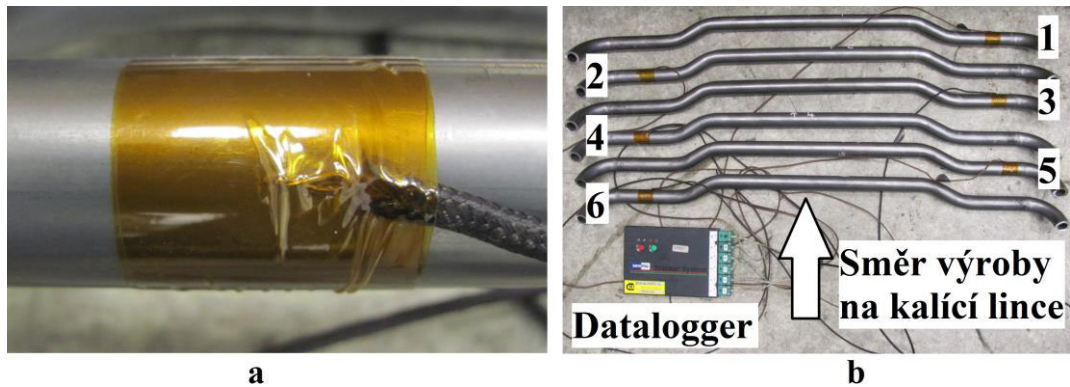
Pro provedení tohoto experimentu je naskládán plný gestell díly, tak abychom docílili skutečných podmínek při tepelném zpracování. Pouze díly na pozicích 1 - 6 určené pro laboratoř (kap. 7.1.1, Obr. 53, červené) jsou ze svých pozic odstraněny ještě, než vsázka bude transportována na nakládací stanoviště.

Tvar odložených dílů je vhodně upraven tak, aby při opětovném uložení na vsázku byla s nimi co nejjednodušší manipulace. Díly budou vráceny na vsázku těsně před operací popouštění. Důvodem je že, účinnost chladicího boxu s dataloggerem je vlivem vysokých teplot omezena maximálně na 3 hod., při překročení této hodnoty dojde k poškození dataloggeru a tudíž i ke ztrátě naměřených dat.

Na povrch upravených dílů jsou upevněny termoelektrické plášťové snímače teploty (Obr. 69a), jejich typ a vlastnosti jsou uvedeny výše v Tab. 17. Pro širší pole záběru teploty v peci jsou snímače upevněny na pravou (díly 1, 3, 5) a levou (2, 4, 6) stranu dílů, které jsou orientovány ve směru výroby na kalící lince (Obr. 69b).

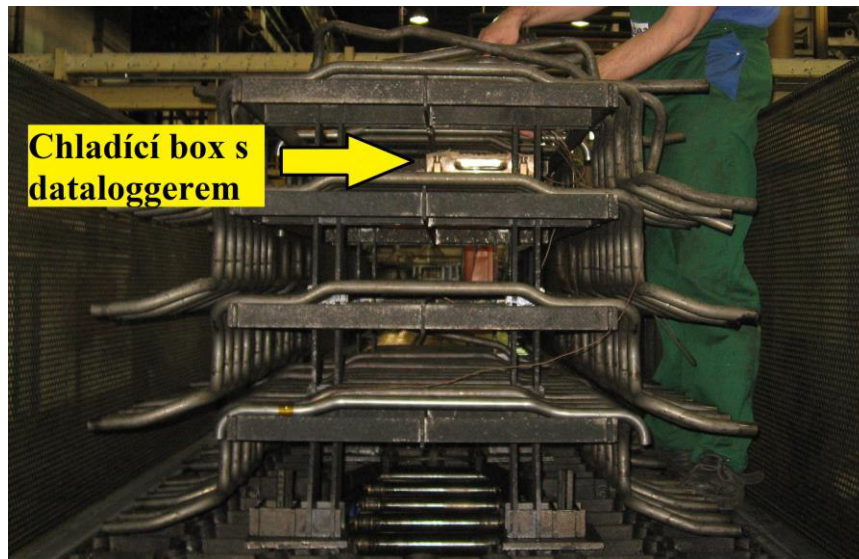
Tab. 17 Použitý datalogger a snímače teploty

Datalogger	Typ Datapaq 900 DP9064A
Snímače teploty	Termoelektrické plášťové Typ K: materiál NiCr-NiAl Měřicí rozsah: -200 až +1200 °C Materiál pláště snímače: Inconel 600



Obr. 69 Umístění senzorů; a – na díl; b – podle směru výroby

Vsázka projede kalící pecí, přes pračku a je pozastavena před popouštěcími pecemi. Obsluha zastaví dopravníky, vstoupí se do prostoru kalící linky, kde se uloží na své pozice díly se snímači a s dataloggerem v chladicím boxu (Obr. 70).



Obr. 70 Instalace dílů se snímači a chladicího boxu s dataloggerem

Dopravníky se zprovozní a vsázka je dopravena do popouštěcí pece. Tento test se provádí pouze na popouštěcí peci s označením DL 2, ve které je proveden test 3 vsázek o různých

časech popouštění Tab. 18. Po vyjetí vsázky z kalící linky je Datalogger připojen k PC, kde je pomocí softwaru vygenerována charakteristika vytápění.

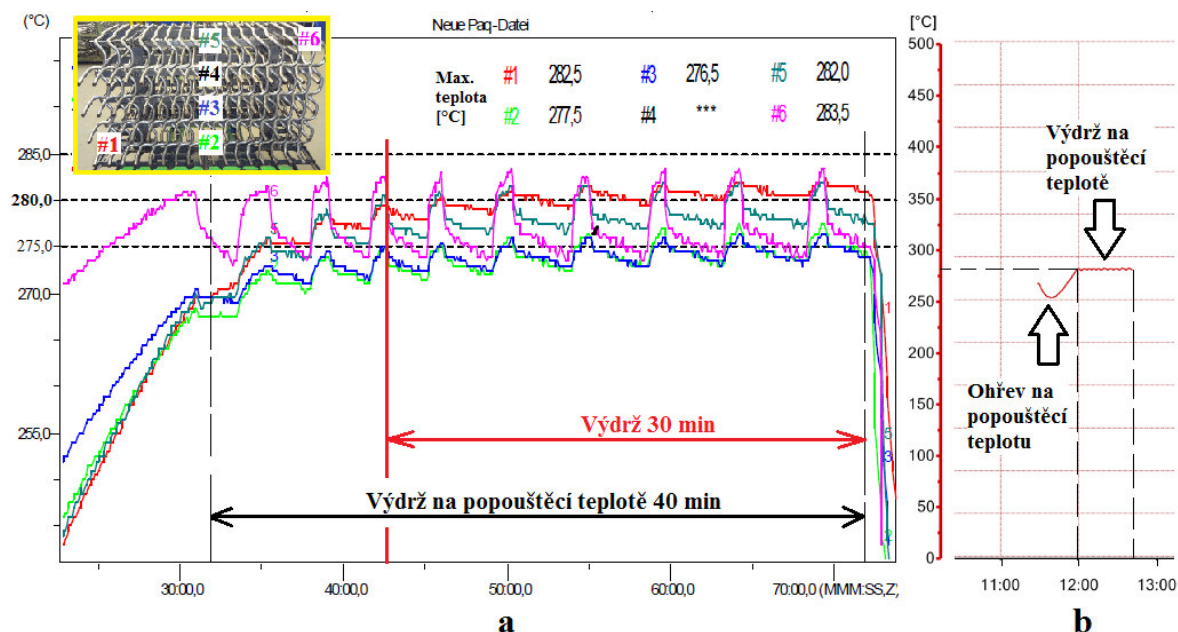
Tab. 18 Parametry popouštění – měření vytápění popouštěcí pece

Vsázka č.	Teplota popouštění / výdrž na této teplotě [°C/min]
1	280 / 40
2	280 / 30
3	280 / 25

Křivky ohřevu v popouštěcí peci

Používáme jak graf s křivkami ohřevu, tak část grafu vygenerovaného programem Carb-o-Prof, který zaznamenává všechny tepelné procesy na kalící lince. Pro náš záměr je použit průběh popouštění v závislosti na teplotě, která je měřena nad vsázkou pomocí termoelektrického snímače. Kompletní grafické vyhodnocení měření křivek teploty je k dispozici v příloze 2 a diagramy tepelného zpracování IPSEN v příloze 3:

U vsázky č. 1 je nastavena výdrž na popouštěcí teplotě 40 min (Obr. 71), jedná se o parametry popouštění, které se používají při standartní sériové výrobě pro materiál typu A.

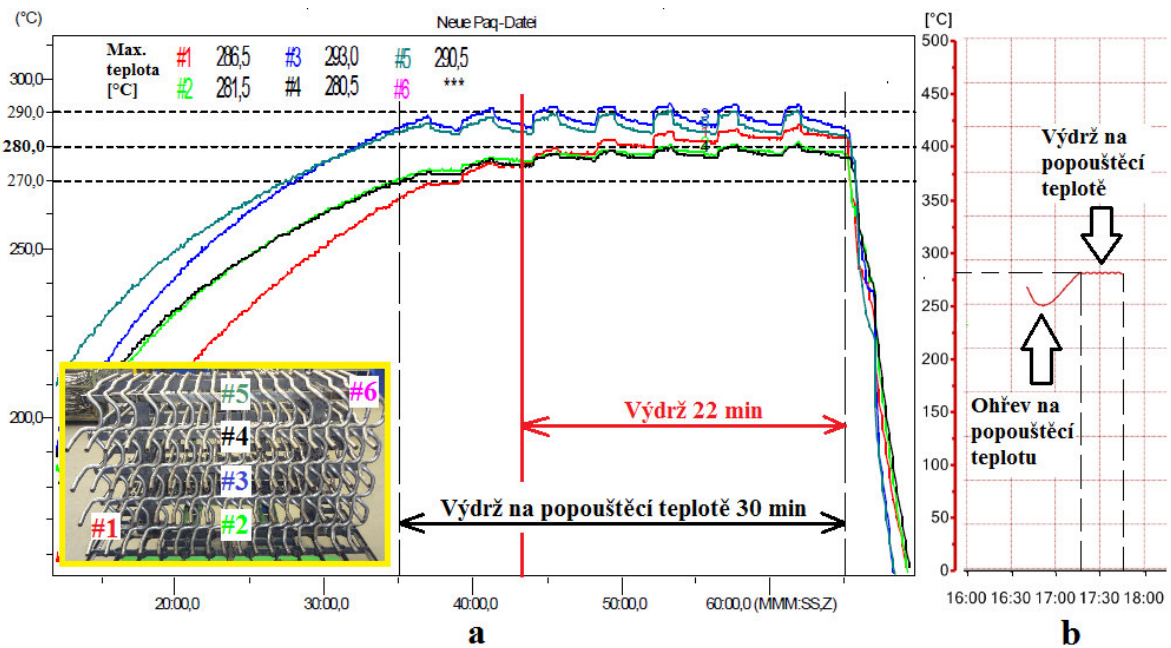


Obr. 71 Popouštění 40 min; a – křivky ohřevu dílů; b – teplota vzduchu v peci

Z Obr. 71a vidíme, že nastavená doba popouštění je 40 min, ale reálná výdrž vše dílů na této teplotě je 30 min, kdy dosáhneme dostatečného snížení tvrdosti u všech dílů. Díly na pozicích 1,2 a 3 dosahují popouštěcí teploty až po době 10 min. Celkový čas popouštění je

73 min a ohřev na popouštěcí teplotu 32 min. Teplota vzduchu v peci je regulována na 280 °C (Obr. 71b).

Pro vsázku č. 2 je zvolena výdrž na popouštěcí teplotě 30 min (Obr. 72). Celková doba popouštění by měla být o 10 minut kratší než u vsázky předešlé.

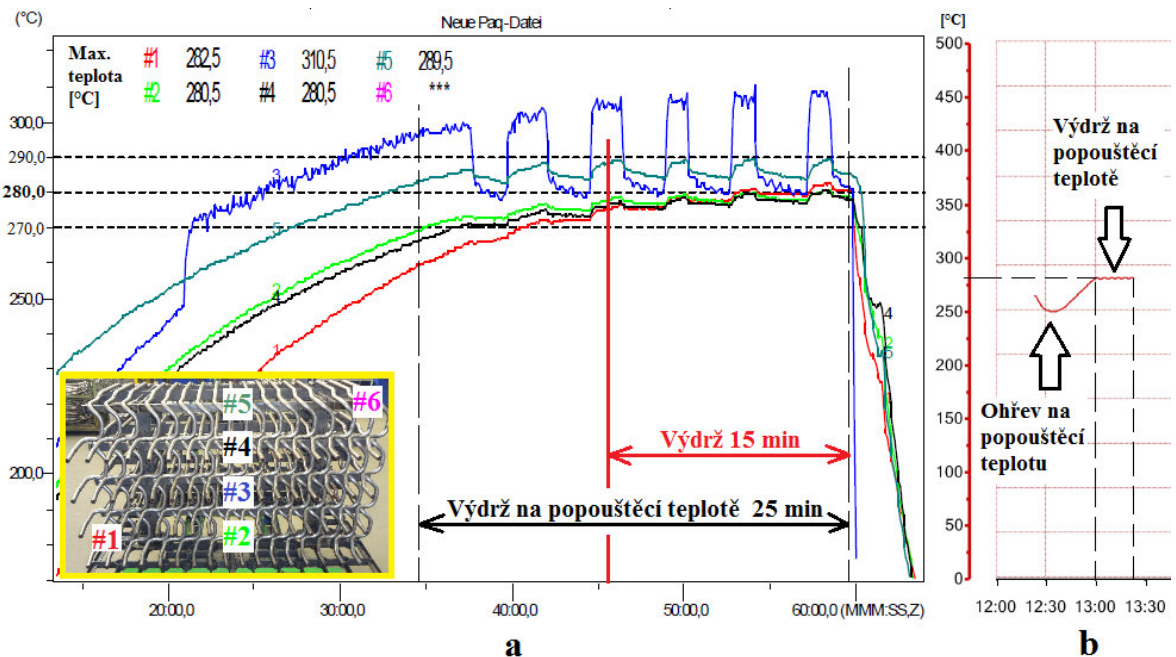


Obr. 72 Popouštění 30 min; a – křivky ohřevu dílů; b – teplota vzduchu v peci

Z Obr. 72a vidíme, že celkový čas popouštění je 65 min a ohřevu na popouštěcí teplotu 35 min. Nastavená doba popouštění je 30 min, ale u dílů č. 1, 2, a 4 dohází k popouštění pouze po dobu 22 min a v těchto dílů může vlivem krátké výdrže na popouštěcí teplotě docházet ke zvýšení tvrdosti na povrchu. Teplota vzduchu v peci by měla dosahovat přes 290 °C, ale Obr. 72b ukazuje hodnotu nižší, tedy teplotu 280 °C, podle které je regulována teplota v peci.

Posledním zpracování vsázky č. 3 se provádí při výdrži na popouštěcí teplotě 25 min (Obr. 73). Celkový čas popouštění dosahuje 65 min a ohřev na popouštěcí teplotu trvá 35 min (Obr. 73a). Při popouštění této vsázky je nastavena výdrž na popouštěcí teplotě 25 min, ale u dílů 1,2 a 4 je tato výdrž zkrácená na 15 min. U dílu na těchto pozicích neproběhne dostatečné popouštění, nedojde k dostatečnému snížení vnitřních pnutí a tedy i snížení tvrdosti. U dílů, které nejsou dostatečně popouštěny, dochází k zvýšení tvrdosti než u ostatních dílů, což má za následek výrazně odlišné hodnoty životnosti způsobené náhlými lomy. U snímače č. 3 dochází k výraznému zvýšení teploty, to je způsobeno tím, že během procesu

popouštění došlo k jeho uvolnění z dílu a tento snímač měřil teplotu vzduchu v peci. Z Obr. 73b vidíme, že i přes hodnotu snímače č. 3 je regulována teplota nad vsázkou 280 °C.



Obr. 73 Popouštění 25; a – křivky ohřevu dílů; b – teplota vzduchu v peci

U všech třech variant popouštění, pro které byl proveden tento experiment je vidět, že teplota popouštění není za začátku výdrže u všech dílů na gestellu stejná. Na teplotu popouštění se dostaneme až po 10 min výdrže. Tento vliv není tak významný při popouštění 40 min, kdy při další výdrži 30 min dojde k dostatečnému prohřátí všech dílů a tedy i tvrdosti na povrchu dosahuje podobných hodnot s malou odchylkou.

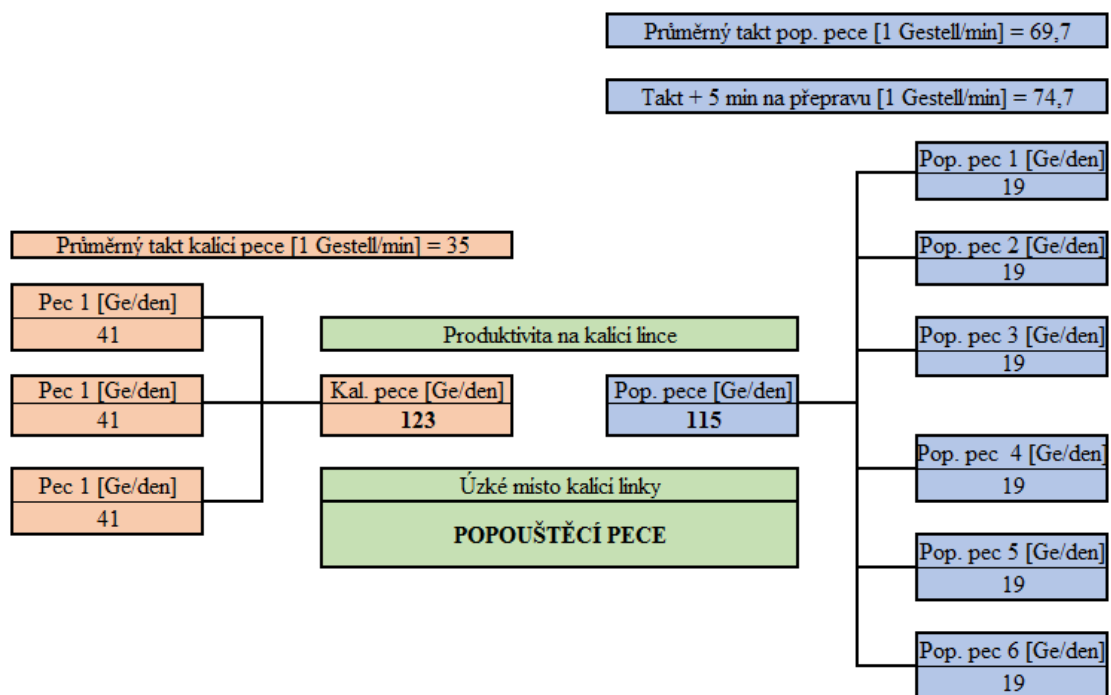
Naopak u časů popouštění kratších se tento čas výdrže krátí pod 20 min a tím nedojde k dostatečnému prohřátí dílů v určitých oblastech gestellu. Především v oblastech dílů č. 1, 2 a 4 dochází k pomalému ohřevu, tedy především ve spodním patře vsázky v popouštěcí peci. Vlivem časů výdrží, které se dle pozice na gestellu mění, dochází k výrazným změnám hodnot tvrdosti na povrchu dílů a tyto rozdíly jsou i dále viditelné, při kontrole dílů na životnost.

Abychom docílili, že proces popouštění bude stabilní a všechny díly budou vykazovat podobné vlastnosti s minimálními odchylkami, tak vzhledem k těmto požadavkům je nejvhodnější snížení popouštěcích časů na 35 min. Další snižování popouštěcích časů by vedlo k tomu, že proces popouštění bude nestabilní a docházelo by k nepředvídatelnému chování dílů, které se neslučuje s požadavky zákazníka.

7.1.4 Vliv snížení popouštěcích časů na produktivitu kalčí linky

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že snižování popouštěcích časů je možné. Dochází ke zlepšení mechanických a dynamických vlastností materiálu i přesto, že časy popouštění se zkrátí. Otázkou je, dojde-li ke zvýšení produktivity při aplikaci výše použitých variant popouštění v sériové výrobě na kalčí lince.

Kalčí linka se skládá ze tří kalčích a šesti popouštěcích pecí. Na kalčí lince je cílem, aby výrobní produktivita kalčích pecí byla sladěná s výrobní produktivitou popouštěcích pecí. V současné době je produktivita kalčích pecí větší než popouštěcích, tudíž popouštěcí pece jsou úzkým místem (Obr. 74) a snížením popouštěcích časů bychom produktivitu na popouštěcích pecích zvýšili.



Obr. 74 Úzké místo kalčí linky

Průměrný takt kalčích a popouštěcích pecí je určen z dlouhodobých dat při sériové výrobě na kalčí lince, které jsou k dispozici pomocí softwarů AutoMag a Carb-o-Prof. Z dat pro kalčí pece jsou odstraněny časy taktu, kde došlo k poruše na kalčích pecích, byl nedostatek materiálu určeného pro výrobu a nedostatečný počet členů obsluhy kalčí linky, protože tyto faktory výrazně prodlužují průměrný čas taktu kalčí pece. Průměrný čas taktu popouštěcích pecí je odvozen z času, který stráví vsázka v peci a navíc k tomuto času je připočítáno 5 min na přepravu vsázky během přepravy na kalčí lince.

Snižování popouštěcích časů pro projekty s použitým materiálem typu A

První variantou zvýšení produktivity je, že snižování popouštěcích časů bude aplikováno na všechny projekty, u kterých je použit materiál typu A. Poměr materiálu typu A ve výrobě činí $p_{mv1} = 90 \%$ a zbylých $p_{mv2} = 10 \%$ je přiřazeno k materiálu typu B. Níže je uvedeno vyhodnocení produktivity popouštěcích pecí při snížení časů od 40 min do 25 min (Tab. 19).

Vzorový výpočet pro variantu popouštění 40 min je uveden níže. Máme k dispozici 6 popouštěcích pecí a výrobní čas t_v pro poměr materiálu ve výrobě za 1 den je:

$$t_{v1,2} = k \cdot d \cdot 60 \cdot p_{mv1,2}$$

$$t_{v1} = 6 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 0,9 = 7776 \text{ min/den}$$

$$t_{v2} = 6 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 0,1 = 864 \text{ min/den}$$

kde:

$t_{v1,2}$ [min/den] poměrný čas daného materiálu ve výrobě.

k [-] počet popouštěcích pecí.

d [hod] hodin za 1 den.

$p_{1,2}$ [%] poměr daného materiálu ve výrobě.

Průměrný takt popouštěcích pecí určený z dlouhodobých dat kalící linky je pro mat. typu A $t_{takt1} = 68,4$ ge/min a pro mat. typu B je $t_{takt2} = 77,7$ ge/min. Pomocí taktů vypočítáme počet tepelně zpracovaných gestellů $n_{1,2}$ za 1 den:

$$n_{1,2} = \frac{t_{v1,2}}{t_{takt1,2}}$$

$$n_1 = \frac{7776}{68,4} = 113,7 \Rightarrow 113 \text{ ge/den}$$

$$n_2 = \frac{864}{77,7} = 11,1 \Rightarrow 11 \text{ ge/den}$$

kde:

$n_{1,2}$ [ge/den] počet gestellů za den pro daný materiál.

$t_{v1,2}$ [min/den] poměrný čas daného materiálu ve výrobě.

$t_{takt1,2}$ [ge/min] průměrný takt popouštěcích pecí pro daný materiál na 1 gestell.

Z počtů gestellů za den pro daný materiál určíme výrobní takt popouštěcích pecí t_p na jeden gestell:

$$t_p = \frac{k \cdot d \cdot 60}{n_1 + n_2}$$

$$t_p = \frac{6 \cdot 24 \cdot 60}{113 + 11} = 69,7 \text{ ge/min}$$

kde:

t_p [ge/min] výrobní takt popouštěcích pecí na 1 gestell.

k [-] počet popouštěcích pecí.

d [hod] hodin za 1 den.

$n_{1,2}$ [ge/den] počet gestellů za den pro daný materiál.

Produktivitu popouštěcích pecí p_p za jeden den spočítáme pomocí taktu t_p , ke kterému připočítám čas 5 min potřebný na přepravu vsázky na vykládací stanoviště:

$$p_p = \frac{k \cdot d \cdot 60}{t_p + t_{př}}$$

$$p_p = \frac{6 \cdot 24 \cdot 60}{69,7 + 5} = 115,7 \Rightarrow 115 \text{ ge/den.}$$

kde:

p_p [ge/den] produktivita popouštěcích pecí za 1 den.

k [-] počet popouštěcích pecí.

d [hod] hodin za 1 den.

t_p [ge/min] výrobní takt popouštěcích pecí na 1 gestell.

$t_{př}$ [min] čas na přepravu vsázky na vykládací stanoviště.

Tab. 19 Produktivita popouštěcích pecí pro projekty s mat. typu A

Čas popouštění [min]	Materiál	Poměr výroby [%]	Výrobní čas [min/den]	Prům. takt popouštění [Ge/min]	Počet gestellů [Ge/den]	Takt pop. [Ge/min]	Produktivita [Ge/den]
40	Typ A	90	7 776	68,4	113	69,7	115
	Typ B	10	864	77,7	11		
35	Typ A	90	7 776	63,4	122	65,0	123
	Typ B	10	864	77,7	11		
30	Typ A	90	7 776	58,4	133	60,0	132
	Typ B	10	864	77,7	11		
25	Typ A	90	7 776	53,4	145	55,4	143
	Typ B	10	864	77,7	11		

Vzhledem k tomu, že maximální produktivita kalících pecí je 123 Ge/den, tak nejvýhodnějším časem popouštění je 35 min, kdy produktivita popouštěcích je 123 Ge/den. Snížením popouštěcích časů na 35 min dojde ke zvýšení produktivity na kalící lince o 7,0 % za den.

S dalším snižováním popouštěcích časů na 30 a 25 min sice dojde ke zvýšení produktivity popouštěcích pecí, ale vzhledem k produktivitě na kalících pecích je toto zvýšení nežádoucí, aby jejich takt byl co nejvíce sladěný.

Snížení popouštěcích časů pouze pro vzorový projekt

Druhou variantou snižování produktivity bude uvažováno pouze pro vzorový projekt. Pro tento projekt jsou dostupné 4 gestelly, které 4krát za den projedou kalící linkou, tj. celkem 16 gestellů za den (1088 tepelně zpracovaných dílů za den). Poměr ve výrobě materiálu typu A pro vzorový projekt je 12,7 %, materiálu typu A pro ostatní projekty 77,3 % a materiálu typu B 10%. Níže je uvedeno vyhodnocení produktivity snížení popouštěcích časů od 40 min do 25 min (Tab. 20).

Tab. 20 Produktivita popouštěcích pecí pouze pro vzorový projekt

Čas popouštění [min]	Materiál	Poměr výroby [%]	Výrobní čas [min]	Prům. takt popouštění [Ge/min]	Počet gestellů [Ge/den]	Takt pop. [Ge/min]	Produktivita [Ge/den]
40	Vzorový	12,7	1 094	63,5	16	69,7	115
	Typ A	77,3	6 682	68,4	97		
	Typ B	10	864	77,6	11		
35	Vzorový	12,7	1 094	58,5	18	68,6	117
	Typ A	77,3	6 682	68,4	97		
	Typ B	10	864	77,6	11		
30	Vzorový	12,7	1 094	53,5	20	67,5	119
	Typ A	77,3	6 682	68,4	97		
	Typ B	10	864	77,6	11		
25	Vzorový	12,7	1 094	48,5	22	66,5	120
	Typ A	77,3	6 682	68,4	97		
	Typ B	10	864	77,6	11		

Pro dosažení nejvýhodnějšího sladění taktů mezi kalíciemi pouze u vzorového projektu se dosáhne snížením popouštěcího času na 25 min. Tato hodnota je pouze teoretická, kdy je

spočítáno, že se zvýší počet gestellů z 16 na 22. V reálném stavu ve výrobě je možno maximálně za 1 den zpracovat 20 gestellů. Tento stav je podrobně rozepsán níže.

V současné době je čas zpracování jednoho gestellu na kalící lince s ohledem na jeho vykládání, naskládání a připravení 300 min. Při těchto parametrech projedou 4 gestelly, které máme k dispozici celkem 4,8 krát linkou, tedy 4 krát za den (celkem 16 gestellů za den, jak je uvedeno výše). Když snížíme čas popouštění na 25 min, snížíme čas na zpracování a přípravu na 285 min a při tomto času se zvýšíme projetí 4 gestellů k dispozici na 5,05 krát linkou, tj. 5 krát za den (celkem 20 gestellů za den). Při ideálních podmínkách, že bude dostatečný počet členů obsluhy, dostatek materiálu k dispozici a nedojde k poruše na kalící lince, tak je možné zvýšit produkci o 4 gestelly za den. Ze současných 1088 dílů by se zpracovalo 1360 dílů za den.

7.2 Zpracování neshodného materiálu

Tento neshodný materiál byl dodán externí firmou a již při vstupní kontrole byly objeveny nestandardní vlastnosti materiálu. Materiál byl zpracován v sériové výrobě, ale již při operaci rovnání u něj došlo k předčasnému lomu (Obr. 75).

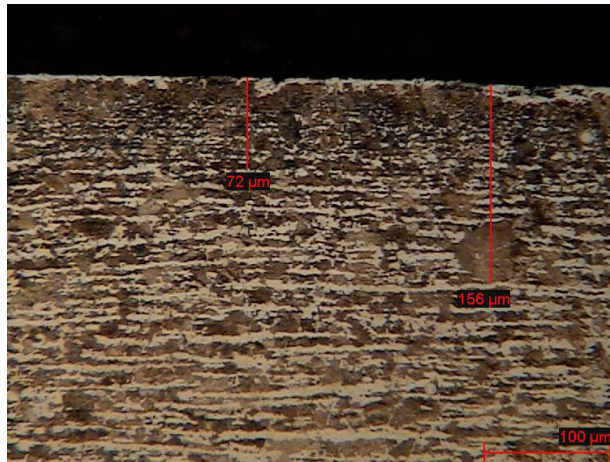


Obr. 75 Předčasný lom neshodného materiálu

Při analýze lomu bylo zjištěno, že k porušení dochází vlivem tepelného zpracování a materiálem polotovaru, který je dodáván externí firmou. Standardní nauhličení surového materiálu nepřekročí hodnotu 100 μm , ale dodaný materiál dosahuje nauhličení až 150 μm (Obr. 76), což má po standardním tepelném zpracování v sériové výrobě za následek předčasný lom a ztrátu funkce pružného prvku.

Naším cílem je tedy provést tepelné zpracování tohoto neshodného materiálu při různých parametrech, kde se zaměříme na teplotu kalení, obsah uhlíku v atmosféře kalící pece a na

teplotu popouštění tak, abychom materiálu navrátili požadované vlastnosti. Na experiment je použita stejná výrobní šarže materiálu jako u neshodného materiálu, tj. 3531049.



Obr. 76 Nauhličení povrchu neshodného materiálu

7.2.1 Metodika experimentu

Uložení dílů na gestelle a příprava vsázky na kalící linku

Uložení dílů na gestell a příprava vsázky se provádí shodně jako v kapitole 7.1.1, shodně jsou i upevněny trubky určené pro tahovou zkoušku. Takto připravený gestell je přemístěn na nakládací stanoviště, kde se nastaví parametry tepelného zpracování a vsázka je vpuštěna na kalící linku.

Nastavení procesu tepelného zpracování

Pro tento experiment je nachystáno celkem 9 vsázek, z čehož u 8 vsázek budeme měnit parametry tepelného zpracování a 1 vsázka bude tepelně zpracována standardní sériovou výrobou. Při návrhu tohoto experimentu jsme použili metodu DoE (Design of Experiments), která bude prováděna pomocí 3 faktorů a 2 hladin, tudíž pro provedení experimentu je nutné nachystat již zmiňovaných 8 vsázek. Návrh experimentu:

- 1. faktor - teplota kalení, hladiny: min. 850 °C, max. 890 °C.
- 2. faktor - uhlíkový potenciál atm. v kal. peci, hladiny: min. 0,2 %C, max. 0,6 %C.
- 3. faktor – teplota popouštění, hladiny: min. 240 °C, max. 300 °C
- konstanty – čas výdrže na kalící teplotě 5 min a popouštěcí teplotě 40 min.

Detailní nastavení parametrů tepelného zpracování je uvedeno v Tab. 21.

Tab. 21 Parametry tepelného zpracování – zpracování neshodného materiálu

Vsázka č.	Kalící pec		Popouštěcí pec
	Teplota kalení / výdrž na této teplo- tě [°C/min]	Obsah uhlíku v atmosféře [% C]	Teplota popouštění / výdrž na této tep- lotě [°C/min]
1	850 / 5	0,2	240 / 40
2	850 / 5	0,2	300 / 40
3	850 / 5	0,6	240 / 40
4	850 / 5	0,6	300 / 40
5	890 / 5	0,2	240 / 40
6	890 / 5	0,2	300 / 40
7	890 / 5	0,6	240 / 40
8	890 / 5	0,6	300 / 40
9 (standardní para- metry TZ)	850 / 5	0,6	280 / 40

Vsázka prochází přes jednotlivé operace na kalící lince, které jsou popsány v kap. 7.1.1, proces tepelného zpracování jednotlivých vsázek je k dispozici v příloze 6. Poté je vsázka obsluhou odebrána z vykládacího stanoviště a připravena na uložení dílů do přepravních boxů. Pouze díly určené pro laboratoř a dokončení ve výrobě jsou z vsázky odebrány a označeny, aby nedošlo k jejich promíchání.

Výběr dílů pro laboratoř a pro dokončení ve výrobě

Výběr dílů pro laboratoř a dokončení dílů ve výrobě probíhá podobně jako v kap. 7.1.1. Při výběru dílů pro laboratoř, jsme z časových důvodů a analýze průběhu tvrdosti v předcházející kapitole dospěli k závěru, že pro tento experiment nám postačí nařezat vzorky z dílů uložených na pozici 1, 3, 5.

Tyto vzorky jsou odevzdány do laboratoře, kde jsou připraveny pro metalografické hodnocení. Hodnotí se průběh tvrdosti od vnějšího k vnitřnímu průměru, oduhličení a nauhličení na vnějším průměru, oduhličení na vnitřním průměru a struktura, kterou je materiál tvořen. Díly určené na dodělání jsou standardně zpracovány a je na nich provedena zkouška kmitání, jejíž podmínky zatížení jsou uvedeny v Tab. 22.

Tab. 22 Podmínky zkoušky kmitání – zpracování neshodného materiálu

1. fáze kmitání do 750 kmitů	Úhel natočení ramene $\alpha/2 = 27^\circ$
	Zdvih ramene $a/2 = 49,5$ mm
	Frekvence kmitání $f = 17,5$ Hz
2. fáze kmitání do 150 000 kmitů	Úhel natočení ramene $\alpha/2 = 19,5^\circ$
	Zdvih ramene $a/2 = 34$ mm
	Frekvence kmitání $f = 17,3$ Hz

7.2.2 Vyhodnocení výsledků

Cílem je určit parametry tepelného zpracování tak, abychom neshodnému materiálu vrátili takové vlastnosti, které jsou požadovány zákazníkem. Abychom určili nejvhodnější parametry tepelného zpracování pro neshodný materiál, budeme postupovat pomocí vylučovací metody. Druhým kritériem výběru vhodné varianty je, aby výsledné výsledky dosahovali podobných hodnot s nízkou odchylkou z důvodů dosažení stabilního procesu, kdy všechny zpracované díly budou vykazovat podobné chování. Kompletní naměřené hodnoty vlastností materiálu jsou k dispozici v příloze 4.

Tepelné zpracování materiálu při sériových podmínkách

První vyhodnocení je pro materiál, který se zpracovává při standardních podmínkách v sériové výrobě viz. Tab. 21, vsázka č. 9. Hodnoty životnosti pro jednotlivé díly 1-6 jsou uvedeny v Tab. 23.

Z tabulky vidíme, že průměrná životnost dosahuje požadovaných hodnot, ale velikost směrodatné odchylky naznačuje, že dochází k náhodným lomům a to je pro stabilitu požadovaných vlastností dílů nežádoucí.

Tab. 23 Životnost dílů tepelně zpracovaného materiálu při sériových podmínkách

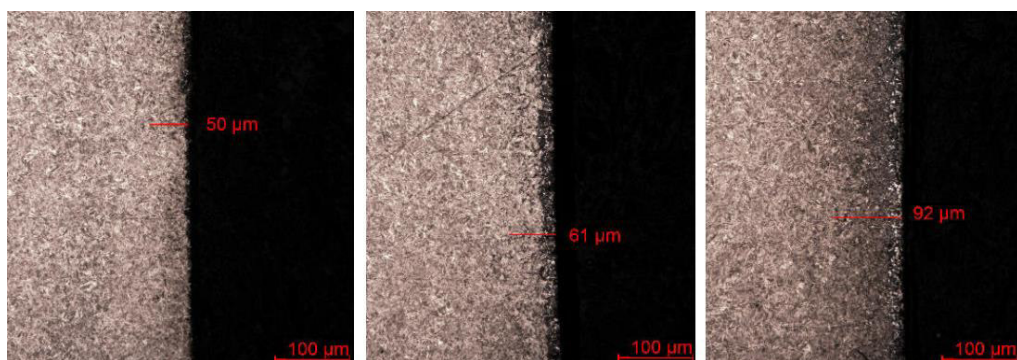
Životnost dílů [počet kmitů]						Průměr \bar{x}	Směr. odchylka s
155 508	135 453	140 304	290 621	135 050	116 881	162 303	64 066

Dále jsou uvedeny v Tab. 24 parametry materiálu vyhodnocované v laboratoři, pro tento účel byly vybrány pouze 3 díly, a to 1, 3, 5 jak je uvedeno výše. U těchto dílů dochází k vyššímu oduhličení na vnitřním průměru, kde by hodnoty měli dosahovat max. 50 μm . Jak bylo zmíněno výše, u dílů dochází k náhodným lomům, což je pravděpodobně způsobeno vyšší hodnotou oduhličení na vnitřním průměru a z tohoto důvodu jsou tyto parametry

try tepelného zpracování nežádoucí. Hloubka oduhličení u jednotlivých vzorků je zobrazena na Obr. 77. U dalších hodnocených parametrů leží hodnoty pod maximální hranicí, tj oduhličení na vnějším povrchu do 50 μm a nauhličení na vnějším povrchu do 150 μm .

Tab. 24 Naměřené hodnoty pro materiál zpracovávaný při sériových podmínkách TZ

Díl č.	Vnitřní průměr	Vnější průměr	
	Oduhličení [μm]	Oduhličení [μm]	Nauhličení [μm]
1	50	7	120
3	61	10	131
5	92	8	112



Obr. 77 Hloubka oduhličení na vnitřním průměru

Závislost popouštěcí teploty na tvrdosti a životnosti dílů

Závislost popouštěcí teploty na tvrdost a životnost dílů je posuzována s ohledem na stabilitu dosažených výsledků. Při zpracování gestellu je nutné dosáhnout u všech dílů podobných výsledných vlastností tak, aby nedocházelo k výrazným odlišnostem. Vzhledem k těmto podmínkám budeme posuzovat životnost dílů, kdy upřednostníme nižší průměr životnosti s menší směrodatnou odchylkou, kdy zaručíme, že všechny díly jsou podobně tepelně zpracovány a mají podobné výsledné vlastnosti.

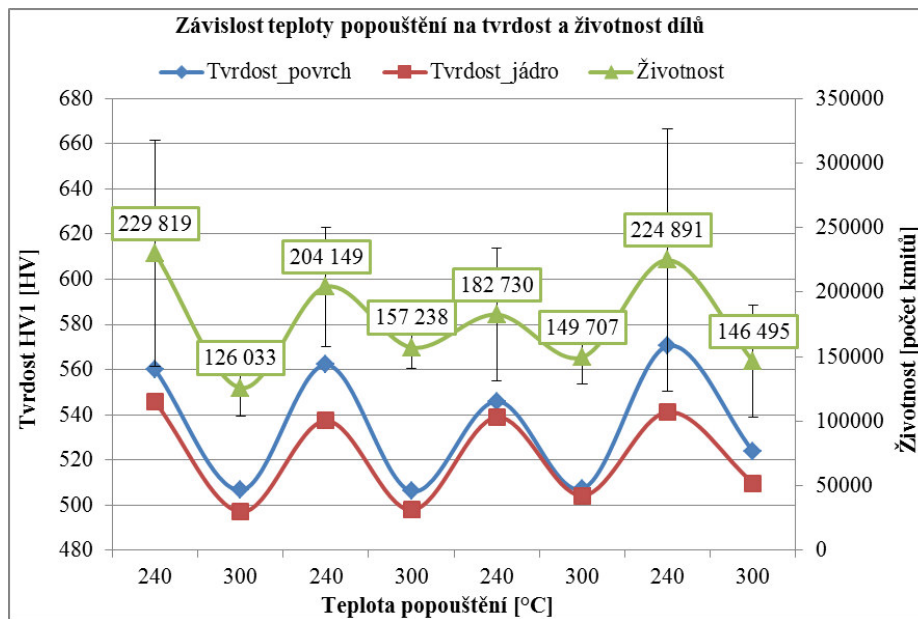
V Tab. 25 jsou uvedeny průměrné hodnoty tvrdosti na povrchu a v jádře pro 3 díly. Průměrná hodnota životnosti je vyhodnocena za všech 6 zpracovaných dílů ve výrobě. Tyto parametry jsou dále vyobrazeny na Obr. 78.

Z grafu vidíme, že při zpracování dílů při vyšší popouštěcí teplotě dochází ke snížení jejich tvrdosti na povrchu i v jádře, ale také se snižuje životnost těchto dílů. To je způsobeno, že při vyšší teplotě popouštění dochází k větší relaxaci deformací a snížení vnitřního pnutí

v materiálu způsobené kalením a zároveň tedy dochází ke snížení tvrdosti dílů. Tento vliv popouštěcí teploty na tvrdost a životnost dílů je znázorněn na Obr. 79.

Tab. 25 Vliv popouštěcí teploty na tvrdost a životnost dílů

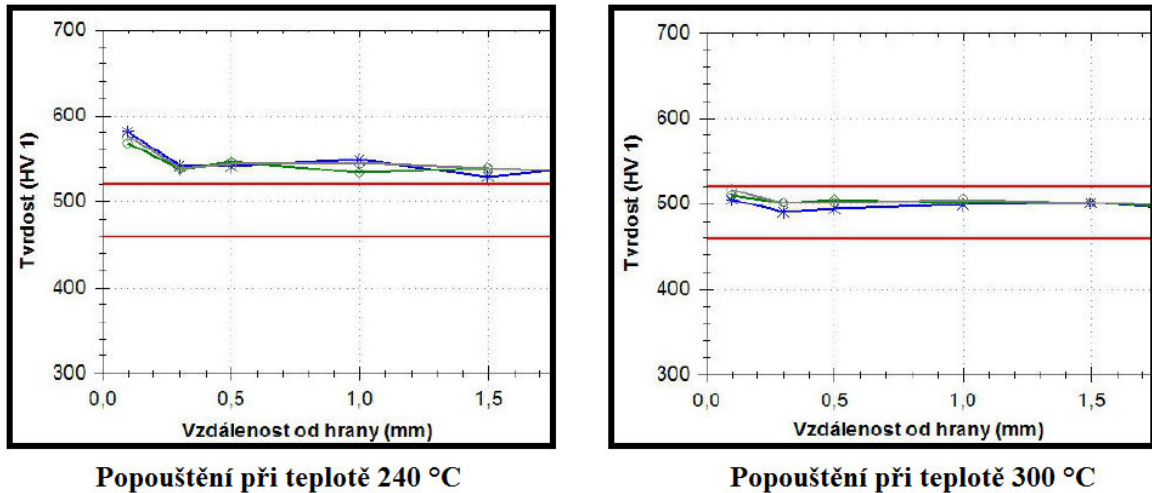
Teplota popouštění [°C]	Varianta teploty popouštění	Tvrdost HV1		Životnost [Počet kmitů]	Směr. odchylka s
		Povrch [HV]	Jádro [HV]		
240	1	560,0	545,7	229 819	87 447
300	2	506,7	497,1	126 033	21 735
240	3	562,2	537,4	204 149	46 409
300	4	506,2	497,9	157 238	16 371
240	5	546,0	539,0	182 730	51 430
300	6	507,3	504,3	149 707	20 692
240	7	570,5	541,3	224 891	101 808
300	8	523,8	509,8	146 495	43 305



Obr. 78 Závislost teploty popouštění na tvrdost a životnost dílů

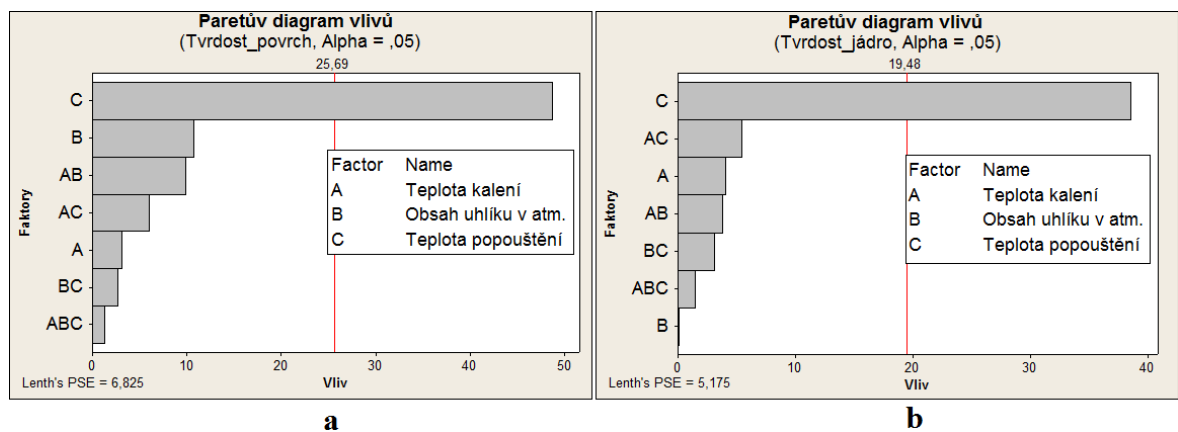
Můžeme říct, že snižováním popouštěcí teploty dosahujeme vyšší tvrdosti a životnosti dílů, ale vzhledem k dosažení podobností výsledků a stability procesu vidíme, že zároveň při snižování popouštěcí teploty se zvětšuje směrodatná odchylka životnosti dílů. Tento rozdíl je způsoben tím, že materiál je méně zrelaxován, má vyšší tvrdost jak na povrchu i v jádře a to vede k náhlým lomům. Tento jev je pro náš záměr nežádoucí a na základě toho budou nevhodné varianty vyloučeny.

Nevhodné pro náš účel je varianta č. 1, 7, kde sice dosahujeme vysoké životnosti, ale hodnoty těchto životností se výrazně liší. Dále je vyřazena varianta č. 2, kde zdaleka není dosaženo požadovaných hodnot životnosti, které se od sebe výrazně neliší.



Obr. 79 Porovnání průběhů tvrdosti vůči teplotám popouštění

Vliv popouštěcí teploty na tvrdost povrchu (Obr. 80a) a jádra (Obr. 80b) je zřetelná i z Paretova diagramu. Paretoův diagram nám ukazuje, který faktor tepelného zpracování má největší vliv právě na tvrdost dílů.

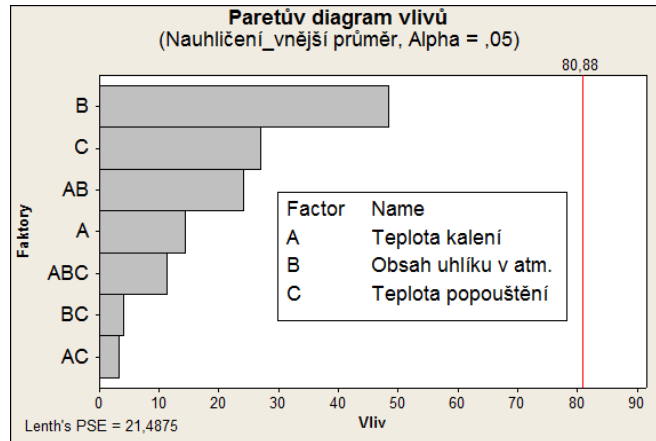


Obr. 80 Vliv popouštěcí teploty na tvrdost; a – povrchu; b – jádra

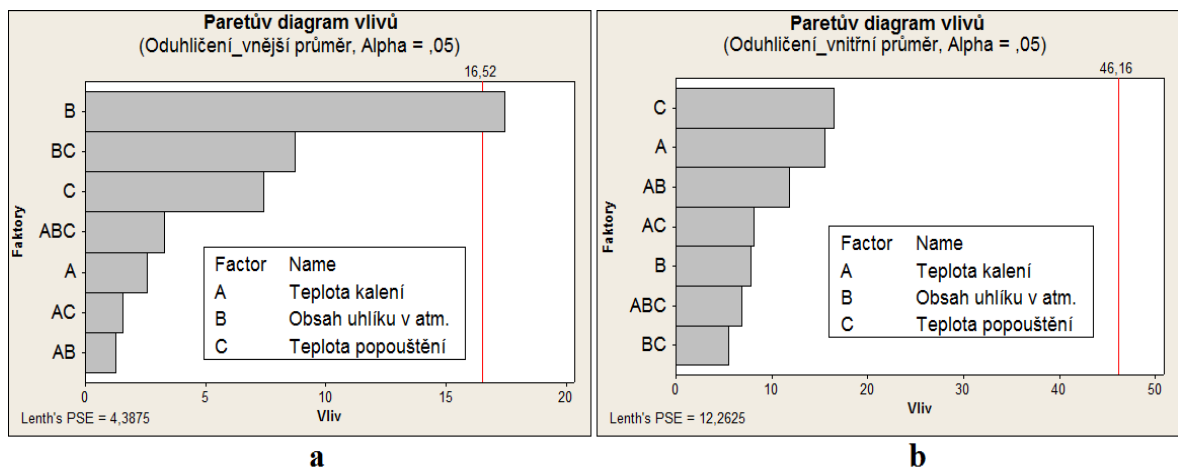
Vliv obsahu uhlíku v atmosféře kalící pece

Dalším faktorem, který nám ovlivňuje chování materiálu během tepelného zpracování je obsah uhlíku v atmosféře kalící pece. Obsah uhlíku v atmosféře kalící pece ovlivňuje parametry nauhličení na vnějším průměru, oduhlíčení na vnějším a vnitřním průměru

Pomocí Paretovy analýzy určíme, jestli obsah uhlíku v atmosféře výrazně ovlivňuje některý z těchto parametrů, tj. nauhličení na vnějším průměru (Obr. 81), oduhličení na vnějším průměru (Obr. 82a) a oduhličení na vnitřním průměru (Obr. 82b).



Obr. 81 Vliv obsahu uhlíku na nauhličení vnějšního průměru



Obr. 82 Vliv obsahu uhlíku na oduhličení průměru; a – vnějšního; b - vnitřního

Z Paretoových grafů můžeme vidět, že nejvýraznější vliv obsahu uhlíku v atmosféře kalící pece má na oduhličení na vnějším průměru (Obr. 82a).

Hodnoty oduhličení na vnějším jsou uvedeny v Tab. 26 a můžeme říci, že při snížení obsahu uhlíku atmosféry v kalící peci dochází ke zvýšení oduhličení na vnějším okraji. Při kalení dochází i ke změnám oduhličení na vnitřním průměru, jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v Tab. 27.

V obou případech je maximální povolená hloubka oduhličení 50 μm , při překročení této hranice může docházet k lokálnímu snížení tvrdosti, snížení meze únavy a následkem může být snížení životnosti nebo náhlé lomy dílů.

Tab. 26 Hloubka oduhličení na vnějším průměru pro varianty zpracování 3, 4, 5, 6 a 8.

Varianta zpracování	Obsah uhlíku v atmosféře [% C]	Oduhličení na vnějším průměru pro díly č.[μm]		
		1	3	5
3	0,6	9	6	4
4	0,6	9	8	11
5	0,2	40	20	23
6	0,2	19	16	16
8	0,6	14	0	5

Tab. 27 Hloubka oduhličení na vnitřním průměru pro varianty zpracování 3, 4, 5, 6 a 8.

Varianta zpracování	Obsah uhlíku v atmosféře [% C]	Oduhličení na vnitřním průměru pro díly č.[μm]		
		1	3	5
3	0,6	48	100	48
4	0,6	42	35	41
5	0,2	76	61	74
6	0,2	59	29	64
8	0,6	43	65	66

Z hodnot oduhličení na vnějším a vnitřním průměru vidíme, že pouze varianta č. 4 splňuje požadavky maximálního oduhličení 50 μm . Dalšími variantami, u kterých dochází k mírnému překročení této hranice, jsou varianty č. 3, 6 a 8.

U těchto 4 variant ověříme, že nauhličení na vnějším průměru nepřekročí 150 μm , což je uvedeno v Tab. 28. U všech variant tepelného zpracování nedojde k překročení hranice nauhličení.

Tab. 28 Hloubka nauhličení na vnějším průměru pro varianty zpracování 3, 4, 6 a 8.

Varianta zpracování	Obsah uhlíku v atmosféře [% C]	Nauhličení na vnějším průměru pro díly č.[μm]		
		1	3	5
3	0,6	123	99	48
4	0,6	92	108	101
6	0,2	50	60	67
8	0,6	133	123	117

Porovnání vlivu kalících teplot

Zůstávají nám varianty tepelného zpracování s označením 3, 4, 6 a 8. Tyto varianty mají dvě různé teploty kalení. Při kalení je důležité, aby teplota kalení ležela 30 až 50 °C nad teplotu A₃, to je u teploty kalení 850 °C dodrženo. Je-li teplota kalení vyšší, tj. 890 °C, může dojít k růstu austenitického zrna, jehož důsledkem je zhoršení mechanických vlastností oceli. Dochází-li při kalení za teploty 890 °C ke změně mechanických vlastností je znázorněno v Tab. 29. Pro vyhodnocení jsou použita data pořízená z tahové zkoušky, které jsou k dispozici v příloze 5.

Tab. 29 Porovnání mechanických vlastností materiálu při kalení z teploty 850 a 890 °C

Varianta zpracování	Teplota kalení [°C]	Modul pružnosti E [GPa]	Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]
3	850	152	1495	1778
4		149	1493	1639
6	890	189	1436	1651
8		178	1441	1649

Tyto data mechanických vlastností materiálu jsou průměrem ze 3ří trubek, které byly umístěny při tepelném zpracování na gestellu. Z těchto výsledků vyplývá, že vlivem vyšší teploty kalení nedochází k výraznému zhoršení mechanických vlastností materiálu a při zpracování lze použít teplotu kalení v rozmezí min. 850 °C a max. 890 °C. Pouze při kalení 890 °C dochází k růstu modulu pružnosti E.

7.2.3 Doporučené parametry tepelného zpracování neshodného materiálu

Hlavním požadavkem pro zpracování neshodného materiálu je, že všechny díly umístěné na gestellu budou vykazovat podobné vlastnosti a spolehlivost bez výrazných odchylek. Vzhledem k této podmínce jsou navrženy parametry, které navrátí neshodnému materiálu požadované vlastnosti.

První faktor ovlivňující vlastnosti materiálu je teplota kalení. Z výsledků je zřejmé, že zvyšující teplota kalení nemá významný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Vezmeme-li v úvahu, že každá dodaná šarže materiálu nemá naprosto stejné chemické složení, mechanické vlastnosti a chování při tepelném zpracování se také liší, tak v některých případech může nastat, že vlivem zvýšené teploty kalení dojde zhoršení mechanických vlastností

dílů. Abychom tento faktor vyloučili, je zvolena doporučená teplota kalení od 850 °C do 870 °C.

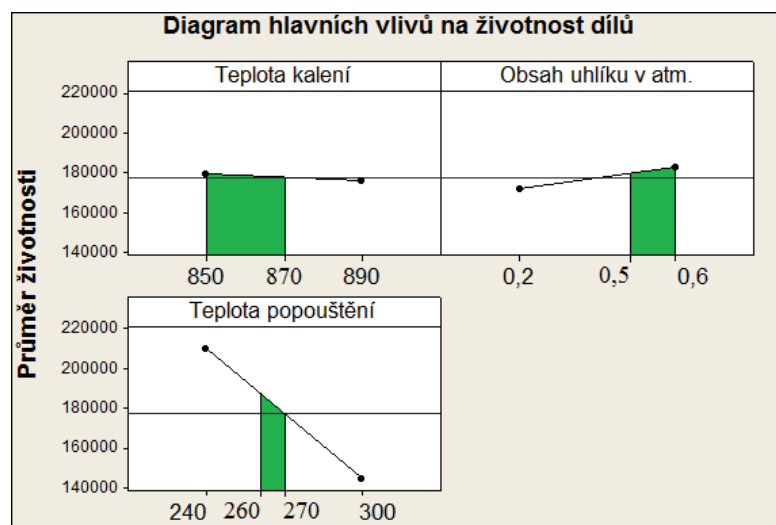
Dalším faktorem ovlivňující výsledné vlastnosti materiálu je obsah uhlíku atmosféry v kalící peci. Tento faktor ovlivňuje oduhlíčení na vnitřním a vnějším průměru. Vliv obsahu uhlíku je výrazný především na vnějším průměru, kdy s jeho vyšší hodnotou dochází ke snížení oduhlíčení. Z těchto důvodů je doporučené nastavení obsahu uhlíku v peci v intervalu od 0,5 % C do 0,6 % C.

Posledním faktorem je popouštěcí teplota, které z uvedených výsledků významně ovlivňuje tvrdost dílů a jejich životnost. Při vyšší teplotě popouštění dochází u dílů k výraznému snížení tvrdosti, ale také klesá jejich životnost a při nižší teplotě popouštění je tomu právě naopak. Abychom docílili rovnováhy mezi těmito parametry, je doporučená teplota popouštění v intervalu od 260 °C do 270 °C.

Doporučené parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v Tab. 30. Tyto doporučené parametry jsou zobrazeny i v diagramu hlavních vlivů, kde jsou faktory tepelného zpracování vyobrazeny v závislosti na životnosti dílů (Obr. 83).

Tab. 30 Doporučené parametry tepelného zpracování neshodného materiálu

Kalící pec		Popouštěcí pec
Teplota kalení / výdrž na této teplotě [°C/min]	Obsah uhlíku v atmosféře [% C]	Teplota popouštění / výdrž na této teplotě [°C/min]
min. 850 / 5	min. 0,5	min. 260 / 40
max. 870 / 5	max. 0,6	max. 270 / 40



Obr. 83 Diagram hlavních vlivů na životnost dílů

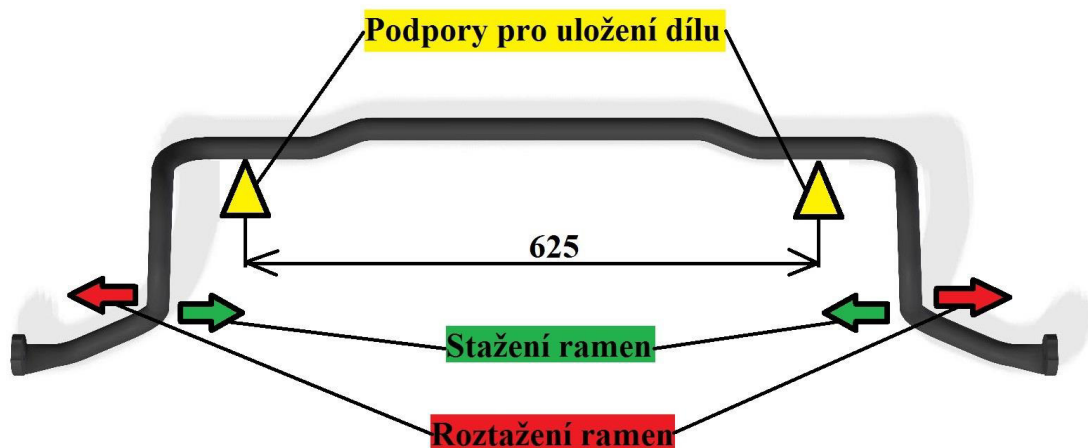
8 TVAROVÉ ZMĚNY V DŮSLEDKU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ

Během procesu tepelného zpracování dochází ke tvarovým změnám dílů, jejichž tvar se následně kontroluje a upravuje při operaci rovnání. Operace rovnání je zařazena ve výrobním postupu pružných prvků pouze u projektů, které se tepelně zpracovávají.

Tento experiment je prováděn v rámci kap. 7.1, tj. Snížení popouštěcích časů na minimum. Při aplikaci výsledků z této kapitoly do výroby chceme zjistit, jak se tvar dílu chová při různých časech popouštění z důvodu, aby při následující operaci rovnání nedošlo k výraznému zvýšení času rovnání jednoho dílu vlivem toho, že díl bude více tvarově deformován.

8.1 Metodika experimentu

Naohýbané díly jsou umístěny na gestell, jehož tvar je navržen tak, aby docházelo k co nejmenším tvarovým změnám. Vzdálenost mezi podporami pro uložení dílu je 625 mm. Kontrola umístění dílu se provádí vizuálně a závisí především na zkušenostech obsluhy kalící linky. Při tomto experimentu je pro nás důležité získat představu, jestli se ramena pružného prvku během tepelného zpracování stahují nebo roztahují (Obr. 84).



Obr. 84 Chování dílů během tepelného zpracování

8.1.1 Měření tvaru před tepelným zpracováním

Než dojde k tepelnému zpracování gestellu na kalící lince, vybereme díly, které budou podrobeny měření jejich tvaru před tepelným zpracováním. Gestell zaplníme díly, které jsou po operaci ohýbání připraveny na proces tepelného zpracování a díly námi určené jsou vybrány pro měření. Jelikož tento experiment se provádí v rámci kap. 7.1, tak jsou z gestellu vybrány díly 1-6 určené pro laboratoř (Obr. 53), tj. označeny červeně.

Tyto díly jsou podrobeny měření na oddělení metrologie. Měření se provádí na měřícím centru PRISMO Navigator 7, jehož technická specifikace je uvedena v Tab. 31. Díly jsou uloženy na speciálně upravené přípravky tak, aby byla simulována přesná poloha pružného prvku v automobilu (Obr. 85).

Tab. 31 Technická specifikace měřícího centra PRISMO Navigator 7.

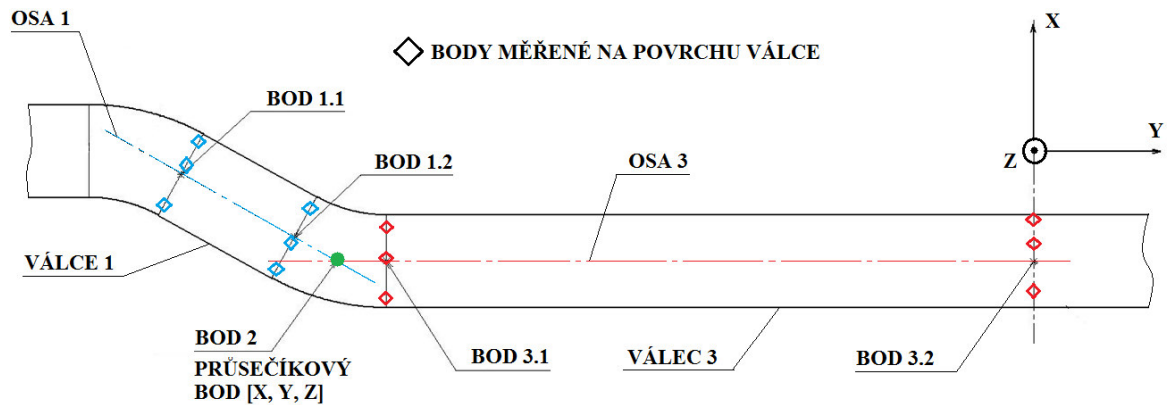
Výrobce	Carl Zeiss
Maximální rozměry snímacích os X / Y / Z	900 / 1800 / 700 mm
Maximální hmotnost měřeného dílu	2950 kg
Reálná chyba při měření [μm]	$U_1 = 2,2 + L/300$ (v ose) $U_2 = 2,7 + L/300$ (v prostoru)



Obr. 85 Měření tvaru dílu

Měření provádí kvalifikovaní pracovníci oddělení metrologie a měří se tvar dílu po celé jeho délce. Během měření se vyhodnocuje tvar dvěma způsoby. Prvním hodnocením tvaru je určení polohy os jednotlivých válců, které tvoří tvar pružného prvku, jejichž naměřená hodnota je porovnána s hodnotami horní a dolní tolerance.

Pro náš experiment použijeme data z druhého hodnocení tvaru, tj. měřením tzv. průsečíkových bodů (Obr. 86). Změřením bodů na povrchu válce a vyhodnocením softwaru dostaneme body 1.1 a 1.2, které nám určí polohu osy 1. Toto provedeme i u válce 3, získáme body 3.1, 3.2 a dostaneme polohu osy 3. Pomocí výpočtového softwaru dostaneme průsečíkový bod 2 o souřadnicích X, Y, Z, ve kterém se osy navzájem protínají. Takto získané body nám poslouží pro vyhodnocení tvarových změn v důsledku tepelného zpracování.



Obr. 86 Hodnocení tvaru dílu pomocí průsečkových bodů

Změřené díly jsou vráceny na své pozice na gestell, který je připraven k tepelnému zpracování na kalící lince.

8.1.2 Nastavení procesu tepelného zpracování

Plně naložený gestell je zkontrolován a umístěn obsluhou linky na nakládací stanoviště. Obsluha kalící linky nastaví parametry tepelného zpracování a vpustí vsázku na kalící linku. Parametry tepelného zpracování jsou shodné s experimentem prováděným v kap. 7.1 a jsou uvedeny v Tab. 32.

Tab. 32 Parametry tepelného zpracování – tvarové změny dílů

Vsázka č.	Kalící pec		Popouštěcí pec
	Teplota kalení / výdrž na této teplotě [°C/min]	Obsah uhlíku v atmosféře [% C]	Teplota popouštění / výdrž na této teplotě [°C/min]
1	850 / 5	0,6	280 / 35
2			280 / 30
3			280 / 25

Vsázka projede kalící linkou, je odložena na vykládací stanoviště a obsluhou je odvezena. Z takto zpracované vsázky, jsou díly složeny do připravených beden a díly určené pro laboratoř jsou vyjmuty a označeny, aby nedošlo k jejich zamíchání a ztrátě.

8.1.3 Měření tvaru po tepelném zpracování

Z gestellu jsou vybrány díly 1-6 určené pro laboratoř (označeny červeně) a následně jsou podrobeny měření tvaru stejně jako v kap. 8.1.1 s tím rozdílem, že nyní jsou díly tepelně

zpracovány. K zjištění jak se díly během tepelného zpracování chovají, porovnáme data před a po tepelném zpracování, což bude uvedeno níže v kap. 8.2.

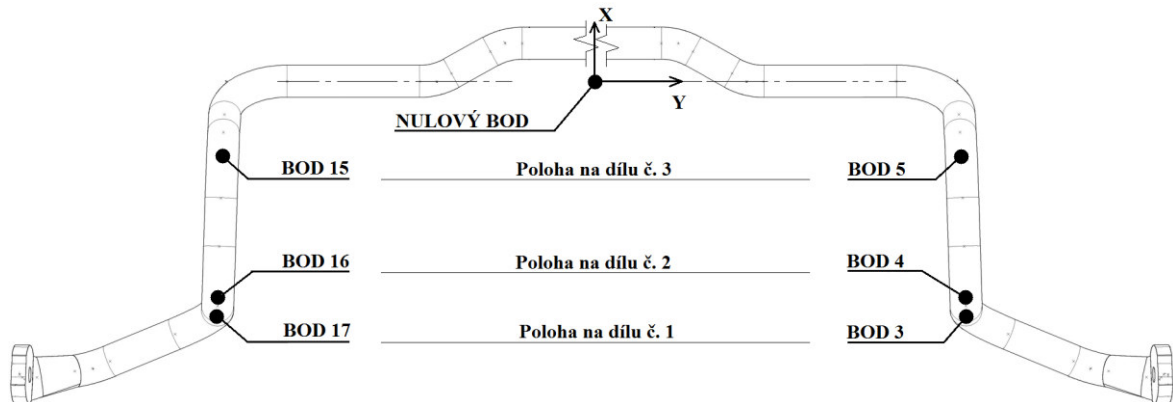
8.1.4 Měření tvaru dílů po rovnání

U vsázky č. 1 je provedeno měření tvaru tepelně zpracovaných dílů i po operaci rovnání. Rovnání je operace, která následuje po každém tepelném zpracování, abychom dílům navrátily požadovaný tvar. Tato operace je již popsána detailně v kap. 7.1.1.

Po operaci rovnání jsou díly 1-6 umístěny na oddělení metrologie, kde dojde k jejich měření tvaru stejně jako v kap. 8.1.1.

8.2 Vyhodnocení výsledků

Pro vyhodnocení změn tvaru budou použity průsečíkové body na ramenou dílu. Tyto body mají dané souřadnice v ose X, Y a Z (Obr. 87), ale v našem případě vyhodnocujeme pouze souřadnice bodu v ose Y. Pomocí těchto bodů určíme tvarové chování ramen dílu při různých časech popouštění.



Obr. 87 Vyhodnocované body dílu

Tvarové změny dílů při čase popouštění 35 min

V následující Tab. 33 jsou vyobrazeny tvarové změny při čase popouštění 35 min. Zobrazení je vytvořeno pomocí dvou grafů znázorňujících levé a pravé rameno dílu. Jelikož jsme měřili tvar u 6 dílů, tak jsou tyto díly uspořádány podle pozice na gestellu. Naměřené hodnoty souřadnic bodů jsou k dispozici v příloze 7.

Tab. 33 Tvarové změny dílů při čase popouštění 35 min

Pozice na gestellu	Levé rameno dílu	Pravé rameno dílu
1	<p>Graph 1 Left: Position vs. Distance from zero point for the left arm of part 1. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from -366 to -356 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show an upward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>	<p>Graph 1 Right: Position vs. Distance from zero point for the right arm of part 1. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from 356 to 366 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show a downward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>
2	<p>Graph 2 Left: Position vs. Distance from zero point for the left arm of part 2. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from -366 to -356 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show an upward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>	<p>Graph 2 Right: Position vs. Distance from zero point for the right arm of part 2. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from 356 to 366 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show a downward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>
3	<p>Graph 3 Left: Position vs. Distance from zero point for the left arm of part 3. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from -366 to -356 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show an upward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>	<p>Graph 3 Right: Position vs. Distance from zero point for the right arm of part 3. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from 356 to 366 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show a downward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>
4	<p>Graph 4 Left: Position vs. Distance from zero point for the left arm of part 4. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from -366 to -356 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show an upward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>	<p>Graph 4 Right: Position vs. Distance from zero point for the right arm of part 4. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from 356 to 366 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show a downward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>
5	<p>Graph 5 Left: Position vs. Distance from zero point for the left arm of part 5. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from -366 to -356 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show an upward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>	<p>Graph 5 Right: Position vs. Distance from zero point for the right arm of part 5. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from 356 to 366 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show a downward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>
6	<p>Graph 6 Left: Position vs. Distance from zero point for the left arm of part 6. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from -366 to -356 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show an upward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>	<p>Graph 6 Right: Position vs. Distance from zero point for the right arm of part 6. Shows 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares) curves. The x-axis ranges from 356 to 366 mm, and the y-axis ranges from 1 to 3. Both curves show a downward trend, with 'Po TZ' being lower than 'Před TZ'.</p>

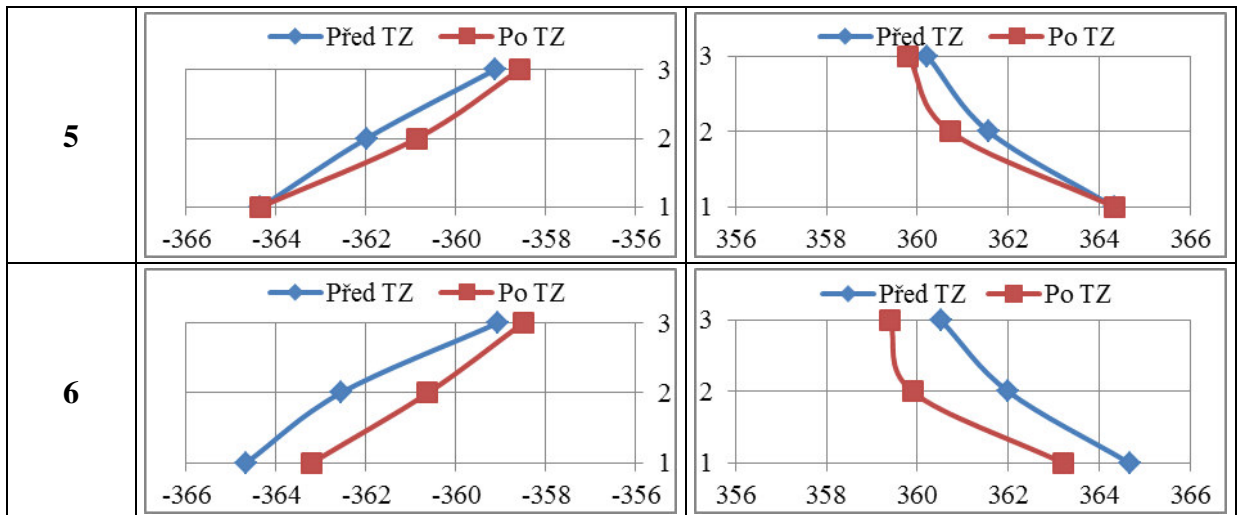
Z grafů jednoznačně vyplývá, že při čase popouštění 35 min dochází u dílů ke stažení ramen po tepelném zpracování. Průměrný rozdíl vzdáleností před a po tepelném zpracování je 2,737 mm se směrodatnou odchylkou 1,664 mm.

Tvarové změny dílů při čase popouštění 30 min

Další hodnocení změn tvaru je uvedeno v Tab. 34, kde jsou tyto změny ovlivňovány popouštěním po dobu 30 min. Naměřené hodnoty souřadnic bodů jsou k dispozici v příloze 8.

Tab. 34 Tvarové změny dílů při čase popouštění 30 min

Pozice na gestlu	Levé rameno dílu	Pravé rameno dílu
1	<p>Graph 1 Left Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from -366 to -356 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear increase from approximately -364.5 mm at position 1 to -358.5 mm at position 3. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 1, from approximately -364.5 mm to -364.0 mm.</p>	<p>Graph 1 Right Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from 356 to 366 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear decrease from approximately 360.5 mm at position 3 to 364.5 mm at position 1. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 3, from approximately 360.5 mm to 360.0 mm.</p>
2	<p>Graph 2 Left Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from -366 to -356 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear increase from approximately -364.5 mm at position 1 to -358.5 mm at position 3. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 1, from approximately -364.5 mm to -364.0 mm.</p>	<p>Graph 2 Right Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from 356 to 366 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear decrease from approximately 360.5 mm at position 3 to 364.5 mm at position 1. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 3, from approximately 360.5 mm to 360.0 mm.</p>
3	<p>Graph 3 Left Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from -366 to -356 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear increase from approximately -364.5 mm at position 1 to -358.5 mm at position 3. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 1, from approximately -364.5 mm to -364.0 mm.</p>	<p>Graph 3 Right Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from 356 to 366 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear decrease from approximately 360.5 mm at position 3 to 364.5 mm at position 1. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 3, from approximately 360.5 mm to 360.0 mm.</p>
4	<p>Graph 4 Left Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from -366 to -356 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear increase from approximately -364.5 mm at position 1 to -358.5 mm at position 3. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 1, from approximately -364.5 mm to -364.0 mm.</p>	<p>Graph 4 Right Arm: Distance from zero point [mm] vs Position on part. The x-axis ranges from 356 to 366 mm. The y-axis ranges from 1 to 3. Two data series are shown: 'Před TZ' (blue diamonds) and 'Po TZ' (red squares). The 'Před TZ' series shows a linear decrease from approximately 360.5 mm at position 3 to 364.5 mm at position 1. The 'Po TZ' series shows a similar trend but with a significant decrease in distance at position 3, from approximately 360.5 mm to 360.0 mm.</p>

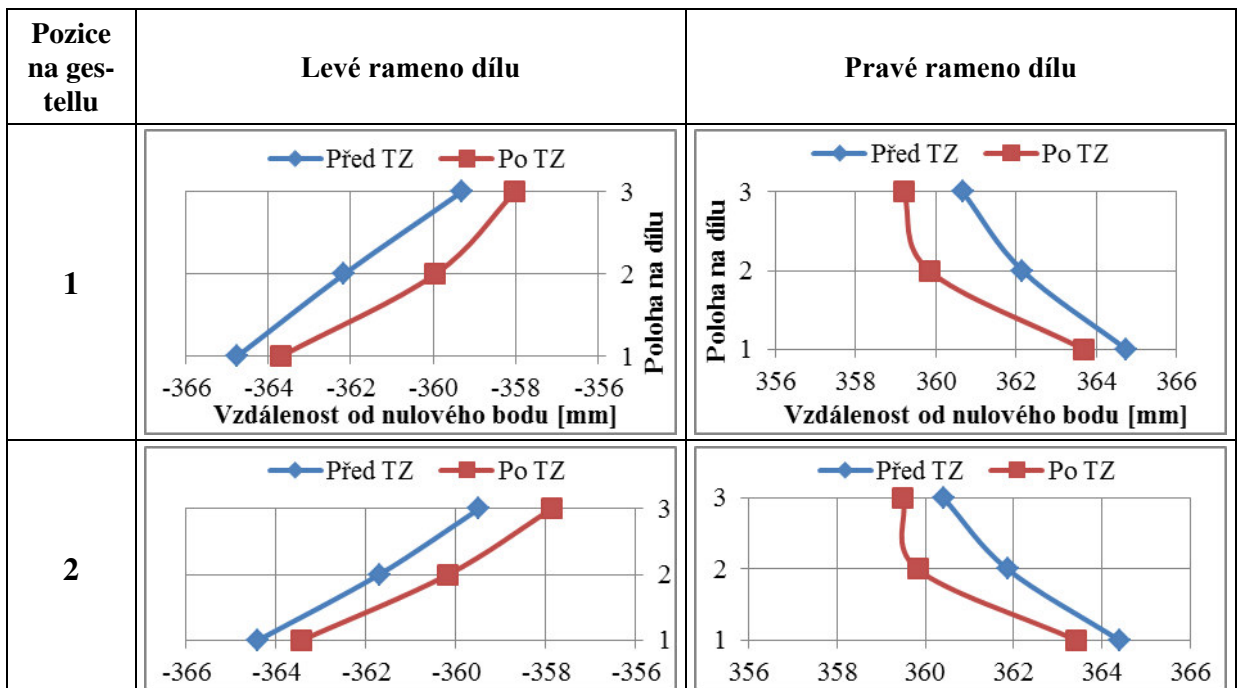


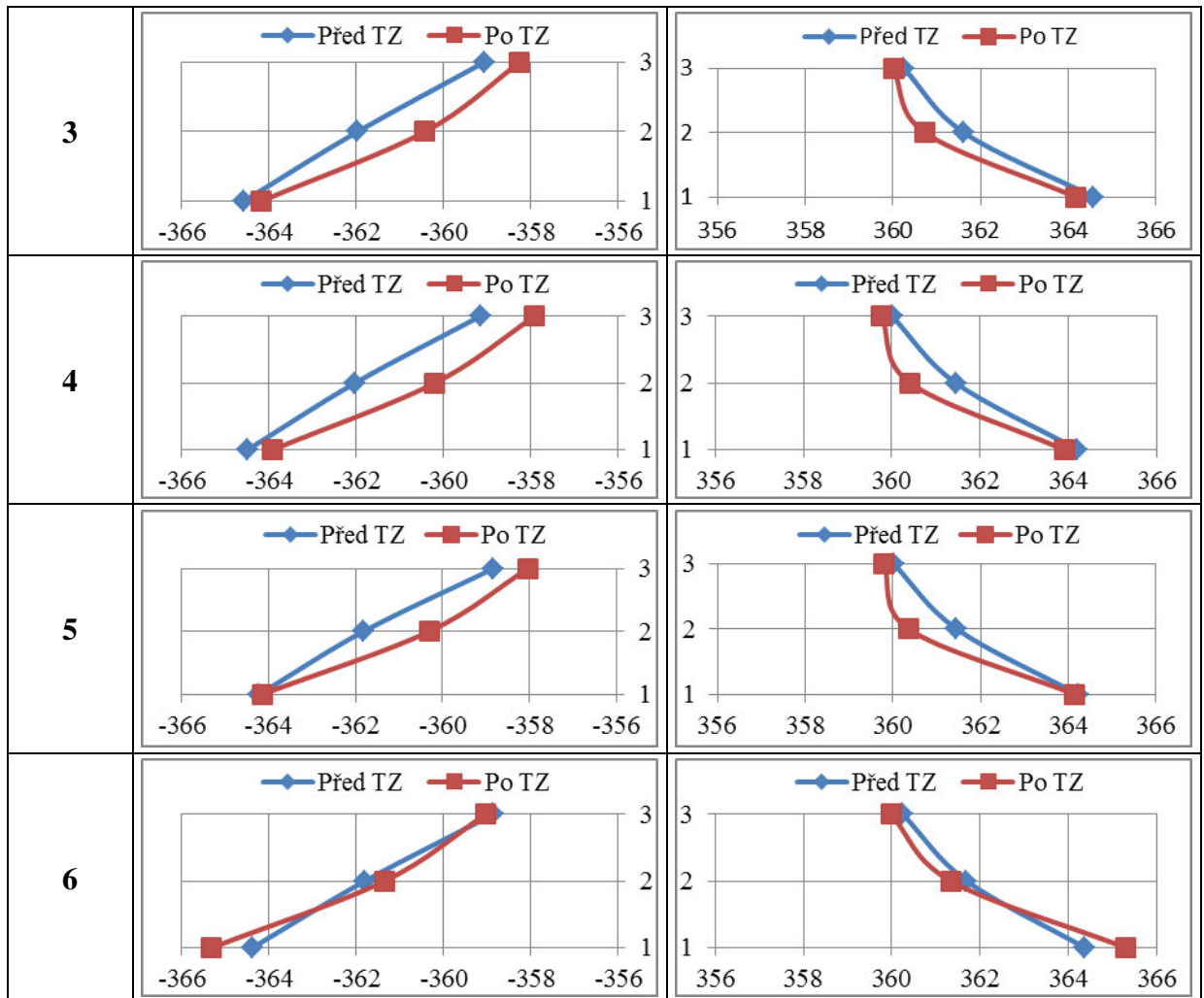
Při času popouštění 30 stále dochází ke stažení ramen dílů, ale průměrný rozdíl vzdáleností před a po tepelném zpracování je nižší a to 1,939 mm se směrodatnou odchylkou 1,584 mm.

Tvarové změny dílů při čase popouštění 25 min

Tvarové změny při nejkratším čase popouštění 25 min jsou uvedeny a vyhodnoceny v Tab. 35. Naměřené hodnoty souřadnic bodů jsou k dispozici v příloze 9.

Tab. 35 Tvarové změny při čase popouštění 25 min



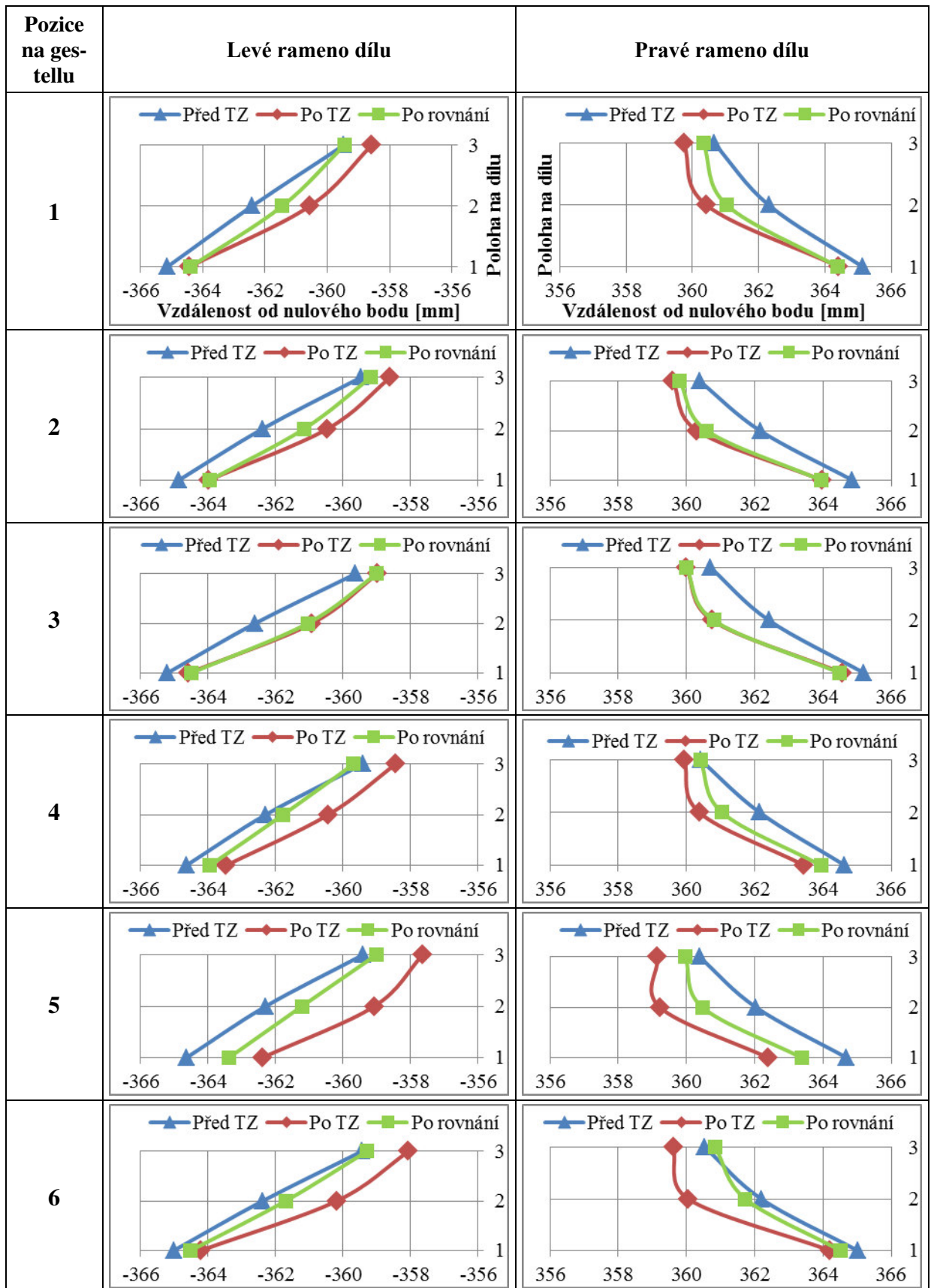


Při čase popouštění 25 min stále dochází ke stažení ramen dílů, ale průměrný rozdíl vzdáleností před a po tepelném zpracování je nižší než u popouštění 30 min. Tedy průměrná hodnota rozdílu vzdáleností před a po tepelném zpracování je 1,692 mm se směrodatnou odchylkou 1,485 mm.

Tvarová změny při čase popouštění 35 min a po operaci rovnání

Zde porovnáváme tvar dílů po tepelném zpracování při čase popouštění 35 min s tvarem dílů po rovnání. Porovnání tvaru po tepelném zpracování a rovnání je uvedena v Tab. 36. Naměřené hodnoty souřadnic bodů jsou k dispozici v příloze 7.

Tab. 36 Tvarové změny při čase popouštění 35 a po operaci rovnání

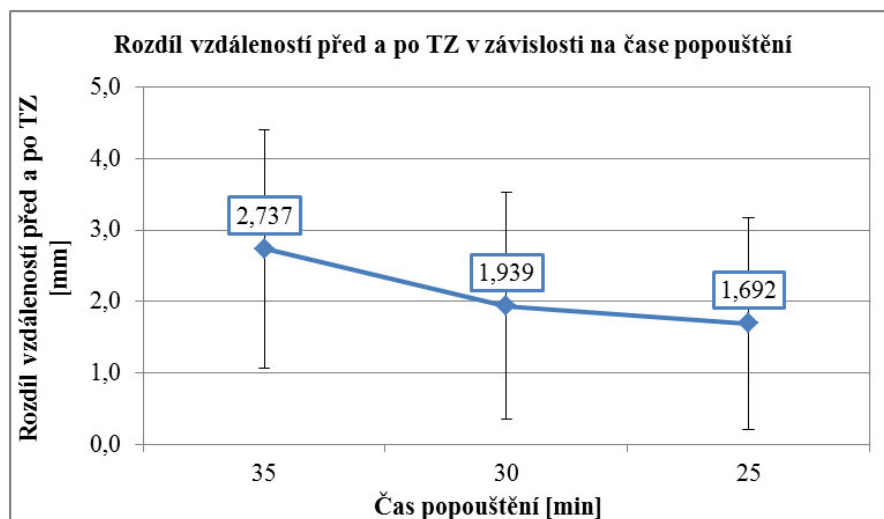


Při porovnání tvaru po tepelném zpracování při času popouštění 35 min s tvarem dílů po rovnání vidíme, že operací rovnání dochází k roztažení ramen dílů a tedy operace rovnání slouží k částečnému navrácení požadovaného tvaru dílů. Průměrný rozdíl vzdáleností před a po rovnání je 1,285 mm se směrodatnou odchylkou 1,117 mm.

8.3 Vliv tepelného zpracování na tvarové změny dílů

Při tepelném zpracování byly nastaveny různé parametry časů popouštění. Vzhledem k těmto parametrům popouštění byl porovnáván tvar před a po tepelném zpracování tak, abychom mohli určit, zda vlivem snížení popouštěcích časů nedojde ke zvýšení tvarových změn dílů a tedy i zvýšení času při rovnání dílů na požadovaný tvar.

Z výsledků experimentu v předešlé kapitole můžeme porovnat průměrné rozdíly vzdáleností před a po tepelném zpracování, které jsou zobrazeny na Obr. 88.



Obr. 88 Rozdíly vzdáleností při různých časech popouštění

Z výsledků a grafu vidíme, že vlivem snížení popouštěcích časů nedochází ke zvýšení tvarových změn dílů a tedy i při operaci rovnání nedojde ke zvýšení času na úpravu tvaru dílu, což je vyhovující. Dokonce při snížení popouštěcích časů se snižují tvarové změny dílů, což je způsobeno kratším působením teploty, při které se méně uvolňují vnitřní napětí a deformace krystalové mřížky. Zvýší-li se produktivita popouštěcích pecí a zároveň kalicí linky vlivem snížení popouštěcích časů, nedojde k navýšení časů na rovnání dílů vlivem tvarových změn.

9 SHRNUTÍ

S neustálým růstem výroby automobilů také roste tlak na dodavatele jednotlivých součástí, aby dokázali udržet krok s tímto trendem. Proto jsou firmy nuceny analyzovat a zlepšovat své výrobní procesy za účelem zvýšení výrobní produktivity jednotlivých součástí. Tento požadavek je hlavním bodem této diplomové práce. Práce zaměřena na optimalizaci a intenzifikaci procesu tepelného zpracování pružných prvků, které jsou v současné době nedílnou součástí většiny osobních automobilů.

V teoretické části diplomové práce je uvedena funkce a výrobní proces pružných prvků. Dále jsou popsány způsoby a principy tepelného zpracování ocelí, uvedeny materiály vhodné pro výrobu pružných prvků a metody, pomocí kterých jsou vyhodnocovány výsledné vlastnosti dílů a jejich chování.

Hlavním cílem v praktické části bylo dosažení zvýšení produktivity na kalící lince v důsledku snížení popouštěcích časů na minimum. Z výsledku experimentů je zřejmé, že snížení času popouštění je použitelné pouze při čase 35 min a to z důvodu, že při tomto čase popouštění všechny díly na gestellu dosahují podobných vlastností bez výrazných odchylek. Z hlediska zvýšení produktivity na kalící lince, je nejvýhodnější použití tohoto nastavení pro projekty s materiálem typu A. Nezbytným předpokladem pro zvýšení produktivity na kalící lince je, že bude k dispozici dostatečné množství materiálu, nebude docházet k častým poruchám na jednotlivých zařízeních a při obsluze linky budou k dispozici alespoň 4 pracovníci, kteří zabezpečí její nepřetržitý a plynulý chod.

V rámci snížení popouštěcích časů bylo hodnoceny tvarové změny dílů před a po tepelném zpracování. Z výsledků vyplývá, že při snižování časů popouštění dochází k menším tvarovým změnám a při aplikaci času popouštění 35 min nedojde k výraznému zhoršení tvarové úpravy dílů na operaci rovnání, která následuje bezprostředně po tepelném zpracování.

V rámci praktické části práce byl také proveden experiment, při kterém pomocí nastavení vhodných parametrů tepelného zpracování navrátíme neshodnému materiálu požadované vlastnosti. Zde bylo potřeba dosáhnout u dílů takových vlastností, které byly podobné s co nejmenší odchylkou. Tuto podmínka byla splněna pouze u varianty č. 4, ale vzhledem k nastaveným parametrům, které obsahovali pouze extrémní hodnoty tepelného zpracování, byly parametry na základě získaných výsledků upraveny. Tedy parametry tepelného

zpracování pro neshodný materiál jsou teplota kalení od 850 °C do 870 °C, obsah uhlíku atmosféry v kalící peci od 0,5 % C do 0,6 % C a teplota popouštění od 260 °C do 270 °C.

ZÁVĚR

Diplomová práce je výsledkem 1 ročního působení ve firmě, která se zabývá výrobou pružných prvků. V rámci této spolupráce byly provedeny všechny navrhnuté experimenty potřebné pro optimalizaci a intenzifikaci tepelného zpracování na kalící lince. Pro získání představy o chování materiálu v rámci procesu na kalící lince bylo během této doby zpracováno celkem 15 gestellů s díly, které byly dále měřeny a zkoumány na konkrétních odděleních. Část dílů byla dále zhotovena přímo v sériové výrobě, abychom mohli vyhodnotit jejich chování při dynamickém testování. Bylo tedy nezbytné se seznámit s principy výrobních operací, pomocí kterých se dosahuje u pružných prvků požadovaného tvaru a vlastností z důvodu, aby nedošlo k znehodnocení dílů potřebných pro účely diplomové práce. Zaměřením na celý výrobní proces s ohledem na tepelné zpracování, přípravu a provedení jednotlivých experimentů, byla pro autora tato práce významným přínosem a zkušeností na základě, které mohou být řešeny další pracovní či životní výzvy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MUHR UND BENDER KG. *Mubea Akademie: Stabilizer bars*. 2013, 56 s.
- [2] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Články: Řízené kuličkování* [online]. 2011. vyd. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rizene-kulickovani.html>
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] PÍŠEK, František, Mojmír CENEK a Přemysl RYŠ. *Nauka o materiálu*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1957, 754 s.
- [5] CALLISTER, William D. *Materials science and engineering: an introduction*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007, xxv, 721, [82] s. ISBN 978-0-471-73696-7.
- [6] PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 549 s.
- [7] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000, 374 s. ISBN 80-7082-582-0.
- [8] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1. 3.*, přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. ISBN 80-7183-265-0.
- [9] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 391 s.
- [10] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 232 s. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [11] KAŠČENKO, Georgij Antonovič. *Základy nauky o kovech*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954, 557 s.
- [12] PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1977, 562 s.
- [13] KAŠTÁNEK, Otakar. *Strojírenské materiály a technologie*. 1. vyd. Brno: VUT, 1979, 308 s.

- [14] LUKOVICS, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie*. 1. vyd. Brno: VUT, 1992, 273 s. ISBN 8021403993.
- [15] POKLUDA, Jaroslav. *Mechanické a strukturní materiálové charakteristiky*. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 211 s.
- [16] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006, 185 s. ISBN 8070806001.
- [17] Autorevue: Audi zavádí do sériové výroby nové lehké pružiny. [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/audi-zavadi-do-seriove-vyroby-nove-lehke-pruziny>
- [18] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: Alfa, 1985, 401 s., 206 obr.
- [19] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006, 185 s. ISBN 8070806001.
- [20] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
- [21] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 80-7043-417-1.
- [22] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 8072041932.
- [23] MACHEK, Václav. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 157 s. ISBN 978-80-01-04683-8.
- [24] MLČOCH, Lubomír a Ivan SLIMÁK. *Řízení kvality a strojírenská metrologie*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 330 s.
- [25] MITUTOYO ČESKO S.R.O. *Informace o produktech: Souřadnicové měřicí stroje* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.mitutoyo.cz/ebook/index-cz.html#/609/>
- [26] DOLÁK, D. *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl.

- [27] *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/tp1_skripta.pdf. Skripta. Technická univerzita v Liberci.
- [28] Metrology World: Coordinate Measuring Machine Part 2. [online]. [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://www.3dmetrologyworld.net/coordinate-measuring-machine-part-2/>
- [29] Renishaw: Průmyslová metrologie. [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/1030.aspx#products>
- [30] Mubea: Muhr und Bender KG. MUBEA. [online]. 2013. vyd. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.mubea.com/cz/home/>
- [31] MUHR UND BENDER KG: Introduction of the Mubea group. [online]. 2013. vyd. [cit.2015-04-20]. Dostupné z: http://www.kokenliotomotiv.com/files/Hakkimizda_Mubea.pdf
- [32] IPSEN INTERNATIONAL GMBH. *AutoMag® 4.0: Uživatelská příručka*. 2011.
- [33] IPSEN INTERNATIONAL GMBH. *Návod k obsluze a údržbě: Víceúčelová komorová pec*. 2011.
- [34] IPSEN INTERNATIONAL GMBH. *Návod na obsluhu a údržbu: Generátor endoplynu*. 2011.
- [35] IPSEN INTERNATIONAL GMBH. *Návod na obsluhu a údržbu: Jednokomorová popouštěcí pec*. 2011.
- [36] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÉ V PRAZE. *Ústav počítačové a řídicí techniky: Měření teploty* [online]. 2001 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
F_0	[N]	síla působící na pružný prvek při jízdě dopředu
ΔF	[N]	síly působící na pružný prvek při po nerovnostech
S'	[Nmm]	moment, který vyrovnává naklápění vozidla
A_1	[°C]	teplota počátku vzniku zrn austenitu
A_3	[°C]	teplota konce přeměny austenitu podeutektoidní oceli
A_{cm}	[°C]	teplota konce přeměny austenitu nadeutektoidní oceli
M_s	[°C]	teplota začátku přeměny martenzitu
M_f	[°C]	teplota konce přeměny martenzitu
v_k	[°C/s]	kritická rychlost kalení
P_s	[°C]	teplota začátku přeměny perlitu
P_f	[°C]	teplota konce přeměny perlitu
B_s	[°C]	teplota začátku přeměny bainitu
B_f	[°C]	teplota konce přeměny bainitu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
F	[N]	síla zatěžující zkušební tyč
L_0	[mm]	počáteční délka zkušební tyče
L_u	[mm]	konečná délka tyče
S_0	[mm ²]	počáteční plocha příčného průřezu
S_u	[mm ²]	konečná plocha příčného průřezu
R	[MPa]	normálové napětí
ΔL	[mm]	absolutní prodloužení zkušební tyče
ε	[-]	poměrné prodloužení
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
R_U	[MPa]	mez úměrnosti
R_E	[MPa]	mez pružnosti
R_e	[MPa]	mez kluzu
F_{max}	[N]	maximální zatížení pře přetržením zkušební tyče
A	[%]	tažnost
Z	[%]	kontrakce

N_c	[-]	počet kmitů pro stanovení meze únavy
N	[-]	počet kmitů
T	[s]	doba jednoho kmitu
f	[Hz]	frekvence kmitů
σ_h	[MPa]	horní napětí kmitu
σ_n	[MPa]	dolní napětí kmitu
σ_m	[MPa]	střední napětí kmitu
σ_a	[MPa]	amplituda (výkmit) napětí
$t_{v1,2}$	[min/den]	poměrný čas daného materiálu ve výrobě
k	[-]	počet popouštěcích pecí
d	[hod]	hodin za 1 den
$t_{p1,2}$	[%]	podíl daného materiálu ve výrobě
$n_{1,2}$	[ge/den]	počet gestellů za den pro daný materiál
$t_{takt1,2}$	[ge/min]	průměrný takt popouštěcích pecí pro daný materiál na 1 gest.
t_p	[ge/min]	výrobní takt popouštěcích pecí na 1 gestell.
p_p	[ge/den]	produktivita popouštěcích pecí za 1 den.
$t_{př}$	[min]	čas na přepravu vsázky na vykládací stanoviště
$U_{1,2}$	[μm]	reálná chyba při měření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Části pružného prvku [1]	11
Obr. 2 Typy tvarů pružných prvků [1].....	12
Obr. 3 Při jízdě dopředu [1]	12
Obr. 4 Při jízdě dopředu s nerovnostmi [1]	13
Obr. 5 Při jízdě zatáčkou [1].....	13
Obr. 6 Výrobní postup [1].....	14
Obr. 7 Linka na výrobu trubkového polotovaru [1].....	15
Obr. 8 Podstata tryskání [2]	16
Obr. 9 Formování konců [1]	17
Obr. 10 Kontrola tvaru dílů ve speciálním kalibru tzv. lehre	18
Obr. 11 Část rovnovážného diagramu Fe-Fe ₃ C [4]	19
Obr. 12 Schéma růstu zrna eutektoidní oceli; a – hrubozrné; b – jemnozrné [4]	20
Obr. 13 Oblasti výskytu hlavních druhů přeměn přechlazeného austenitu [3].....	21
Obr. 14 Schéma vzniku lamelárního perlitu [4]	21
Obr. 15 Lamelární perlit po izotermickém rozpadu za teploty; a – 700 °C, hrubý; b – 600 °C, jemný [4]	21
Obr. 16 Schéma vzniku bainitu [4].....	22
Obr. 17 Bainit po izotermickém rozpadu za teploty; a – 500 °C, horní; b – 250 °C, dolní [4]	23
Obr. 18 Martenzit v uhlíkových ocelích; a – 0,2 % C; b – 0,6 % C; c – 1,3 % C [4]	24
Obr. 19 Transformační diagramy; a – diagram IRA; b – diagram ARA [3]	25
Obr. 20 Kalicí teploty uhlíkové oceli [4].....	26
Obr. 21 Martenzitická struktura podeutektoidní oceli; a – správně zakalená (jemný martenzit); b – kalená z příliš vysoké teploty (hrubý martenzit) [4].....	26
Obr. 22 Ochlazovací křivky v uvedených prostředích [3].....	28
Obr. 23 Způsoby kalení; 1 – do studené lázně; 2 – lomené; 3 – termální; 4 - izotermické zušlechťování [3].....	30
Obr. 24 Vliv teploty na dobu popouštění na velikost vnitřního pnutí [4].....	32
Obr. 25 Mikrostruktura oceli; a – tetragonální martenzit (po zakalení); b - kubický martenzit (po popuštění na 150 °C) [4].....	33

Obr. 26 Mikrostruktura oceli popouštěné na teplotu; a – 300 °C; b – 400 °C; c – 550 °C; d – 700 °C [4].....	34
Obr. 27 Rozdělení ocelí [13].....	36
Obr. 28 Hlavní mechanické vlastnosti a prokalitelný průměr [12]	37
Obr. 29 Pružina automobilky Audi; a – kompozitní; b – ocelová [17]	40
Obr. 30 Příklady rovinného uspořádání vláken [3]	41
Obr. 31 Pracovní diagram zkoušky tahem; a – u měkkých uhlíkových ocelí; b – s výraznou mezí kluzu [21]	45
Obr. 32 Pracovní digramy tahové zkoušky dle druhu materiálu [21].....	47
Obr. 33 Zkouška tvrdosti podle Brinella [23].....	48
Obr. 34 Zkouška tvrdosti podle Rockwella; a – HRC indentorem je kužel; b – HRB indentorem je kulička [23]	48
Obr. 35 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [23]	49
Obr. 36 Wöhlerův diagram; a – lineární stupnice; b – logaritmická [21].....	50
Obr. 37 Kmit napětí [21].....	51
Obr. 38 Únavová trhлина; a – vznik; b - šíření [18]	53
Obr. 39 Únavový lom; a – makroskopický vzhled [18]; b – fotografie povrchu [5].....	54
Obr. 40 Souřadnicový měřicí stroj [25]	54
Obr. 41 Princip měření pomocí SMS [26].....	55
Obr. 42 Hlavní typy konstrukcí SMS [28].....	56
Obr. 43 Sondy s doteky na měření [29]	56
Obr. 44 Charakteristický tvar pružného prvku	59
Obr. 45 Diagram ARA pro materiál typu A	60
Obr. 46 Schéma kalící linky s jednotlivými zařízeními [32].....	61
Obr. 47 Těleso kalící pece [33].....	62
Obr. 48 Generátory endoplynu	63
Obr. 49 Popouštěcí pec; a – schéma [35]; b - fotografie	64
Obr. 50 Tvar dílu po operaci ohýbání.....	65
Obr. 51 Gestell pro vzorový projekt.....	66
Obr. 52 Uložení dílů a trubky na tahovou zkoušku na gestell.....	66
Obr. 53 Odebrané díly z gestellu	67
Obr. 54 Místo vyřezání vzorků pro laboratoř	68
Obr. 55 Proces rovnání; a – rovnací lehra; b – rovnání pomocí lisu	68

Obr. 56	Tváření konců; a – lisovací stroj; b – tvar před a po tváření	69
Obr. 57	Vnější tryskání; a – zavěšení dílů; b – tryskací zrno	69
Obr. 58	Vzhled povrchu před a po tryskání.....	70
Obr. 59	Zkouška kmitáním; a – princip; b – zkušební zařízení [1]	70
Obr. 60	Hloubka nauhličení na vnějším průměru dílů.....	71
Obr. 61	Hloubka oduhličení na vnitřním průměru dílů	72
Obr. 62	Příklad určení tvrdosti povrchu a jádra	73
Obr. 63	Tvrдость povrchu a jádra dílů.....	74
Obr. 64	Tvrдость povrchu při různých časech popouštění	74
Obr. 65	Závislost meze kluzu a kontrakce na čase popouštění	76
Obr. 66	Iniciace vzniku lomu u dílů s nízkou životností.....	77
Obr. 67	Životnost v závislosti na čase popouštění	77
Obr. 68	Zapojení termočlánku [36]	78
Obr. 69	Umístění senzorů; a – na díl; b – podle směru výroby	79
Obr. 70	Instalace dílů se snímači a chladicího boxu s dataloggerem	79
Obr. 71	Popouštění 40 min; a – křivky ohřevu dílů; b – teplota vzduchu v peci	80
Obr. 72	Popouštění 30 min; a – křivky ohřevu dílů; b – teplota vzduchu v peci	81
Obr. 73	Popouštění 25; a – křivky ohřevu dílů; b – teplota vzduchu v peci	82
Obr. 74	Úzké místo kalící linky.....	83
Obr. 75	Předčasný lom neshodného materiálu	87
Obr. 76	Nauhličení povrchu neshodného materiálu	88
Obr. 77	Hloubka oduhličení na vnitřním průměru	91
Obr. 78	Závislost teploty popouštění na tvrdost a životnost dílů	92
Obr. 79	Porovnání průběhů tvrdosti vůči teplotám popouštění.....	93
Obr. 80	Vliv popouštěcí teploty na tvrdost; a – povrchu; b – jádra.....	93
Obr. 81	Vliv obsahu uhlíku na nauhličení vnějšího průměru	94
Obr. 82	Vliv obsahu uhlíku na oduhličení průměru; a – vnějšího; b - vnitřního.....	94
Obr. 83	Diagram hlavních vlivů na životnost dílů	97
Obr. 84	Chování dílů během tepelného zpracování.....	98
Obr. 85	Měření tvaru dílů	99
Obr. 86	Hodnocení tvaru dílu pomocí průsečíkových bodů.....	100
Obr. 87	Vyhodnocované body dílu.....	101
Obr. 88	Rozdíly vzdáleností při různých časech popouštění.....	107

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení některých ušlechtilých konstrukčních ocelí k zušlechťování [12]	39
Tab. 2 Mechanické vlastnosti vláken a kompaktních materiálů [3]	41
Tab. 3 Vlastnosti vláken pro kompozity s polymerní matricí [3]	43
Tab. 4 Přehled reaktoplastů používaných jako matrice vláknových kompozitů [3]	43
Tab. 5 Mechanické vlastnosti použitého materiálu	60
Tab. 6 Hlavní technické údaje kalící pece [33]	62
Tab. 7 Hlavní technické údaje generátoru endoplynu [34]	63
Tab. 8 Hlavní technické údaje popouštěcí pece [35]	64
Tab. 9 Parametry tepelného zpracování – snížení popouštěcích časů	67
Tab. 10 Podmínky zkoušky kmitáním – snížení popouštěcích časů	70
Tab. 11 Hloubka nauhličení na vnějším průměru dílu	71
Tab. 12 Hloubka oduhličení na vnitřním průměru	72
Tab. 13 Tvrdost povrchu a v jádře	73
Tab. 14 Rozdíl mezi tvrdostí povrchu a jádra	75
Tab. 15 Průměrné hodnoty mechanických vlastností z tahové zkoušky	75
Tab. 16 Výsledky životnosti dílů	76
Tab. 17 Použitý datalogger a snímače teploty	79
Tab. 18 Parametry popouštění – měření vytápění popouštěcí pece	80
Tab. 19 Produktivita popouštěcích pecí pro projekty s mat. typu A	85
Tab. 20 Produktivita popouštěcích pecí pouze pro vzorový projekt	86
Tab. 21 Parametry tepelného zpracování – zpracování neshodného materiálu	89
Tab. 22 Podmínky zkoušky kmitání – zpracování neshodného materiálu	90
Tab. 23 Životnost dílů tepelně zpracovaného materiálu při sériových podmínkách	90
Tab. 24 Naměřené hodnoty pro materiál zpracovávaný při sériových podmínkách TZ	91
Tab. 25 Vliv popouštěcí teploty na tvrdost a životnost dílů	92
Tab. 26 Hloubka oduhličení na vnějším průměru pro varianty zpracování 3, 4, 5, 6 a 8.	95
Tab. 27 Hloubka oduhličení na vnitřním průměru pro varianty zpracování 3, 4, 5, 6 a 8.	95
Tab. 28 Hloubka nauhličení na vnějším průměru pro varianty zpracování 3, 4, 6 a 8.	95

Tab. 29 Porovnání mechanických vlastností materiálu při kalení z teploty 850 a 890 °C.....	96
Tab. 30 Doporučené parametry tepelného zpracování neshodného materiálu	97
Tab. 31 Technická specifikace měřicího centra PRISMO Navigator 7.....	99
Tab. 32 Parametry tepelného zpracování – tvarové změny dílů.....	100
Tab. 33 Tvarové změny dílů při čase popouštění 35 min.....	102
Tab. 34 Tvarové změny dílů při čase popouštění 30 min.....	103
Tab. 35 Tvarové změny při čase popouštění 25 min	104
Tab. 36 Tvarové změny při čase popouštění 35 a po operaci rovnání	106

SEZNAM PŘÍLOH

Označení	Název	Dostupnost
Příloha 1	Naměřené hodnoty vlastností materiálu při snížení popouštěcích časů s výsledky tahových zkoušek	ve vazbě
Příloha 2	Křivky teplot popouštění při snížení pop. časů	ve vazbě
Příloha 3	Diagram tepelného zpracování IPSEN při snížení popouštěcích časů	ve vazbě
Příloha 4	Naměřené hodnoty vlastností materiálu při zpracování neshodného materiálu	na CD
Příloha 5	Tahové zkoušky při zpracování neshodného materiálu	na CD
Příloha 6	Diagram tepelného zpracování IPSEN při zpracování neshodného materiálu	na CD
Příloha 7	Tvarové změny při čase popouštění 35 min	na CD
Příloha 8	Tvarové změny při čase popouštění 30 min	na CD
Příloha 9	Tvarové změny při čase popouštění 25 min	na CD

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------

Materialdaten:

Bezeichnung: 280/35
 Charge/Ident Nr.: 03592687
 Material: typ A
 Abmessung: 22,5x3,7 mm
 Zustand: vergütet

Problembeschreibung:

Kontrola materiálu při optimalizaci zušlechťování

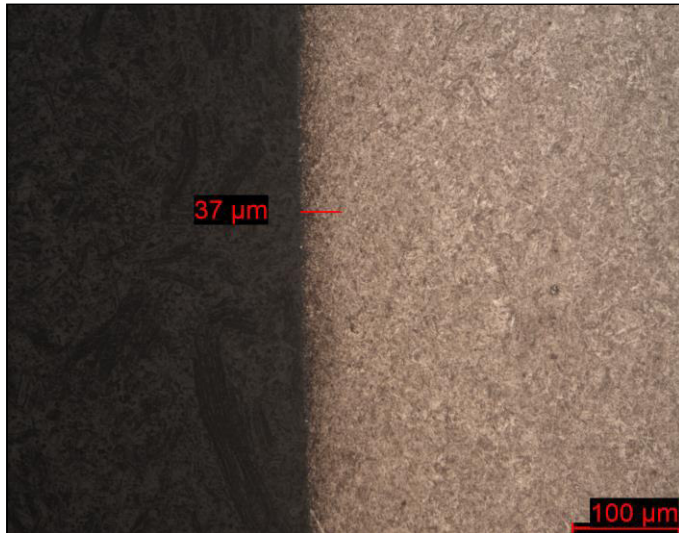
Untersuchungsergebnisse:

Strukturu tvoří popuštěný martenzit. Nauhličení vnějšího povrchu je metalograficky hůře zřetelné, potvrzují ho ale výsledky měření tvrdosti. Průměrné hodnoty materiálových charakteristik určené z výsledků tahové zkoušky jsou: $R_m = 1747$ MPa, $R_{p0,2} = 1199$ MPa, $Z = 22,8$ % a $A_5 = 19,5$ %. Výsledky z tahové zkoušky jsou orientační – u 2 vzorků ze 3 došlo k lomu v uchopovacích čelistech.

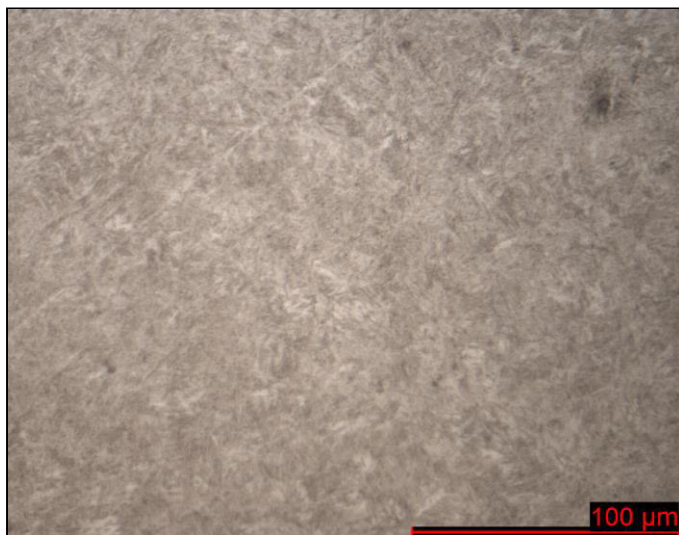
Tabelle 1: Aufkohlung/Entkohlung

Vzorek č.	Hloubka nauhličení (vnější průměr)	Hloubka oduhličení (vnější průměr)	Hloubka oduhličení (vnitřní průměr)
1	38 μm	-	max. 9 μm
2	84 μm	-	max. 7 μm
3	65 μm	max. 9 μm	max. 8 μm
4	83 μm	-	max. 8 μm
5	53 μm	max. 7 μm	max. 15 μm
6	53 μm	-	max. 7 μm

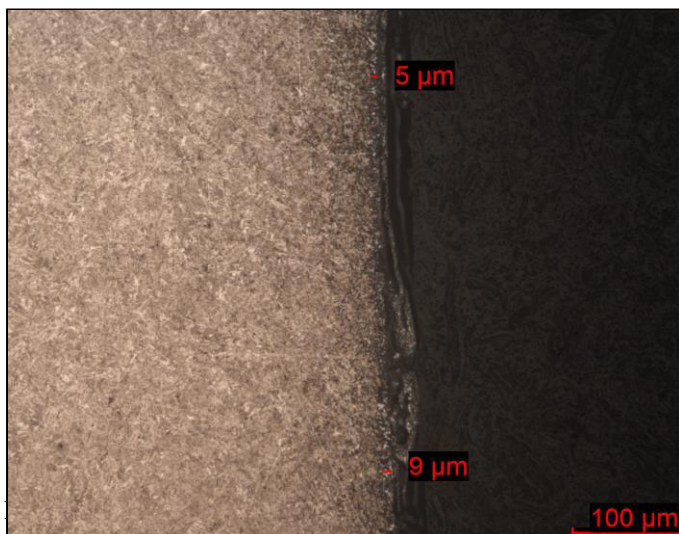
	<h2>Laborbericht</h2>	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	-----------------------	--------------------------------



Bildnummer: 1 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

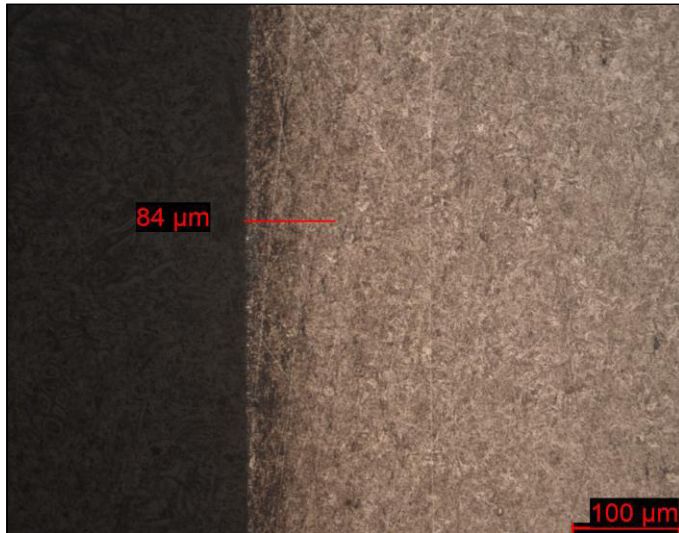


Bildnummer: 2 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

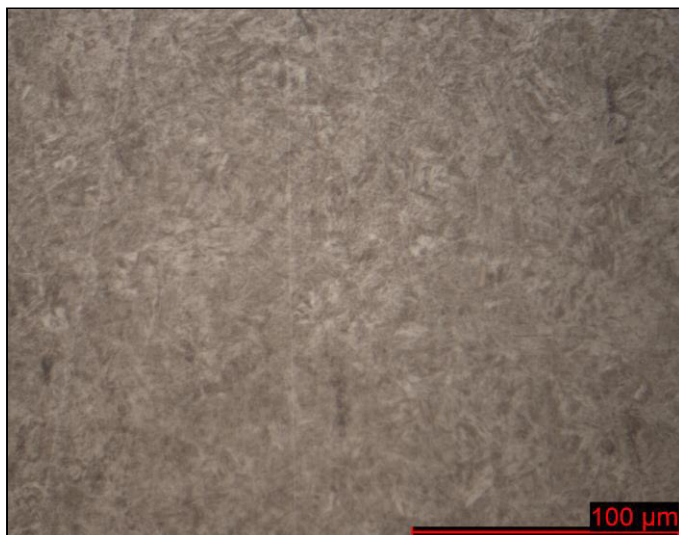


Bildnummer: 3 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	<h2>Laborbericht</h2>	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	-----------------------	--------------------------------



Bildnummer: 4 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schlifftyp: Querschliff
 Position: Rand außen

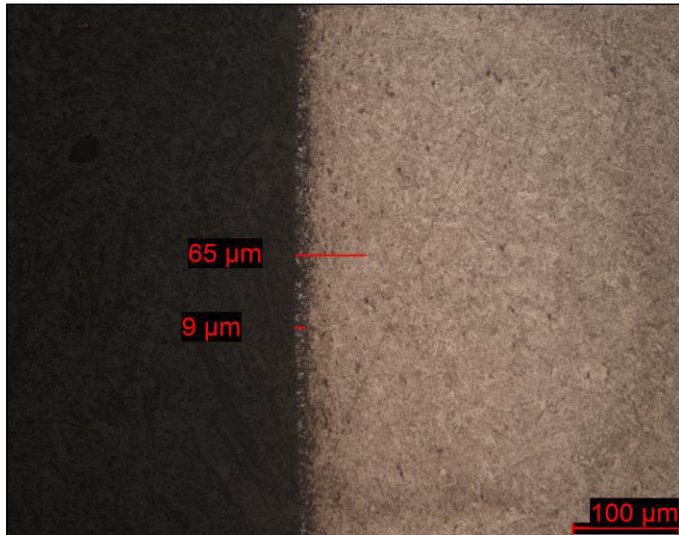


Bildnummer: 5 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schlifftyp: Querschliff
 Position: Mitte

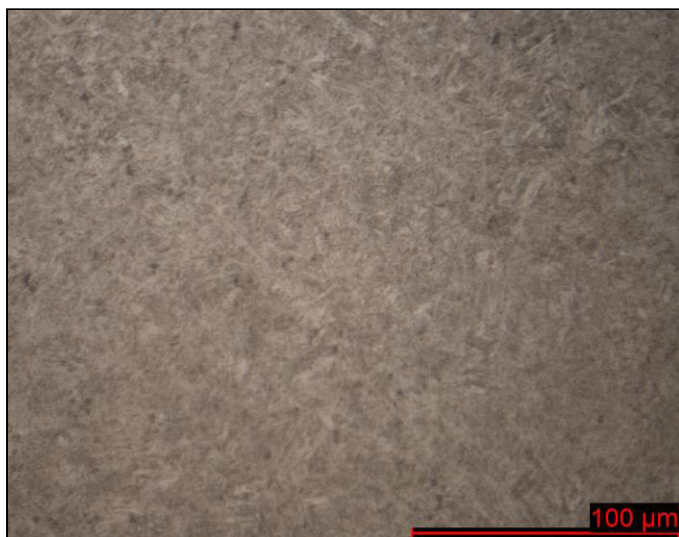


Bildnummer: 6 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schlifftyp: Querschliff
 Position: Rand innen

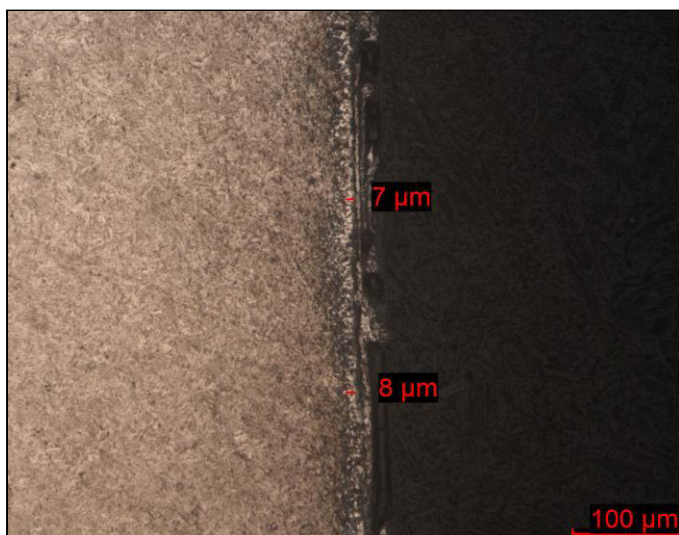
	<h2>Laborbericht</h2>	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	-----------------------	--------------------------------



Bildnummer: 7 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

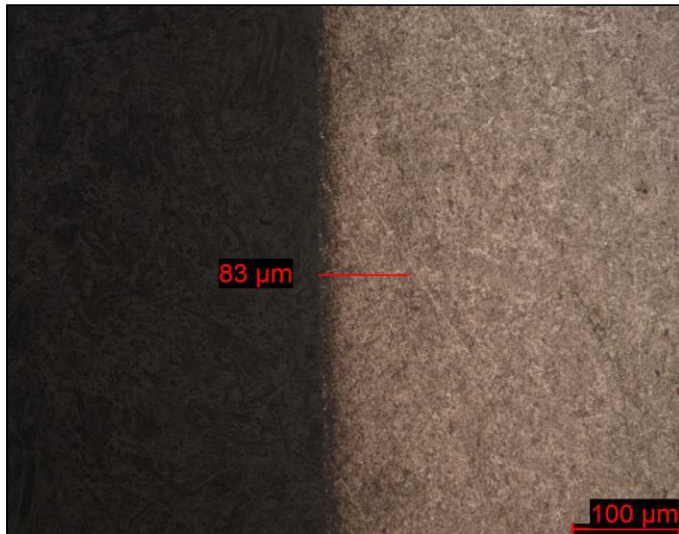


Bildnummer: 8 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

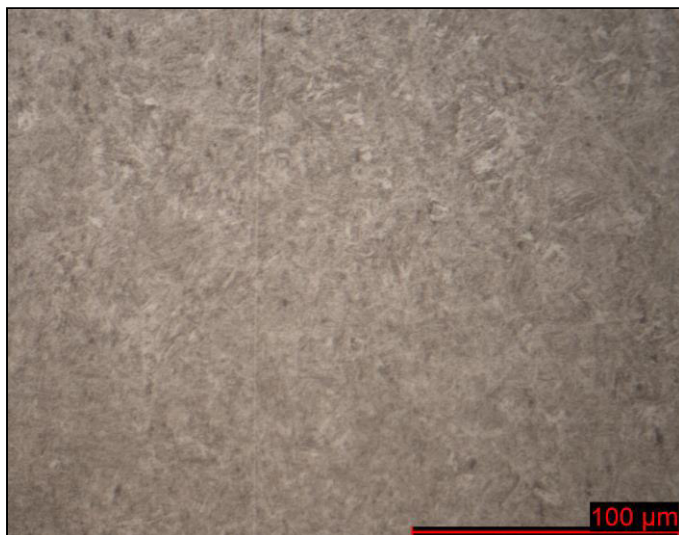


Bildnummer: 9 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

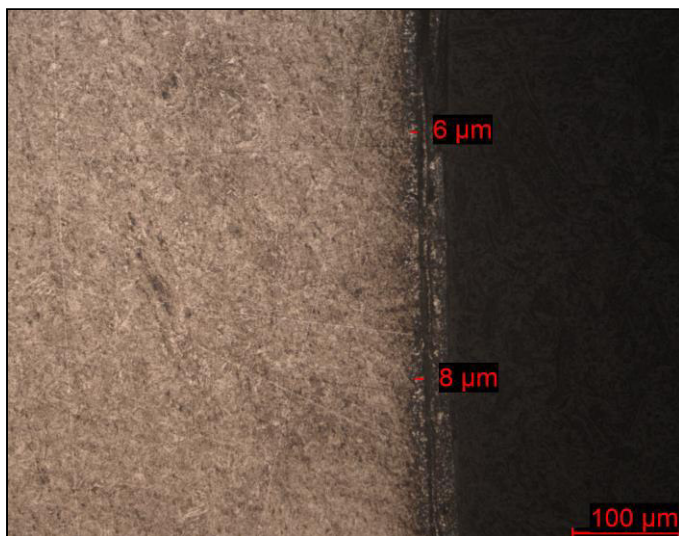
	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 10 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

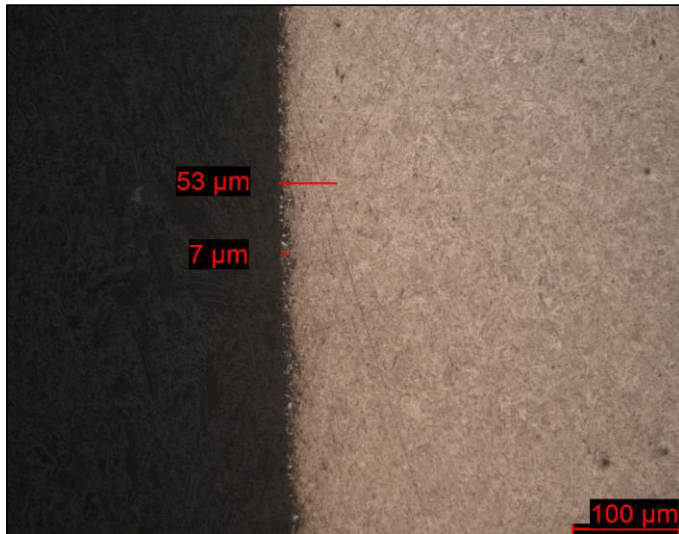


Bildnummer: 11 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

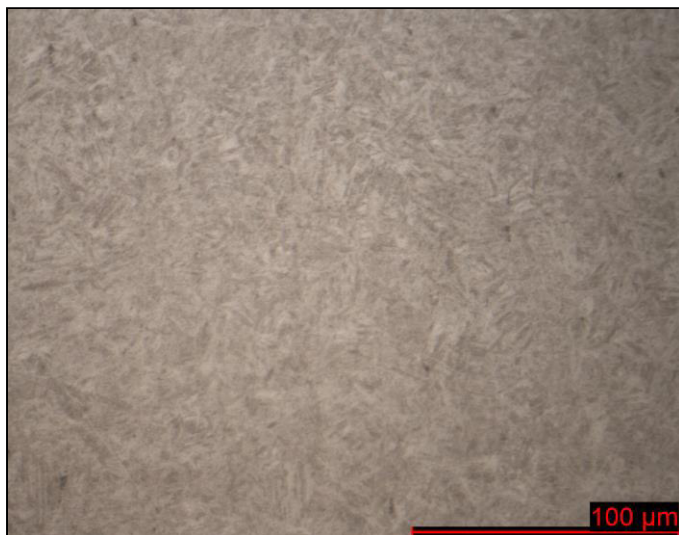


Bildnummer: 12 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 13 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

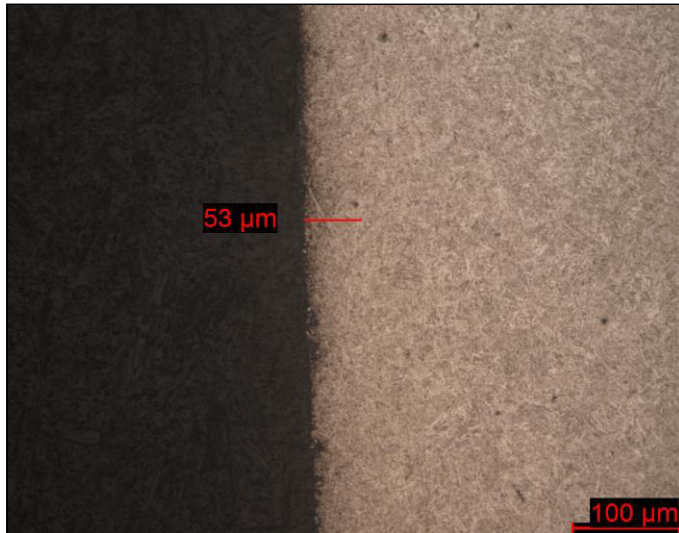


Bildnummer: 14 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

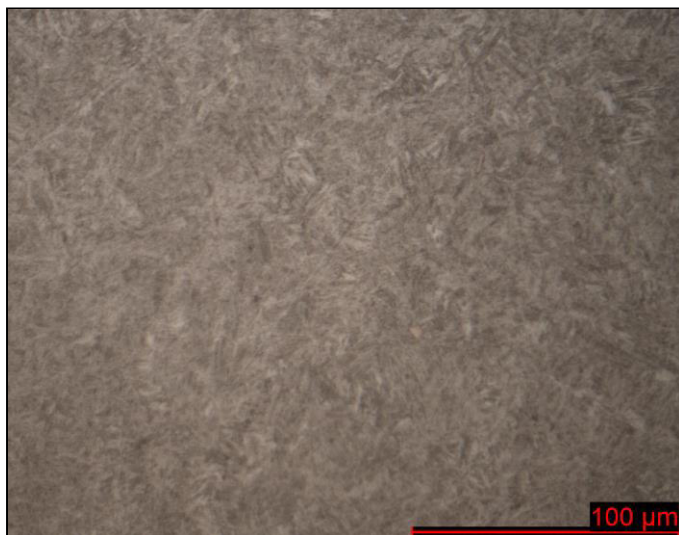


Bildnummer: 15 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

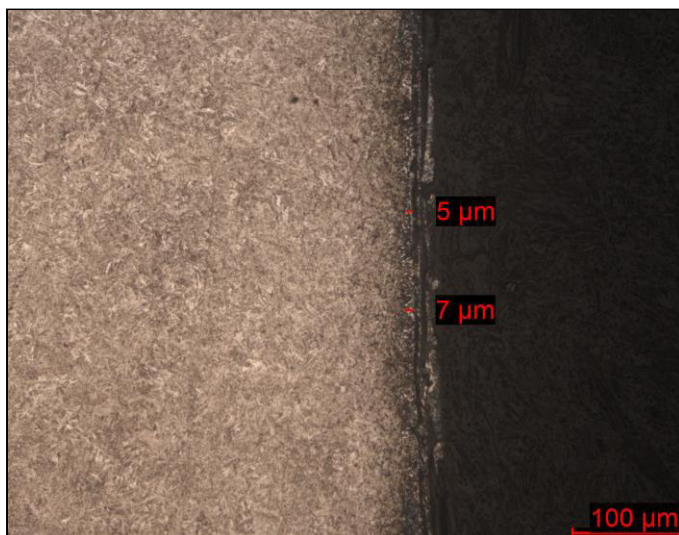
	<h2>Laborbericht</h2>	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	-----------------------	--------------------------------



Bildnummer: 16 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schlifftyp: Querschliff
 Position: Rand außen



Bildnummer: 17 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schlifftyp: Querschliff
 Position: Mitte



Bildnummer: 18 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schlifftyp: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------

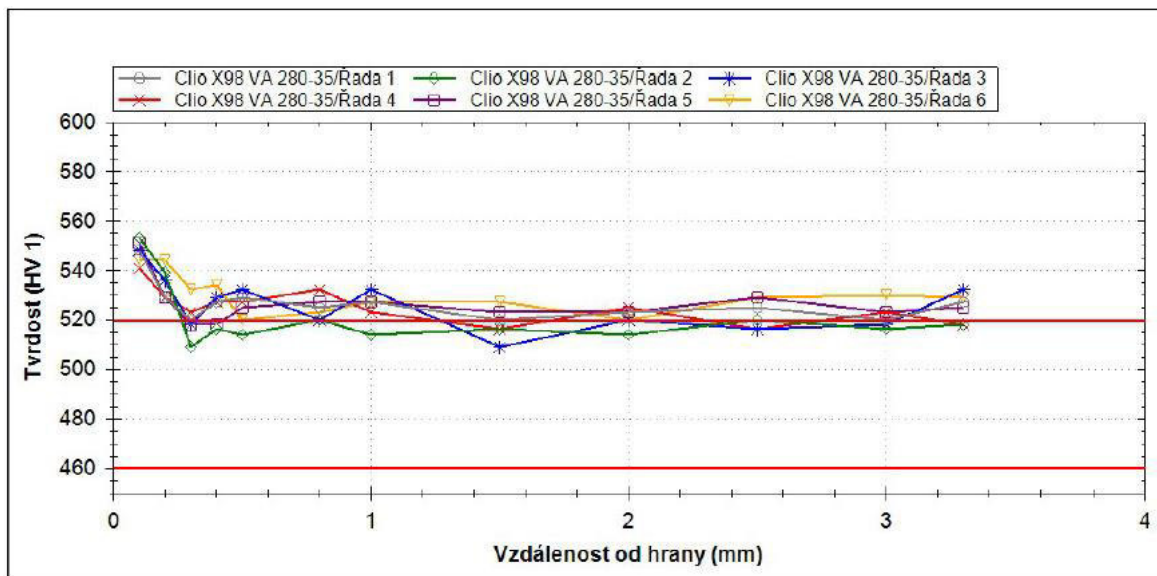


Bild 19: Härteverlauf

Tabelle 2: Härte (Reihe 1 und 2)

Reihe	Farbe	Punkt Nr.	X Abstand	Härte	Methode
Rada 1	■	1	0,100	548	HV 1
	■	2	0,200	529	HV 1
	■	3	0,300	520	HV 1
	■	4	0,400	527	HV 1
	■	5	0,500	529	HV 1
	■	6	0,800	525	HV 1
	■	7	1,000	527	HV 1
	■	8	1,500	520	HV 1
	■	9	2,000	523	HV 1
	■	10	2,500	525	HV 1
	■	11	3,000	520	HV 1
	■	12	3,300	527	HV 1
Rada 2	■	1	0,100	553	HV 1
	■	2	0,200	539	HV 1
	■	3	0,300	509	HV 1
	■	4	0,400	516	HV 1
	■	5	0,500	514	HV 1
	■	6	0,800	520	HV 1
	■	7	1,000	514	HV 1
	■	8	1,500	516	HV 1
	■	9	2,000	514	HV 1
	■	10	2,500	520	HV 1
	■	11	3,000	516	HV 1
	■	12	3,300	518	HV 1

Tabelle 3: Härte (Reihe 3 – 6)

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------

Rada 3	■	1	0,100	548	HV 1
	■	2	0,200	536	HV 1
	■	3	0,300	518	HV 1
	■	4	0,400	529	HV 1
	■	5	0,500	532	HV 1
	■	6	0,800	520	HV 1
	■	7	1,000	532	HV 1
	■	8	1,500	509	HV 1
	■	9	2,000	520	HV 1
	■	10	2,500	516	HV 1
	■	11	3,000	518	HV 1
	■	12	3,300	532	HV 1
Rada 4	■	1	0,100	541	HV 1
	■	2	0,200	529	HV 1
	■	3	0,300	523	HV 1
	■	4	0,400	527	HV 1
	■	5	0,500	527	HV 1
	■	6	0,800	532	HV 1
	■	7	1,000	523	HV 1
	■	8	1,500	516	HV 1
	■	9	2,000	525	HV 1
	■	10	2,500	516	HV 1
	■	11	3,000	523	HV 1
	■	12	3,300	518	HV 1
Rada 5	■	1	0,100	551	HV 1
	■	2	0,200	529	HV 1
	■	3	0,300	518	HV 1
	■	4	0,400	518	HV 1
	■	5	0,500	525	HV 1
	■	6	0,800	527	HV 1
	■	7	1,000	527	HV 1
	■	8	1,500	523	HV 1
	■	9	2,000	523	HV 1
	■	10	2,500	529	HV 1
	■	11	3,000	523	HV 1
	■	12	3,300	525	HV 1
Rada 6	■	1	0,100	544	HV 1
	■	2	0,200	544	HV 1
	■	3	0,300	532	HV 1
	■	4	0,400	534	HV 1
	■	5	0,500	520	HV 1
	■	6	0,800	523	HV 1
	■	7	1,000	527	HV 1
	■	8	1,500	527	HV 1
	■	9	2,000	520	HV 1
	■	10	2,500	529	HV 1
	■	11	3,000	530	HV 1
	■	12	3,300	529	HV 1

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------

Materialdaten:

Bezeichnung: 280/30
 Charge/Ident Nr.: 03592687
 Material: typ A
 Abmessung: 22,5x3,7 mm
 Zustand: vergütet

Problembeschreibung:

Kontrola materiálu při optimalizaci zušlechťování

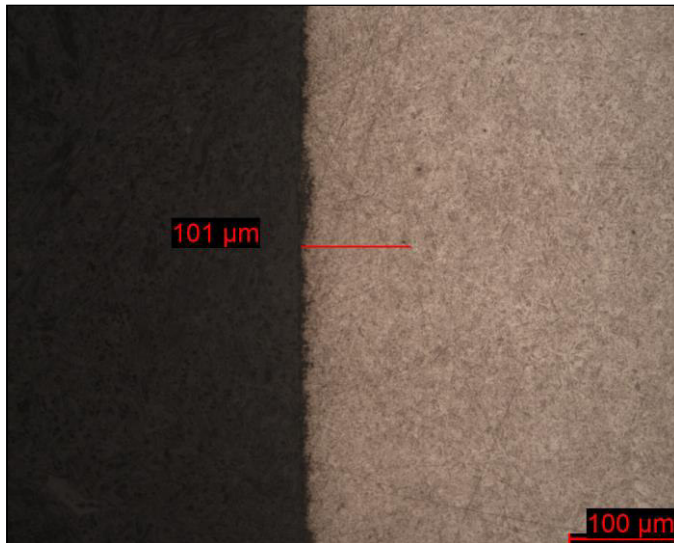
Untersuchungsergebnisse:

Strukturu tvoří popuštěný martenzit. Nauhličení vnějšího povrchu je metalograficky hůře zřetelné, potvrzují ho ale výsledky měření tvrdosti. Průměrné hodnoty materiálových charakteristik určené z výsledků tahové zkoušky jsou: $R_m = 1735$ MPa, $R_{p0,2} = 1283$ MPa, $Z = 20,4$ % a $A_5 = 19,2$ %.

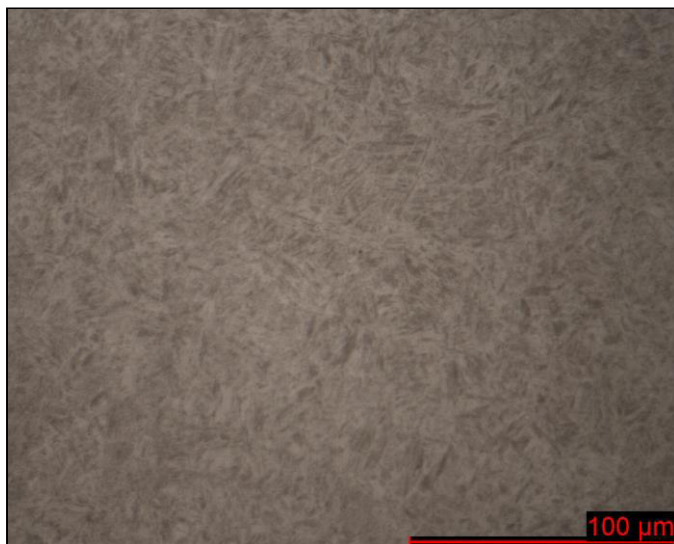
Tabelle 1: Aufkohlung/Entkohlung

Vzorek č.	Hloubka nauhličení (vnější průměr)	Hloubka oduhličení (vnitřní průměr)	Hloubka povrchových vad (vnitřní průměr)
1	101 μm	16 μm	max. 18 μm
2	66 μm	-	-
3	117 μm	-	-
4	72 μm	-	-
5	136 μm	-	max. 16 μm
6	128 μm	-	-

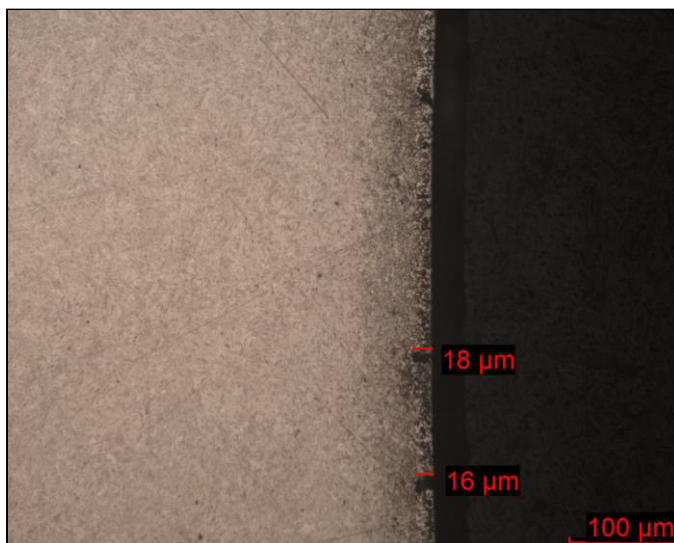
	<h2>Laborbericht</h2>	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	-----------------------	--------------------------------



Bildnummer: 1 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

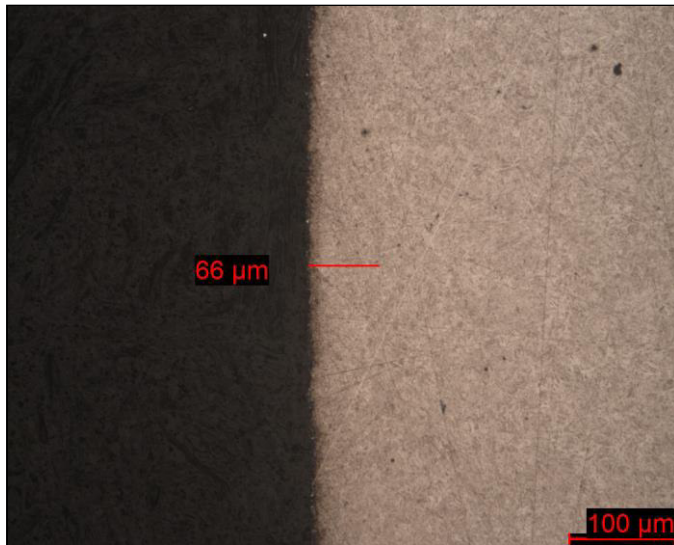


Bildnummer: 2 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

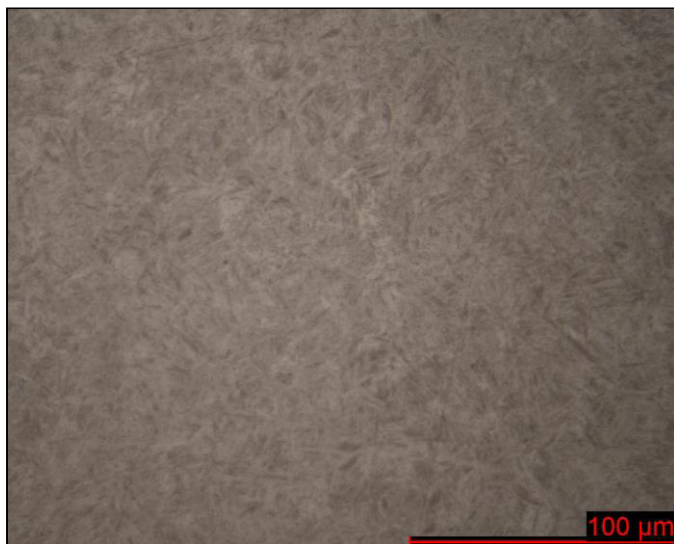


Bildnummer: 3 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 4 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

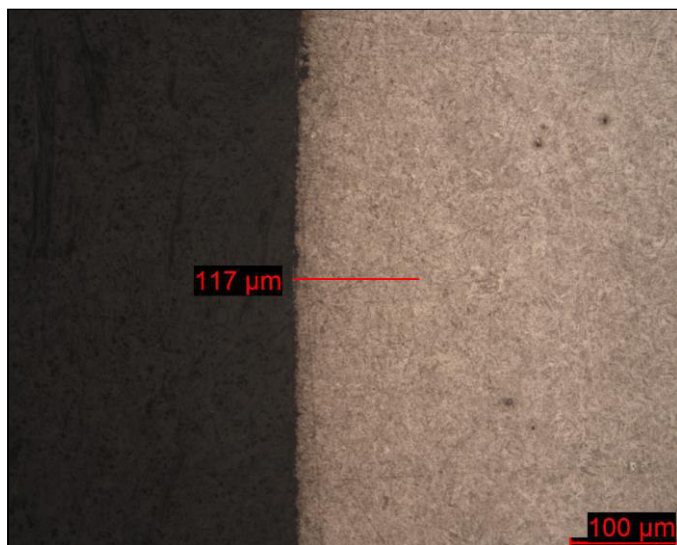


Bildnummer: 5 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

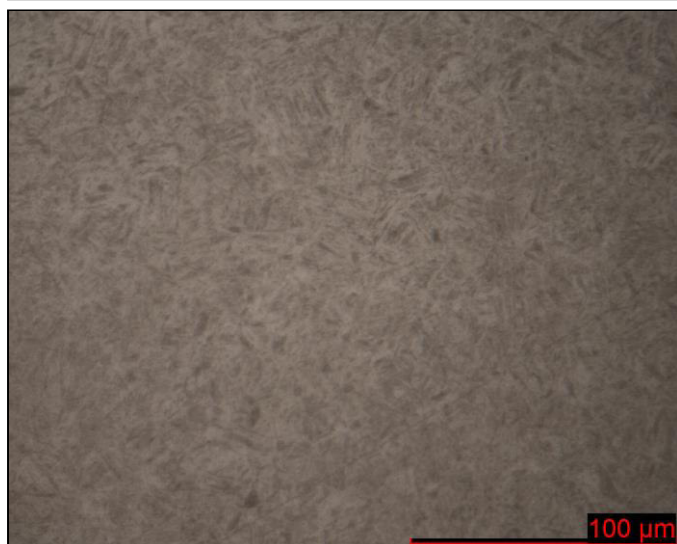


Bildnummer: 6 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

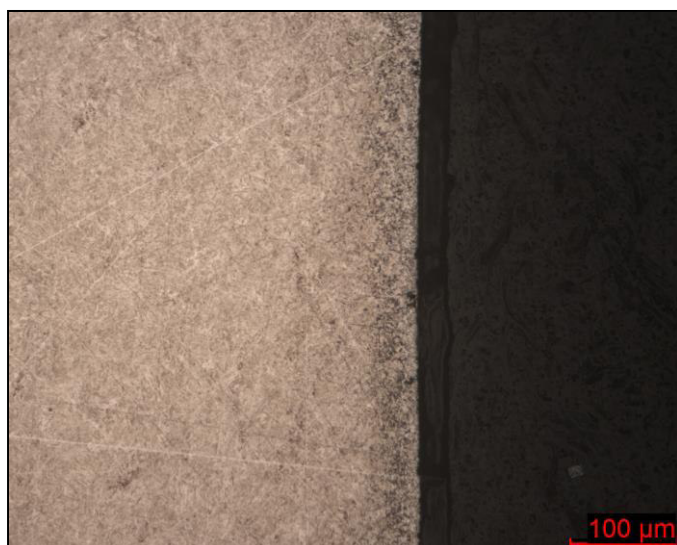
	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 7 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

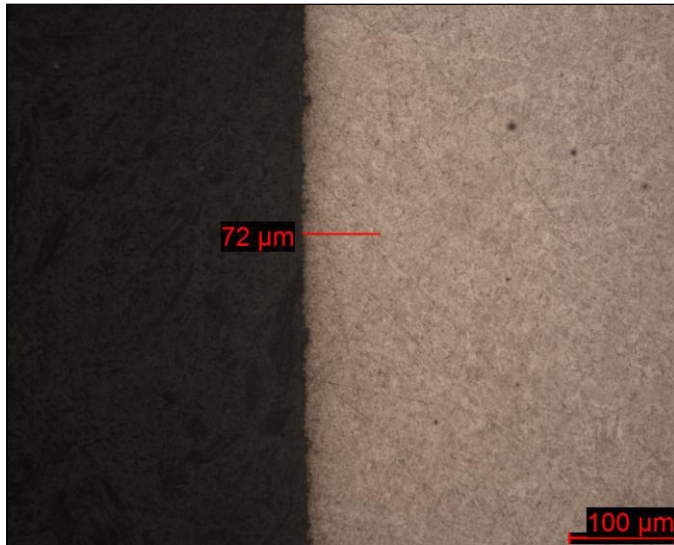


Bildnummer: 8 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

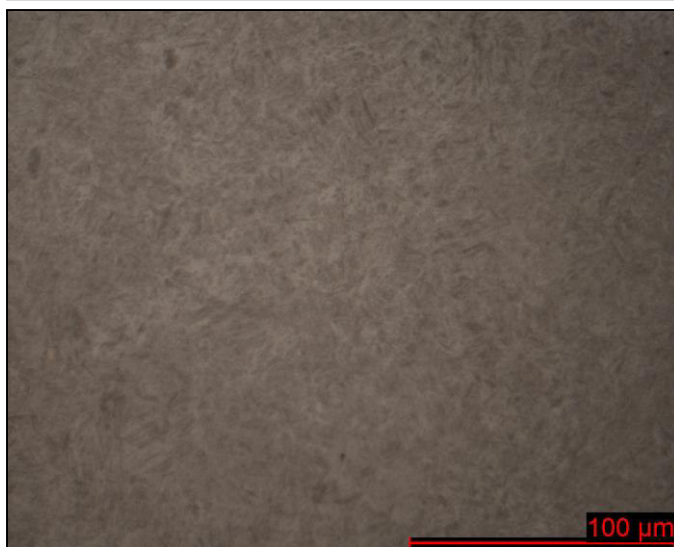


Bildnummer: 9 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

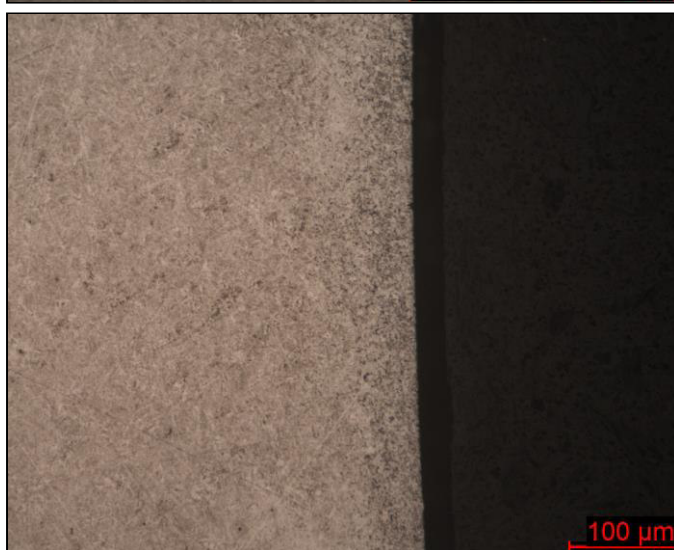
	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 10 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

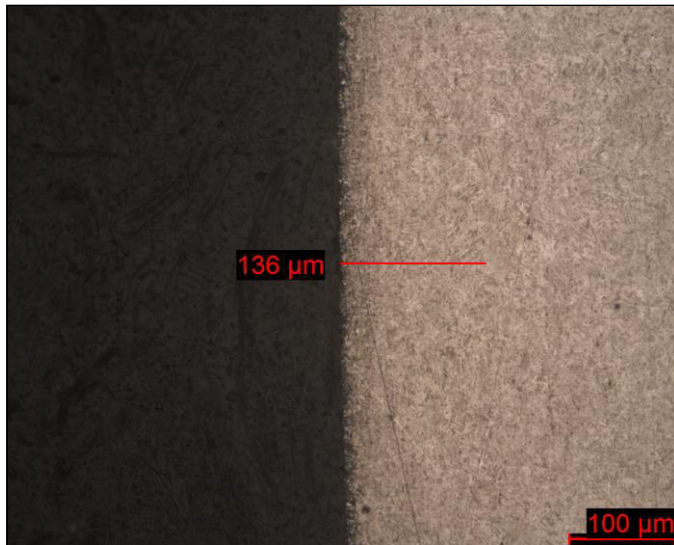


Bildnummer: 11 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

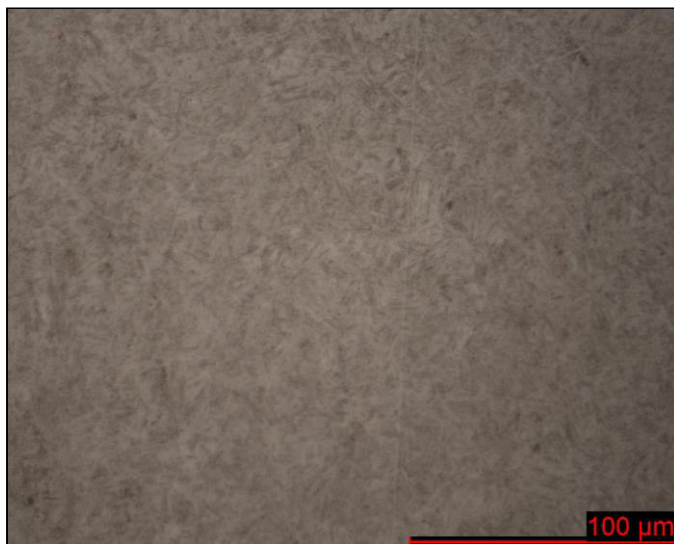


Bildnummer: 12 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 13 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen



Bildnummer: 14 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

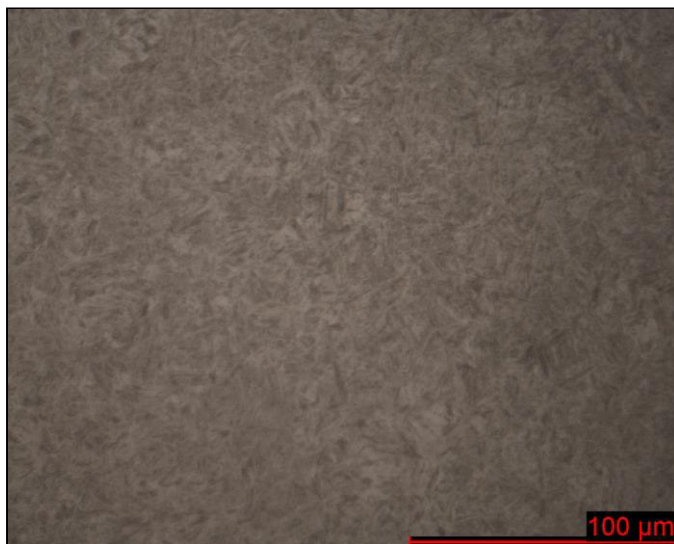


Bildnummer: 15 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 16 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen



Bildnummer: 17 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte



Bildnummer: 18 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
---------------------	--------------------------------

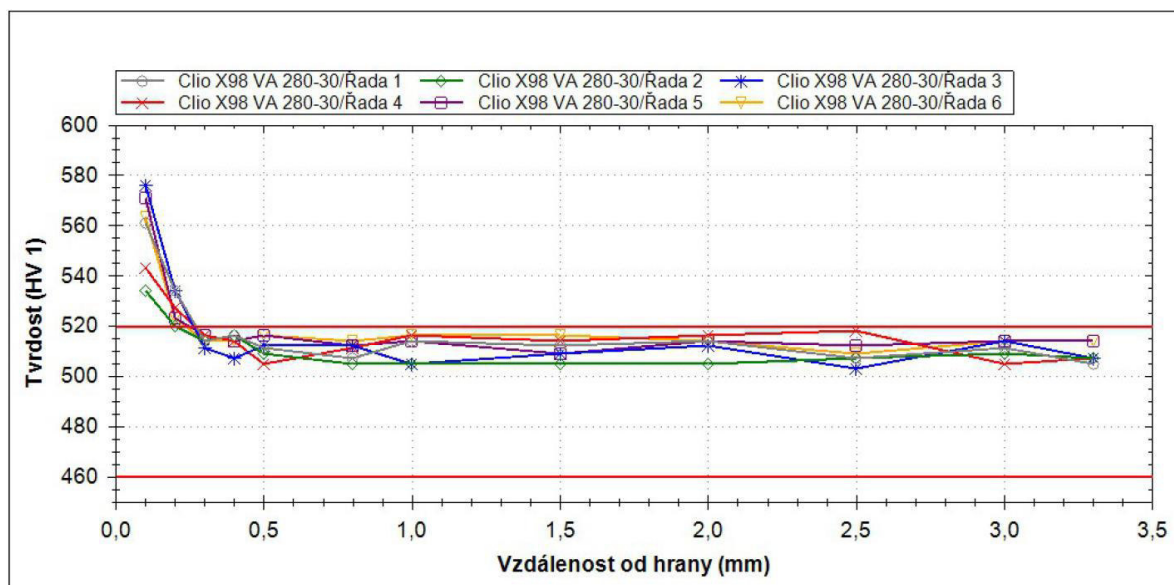


Bild 19: Härteverlauf

Tabelle 2: Härte (Reihe 1 und 2)

Reihe	Farbe	Punkt Nr.	X Abstand	Härte	Methode
Rada 1	■	1	0,100	561	HV 1
	■	2	0,200	534	HV 1
	■	3	0,300	514	HV 1
	■	4	0,400	516	HV 1
	■	5	0,500	511	HV 1
	■	6	0,800	507	HV 1
	■	7	1,000	514	HV 1
	■	8	1,500	512	HV 1
	■	9	2,000	514	HV 1
	■	10	2,500	507	HV 1
	■	11	3,000	511	HV 1
	■	12	3,300	505	HV 1
Rada 2	■	1	0,100	534	HV 1
	■	2	0,200	520	HV 1
	■	3	0,300	514	HV 1
	■	4	0,400	516	HV 1
	■	5	0,500	509	HV 1
	■	6	0,800	505	HV 1
	■	7	1,000	505	HV 1
	■	8	1,500	505	HV 1
	■	9	2,000	505	HV 1
	■	10	2,500	507	HV 1
	■	11	3,000	509	HV 1
	■	12	3,300	507	HV 1

Tabelle 3: Härte (Reihe 3 – 6)

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------

Reihe	Farbe	Punkt Nr.	X Abstand	Härte	Methode
Rada 3	■	1	0,100	576	HV 1
	■	2	0,200	534	HV 1
	■	3	0,300	511	HV 1
	■	4	0,400	507	HV 1
	■	5	0,500	512	HV 1
	■	6	0,800	512	HV 1
	■	7	1,000	505	HV 1
	■	8	1,500	509	HV 1
	■	9	2,000	512	HV 1
	■	10	2,500	503	HV 1
	■	11	3,000	514	HV 1
	■	12	3,300	507	HV 1
Rada 4	■	1	0,100	543	HV 1
	■	2	0,200	527	HV 1
	■	3	0,300	516	HV 1
	■	4	0,400	514	HV 1
	■	5	0,500	505	HV 1
	■	6	0,800	511	HV 1
	■	7	1,000	516	HV 1
	■	8	1,500	514	HV 1
	■	9	2,000	516	HV 1
	■	10	2,500	518	HV 1
	■	11	3,000	505	HV 1
	■	12	3,300	507	HV 1
Rada 5	■	1	0,100	571	HV 1
	■	2	0,200	523	HV 1
	■	3	0,300	516	HV 1
	■	4	0,400	514	HV 1
	■	5	0,500	516	HV 1
	■	6	0,800	512	HV 1
	■	7	1,000	514	HV 1
	■	8	1,500	509	HV 1
	■	9	2,000	514	HV 1
	■	10	2,500	512	HV 1
	■	11	3,000	514	HV 1
	■	12	3,300	514	HV 1
Rada 6	■	1	0,100	563	HV 1
	■	2	0,200	523	HV 1
	■	3	0,300	514	HV 1
	■	4	0,400	514	HV 1
	■	5	0,500	516	HV 1
	■	6	0,800	514	HV 1
	■	7	1,000	516	HV 1
	■	8	1,500	516	HV 1
	■	9	2,000	514	HV 1
	■	10	2,500	509	HV 1
	■	11	3,000	514	HV 1
	■	12	3,300	514	HV 1

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------

Materialdaten:

Bezeichnung: 280/25
 Charge/Ident Nr.: 03592687
 Material: typ A
 Abmessung: 22,5x3,7 mm
 Zustand: vergütet

Problembeschreibung:

Kontrola materiálu při optimalizaci zušlechťování

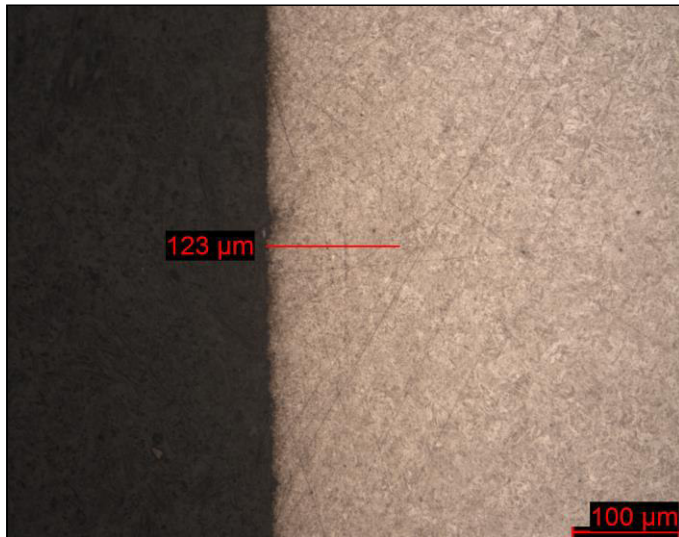
Untersuchungsergebnisse:

Strukturu tvoří popuštěný martenzit. Nauhličení vnějšího povrchu je metalograficky hůře zřetelné, potvrzují ho ale výsledky měření tvrdosti. Průměrné hodnoty materiálových charakteristik určené z výsledků tahové zkoušky jsou: $R_m = 1723$ MPa, $R_{p0,2} = 1253$ MPa, $Z = 21,7$ % a $A_5 = 18,4$ %.

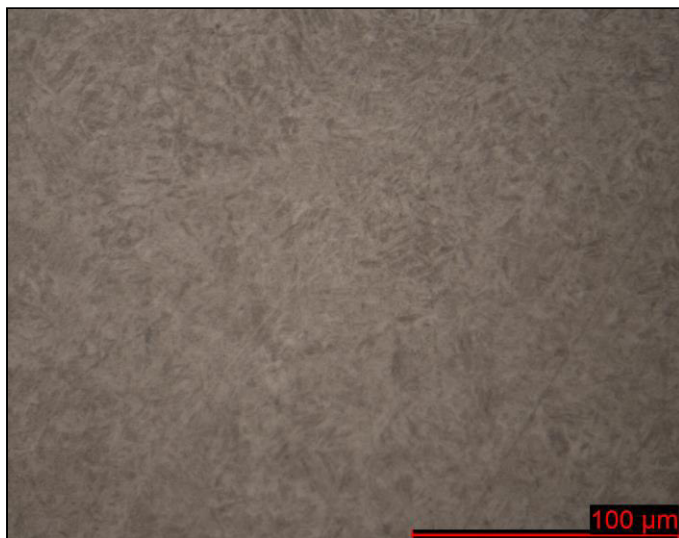
Tabelle 1: Aufkohlung/Entkohlung

Vzorek č.	Hloubka nauhličení (vnější průměr)	Hloubka oduhličení (vnitřní průměr)	Hloubka povrchových vad (vnitřní průměr)
1	123 μm	-	-
2	128 μm	-	-
3	105 μm	-	-
4	88 μm	-	-
5	72 μm	-	-
6	87 μm	-	-

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 1 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffotyp: Querschliff
 Position: Rand außen

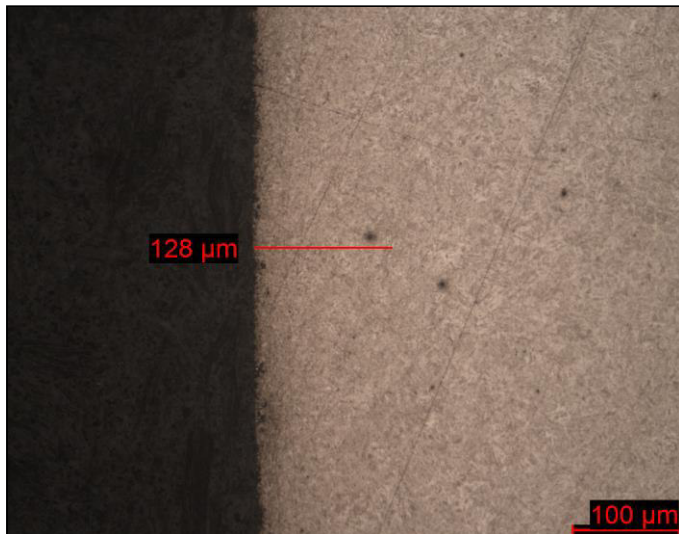


Bildnummer: 2 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffotyp: Querschliff
 Position: Mitte

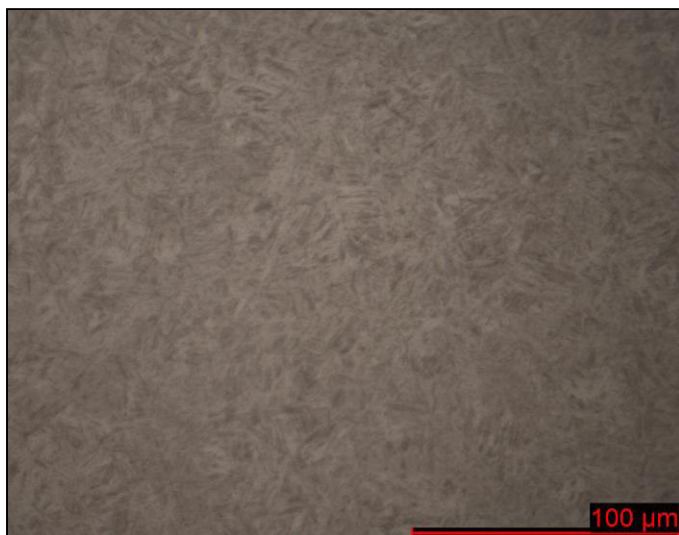


Bildnummer: 3 - Probe 1
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffotyp: Querschliff
 Position: Rand innen

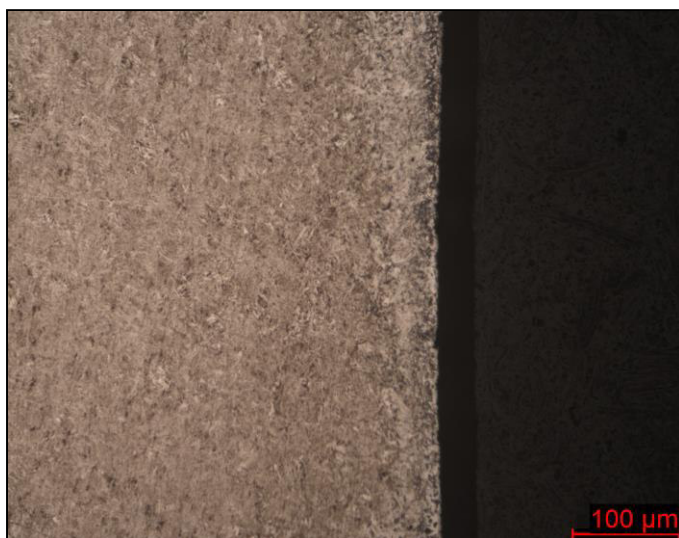
	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 4 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

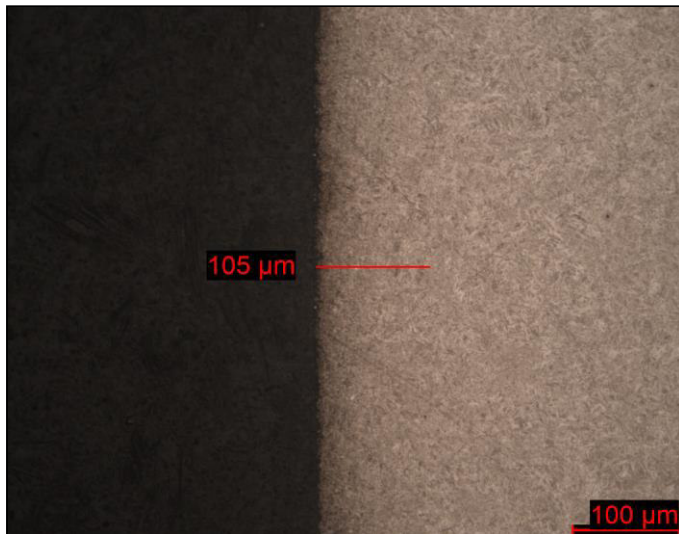


Bildnummer: 5 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

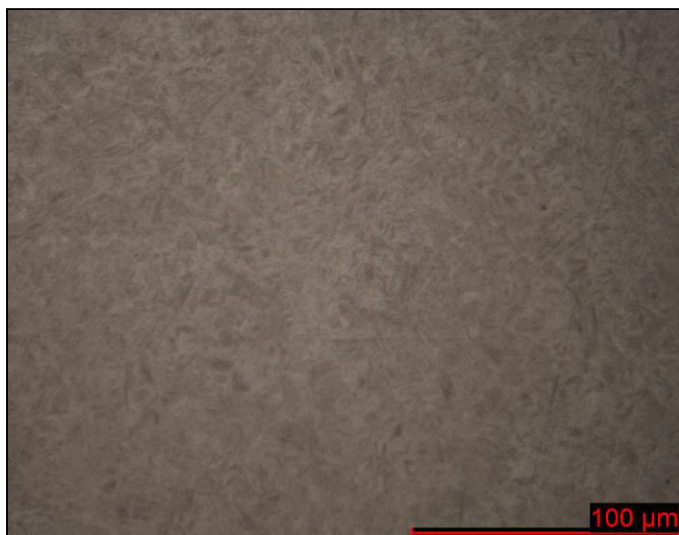


Bildnummer: 6 - Probe 2
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 7 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

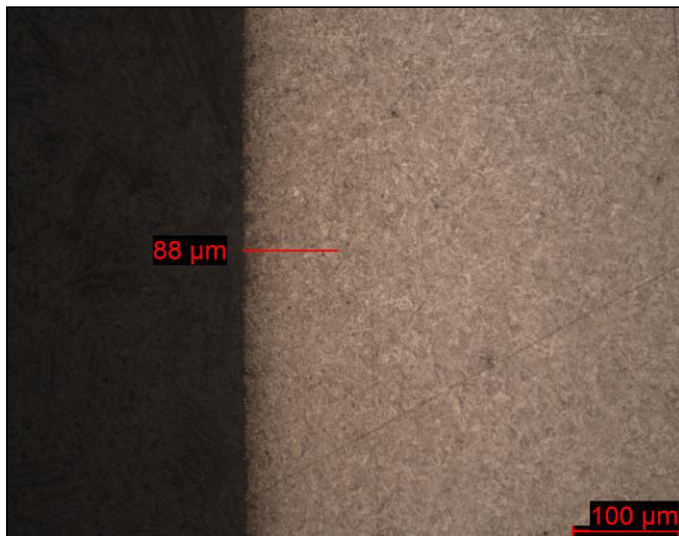


Bildnummer: 8 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

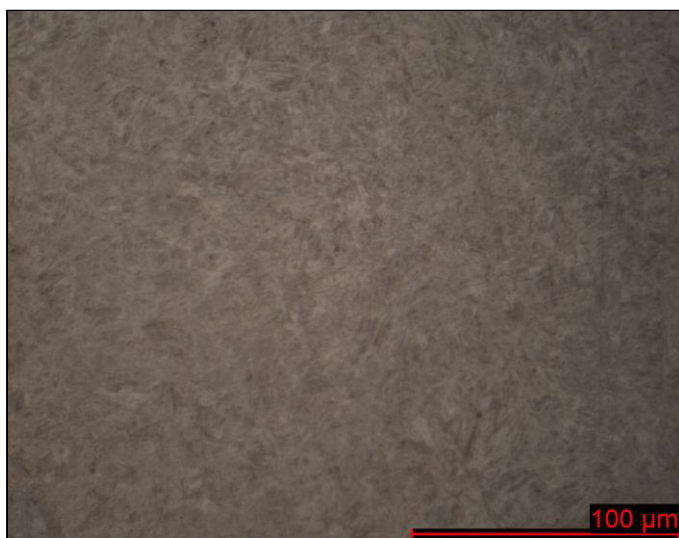


Bildnummer: 9 - Probe 3
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

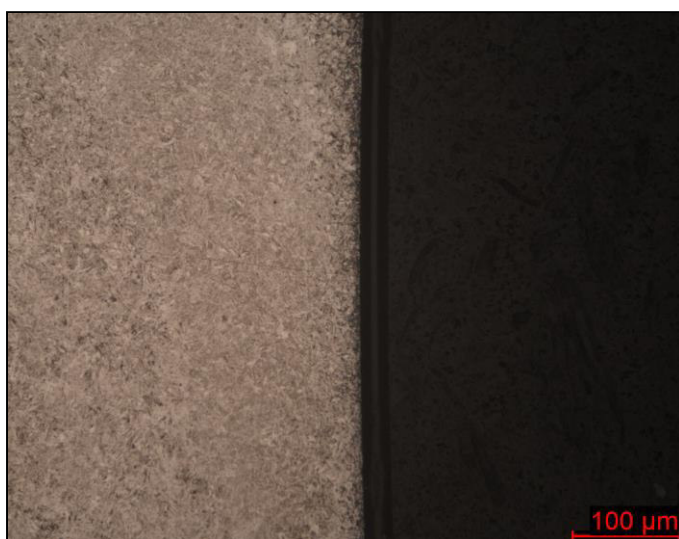
	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 10 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

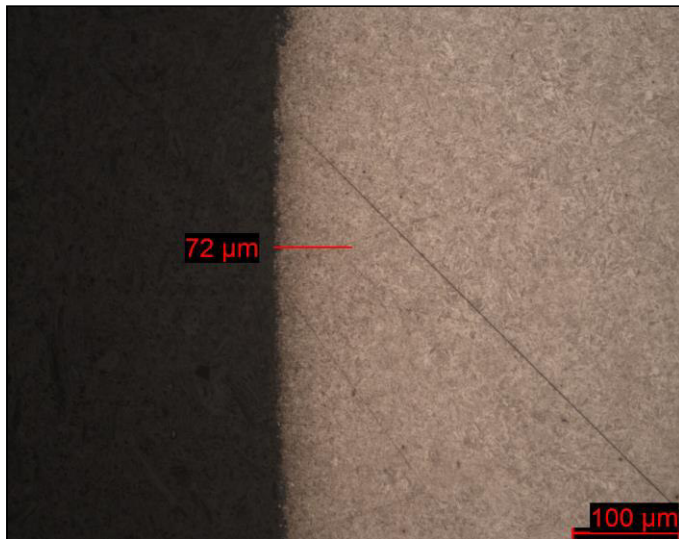


Bildnummer: 11 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

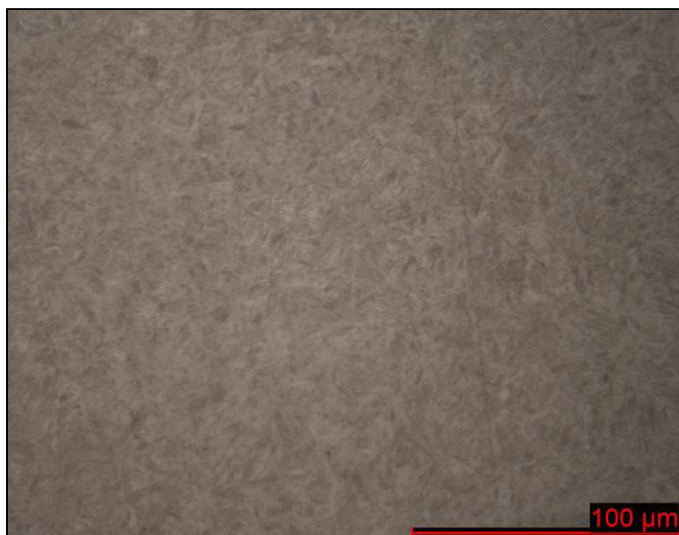


Bildnummer: 12 - Probe 4
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 13 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen

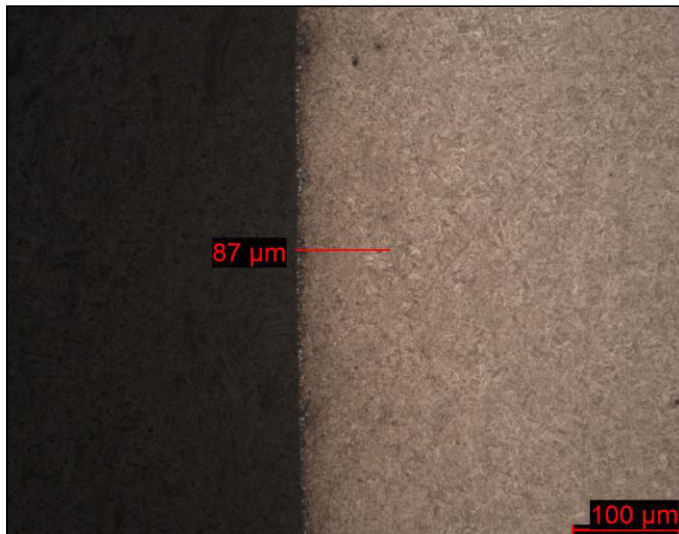


Bildnummer: 14 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte

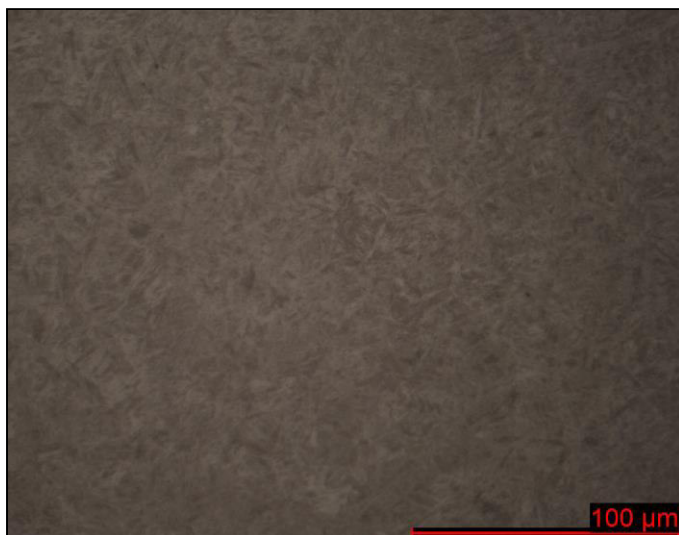


Bildnummer: 15 - Probe 5
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------



Bildnummer: 16 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand außen



Bildnummer: 17 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 50
 Schliffart: Querschliff
 Position: Mitte



Bildnummer: 18 - Probe 6
 Mikroskop: Axiovert 25
 Objektiv: 20
 Schliffart: Querschliff
 Position: Rand innen

Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
---------------------	--------------------------------

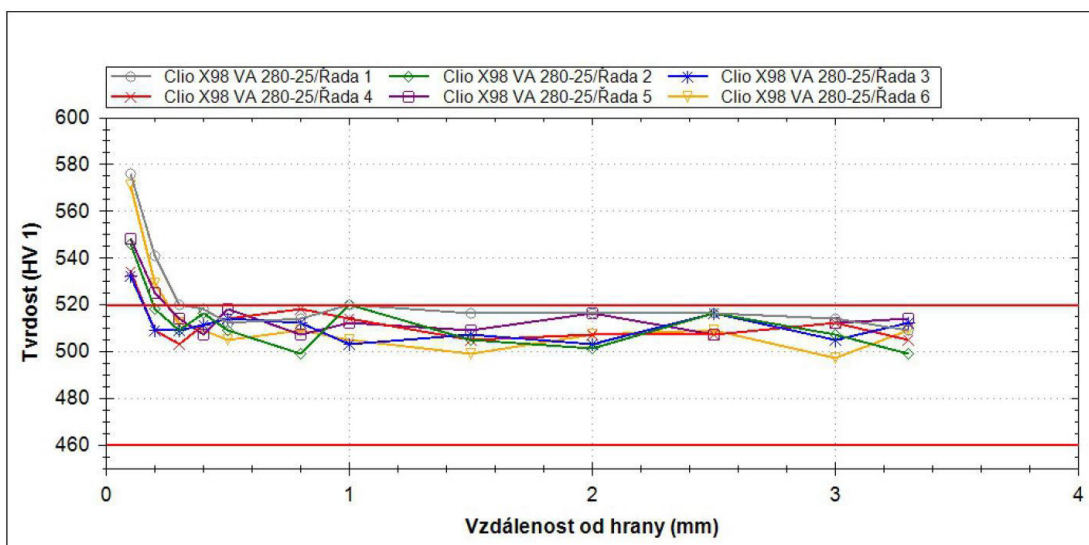


Bild 19: Härteverlauf

Tabelle 2: Härte (Reihe 1 und 2)

Reihe	Farbe	Punkt Nr.	X Abstand	Härte	Methode
Rada 1	■	1	0,100	576	HV 1
	■	2	0,200	541	HV 1
	■	3	0,300	520	HV 1
	■	4	0,400	518	HV 1
	■	5	0,500	512	HV 1
	■	6	0,800	514	HV 1
	■	7	1,000	520	HV 1
	■	8	1,500	516	HV 1
	■	9	2,000	516	HV 1
	■	10	2,500	516	HV 1
	■	11	3,000	514	HV 1
	■	12	3,300	509	HV 1
Rada 2	■	1	0,100	546	HV 1
	■	2	0,200	518	HV 1
	■	3	0,300	509	HV 1
	■	4	0,400	516	HV 1
	■	5	0,500	509	HV 1
	■	6	0,800	499	HV 1
	■	7	1,000	520	HV 1
	■	8	1,500	505	HV 1
	■	9	2,000	501	HV 1
	■	10	2,500	516	HV 1
	■	11	3,000	507	HV 1
	■	12	3,300	499	HV 1

Tabelle 3: Härte (Reihe 3 – 6)

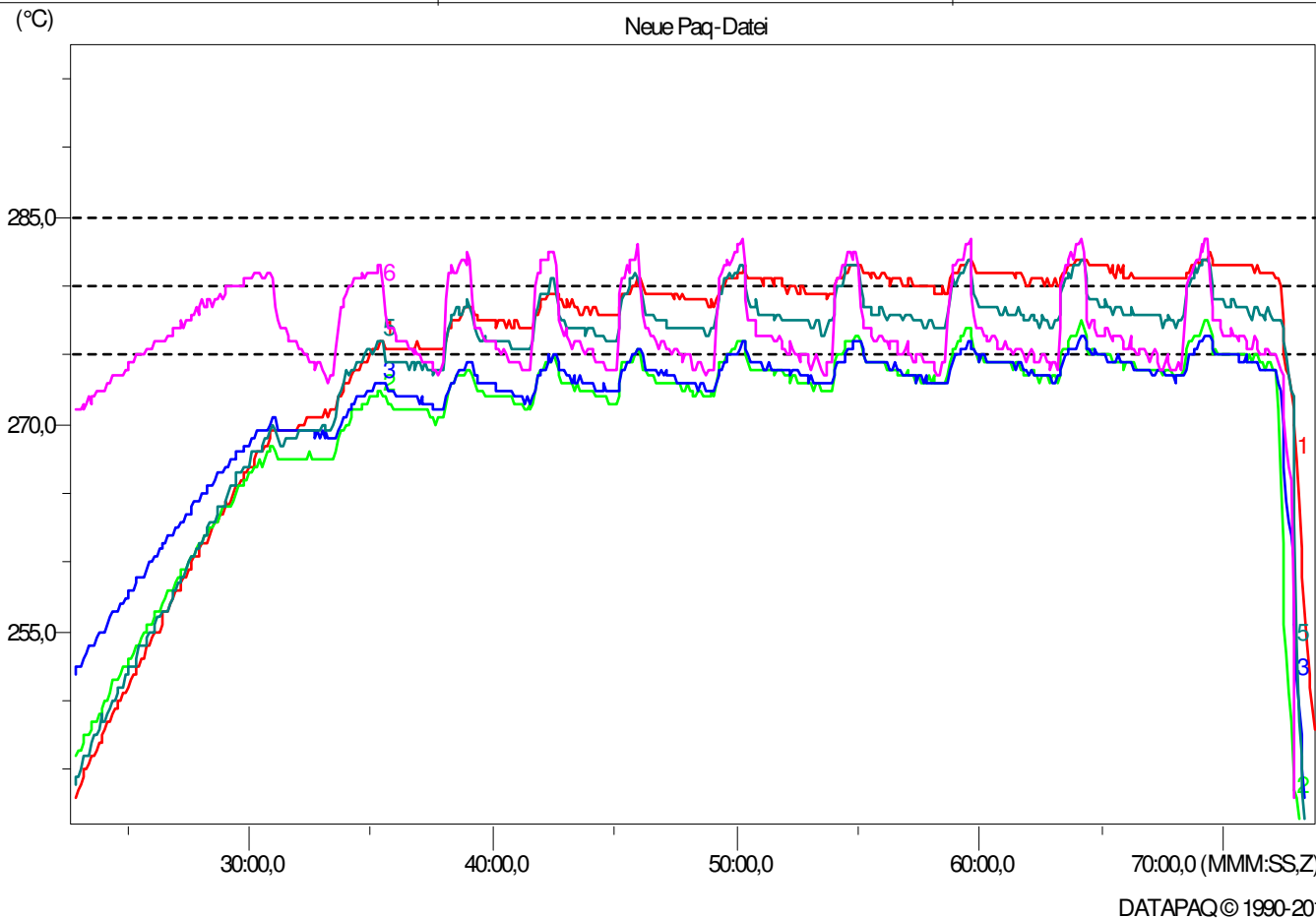
	Laborbericht	Nummer: 039-15P-S 28.1.2015
--	---------------------	--------------------------------

Reihe	Farbe	Punkt Nr.	X Abstand	Härte	Methode
Rada 3	■	1	0,100	532	HV 1
	■	2	0,200	509	HV 1
	■	3	0,300	509	HV 1
	■	4	0,400	511	HV 1
	■	5	0,500	514	HV 1
	■	6	0,800	512	HV 1
	■	7	1,000	503	HV 1
	■	8	1,500	507	HV 1
	■	9	2,000	503	HV 1
	■	10	2,500	516	HV 1
	■	11	3,000	505	HV 1
	■	12	3,300	512	HV 1
Rada 4	■	1	0,100	534	HV 1
	■	2	0,200	509	HV 1
	■	3	0,300	503	HV 1
	■	4	0,400	511	HV 1
	■	5	0,500	514	HV 1
	■	6	0,800	518	HV 1
	■	7	1,000	514	HV 1
	■	8	1,500	505	HV 1
	■	9	2,000	507	HV 1
	■	10	2,500	507	HV 1
	■	11	3,000	512	HV 1
	■	12	3,300	505	HV 1
Rada 5	■	1	0,100	548	HV 1
	■	2	0,200	525	HV 1
	■	3	0,300	514	HV 1
	■	4	0,400	507	HV 1
	■	5	0,500	518	HV 1
	■	6	0,800	507	HV 1
	■	7	1,000	512	HV 1
	■	8	1,500	509	HV 1
	■	9	2,000	516	HV 1
	■	10	2,500	507	HV 1
	■	11	3,000	512	HV 1
	■	12	3,300	514	HV 1
Rada 6	■	1	0,100	571	HV 1
	■	2	0,200	529	HV 1
	■	3	0,300	512	HV 1
	■	4	0,400	509	HV 1
	■	5	0,500	505	HV 1
	■	6	0,800	509	HV 1
	■	7	1,000	505	HV 1
	■	8	1,500	499	HV 1
	■	9	2,000	507	HV 1
	■	10	2,500	509	HV 1
	■	11	3,000	497	HV 1
	■	12	3,300	509	HV 1

Firma	Prozeß popouštění 280/40	Gedruckt 19.03.2015
Werk	Produkt	Ofengeschwindigkeit 0,0 (mm/min)

Datenerfassungsangaben

Anzahl Meßfühler: 6
 Meßtakt: 0:05,0 (MMSS,Z)
 Trigger-Modus: Temperatur 50,0°C
 Daten geladen: 13:28:00 19.03.2015
 Datenerfassung begonnen: 11:36:23 19.03.2015
 Dateiname:
 c:\datapaq\Mereri\15JD28A.PAQ
 Max interne Temp.: 43,0°C
 Logger-ID: H610-8319-00
 DATAPAQ© 1990-2015, Furnace Tracker für Windows v4.10



Notizen

Meßfühlerplan

Abmessungen: 1000 x 1000mm

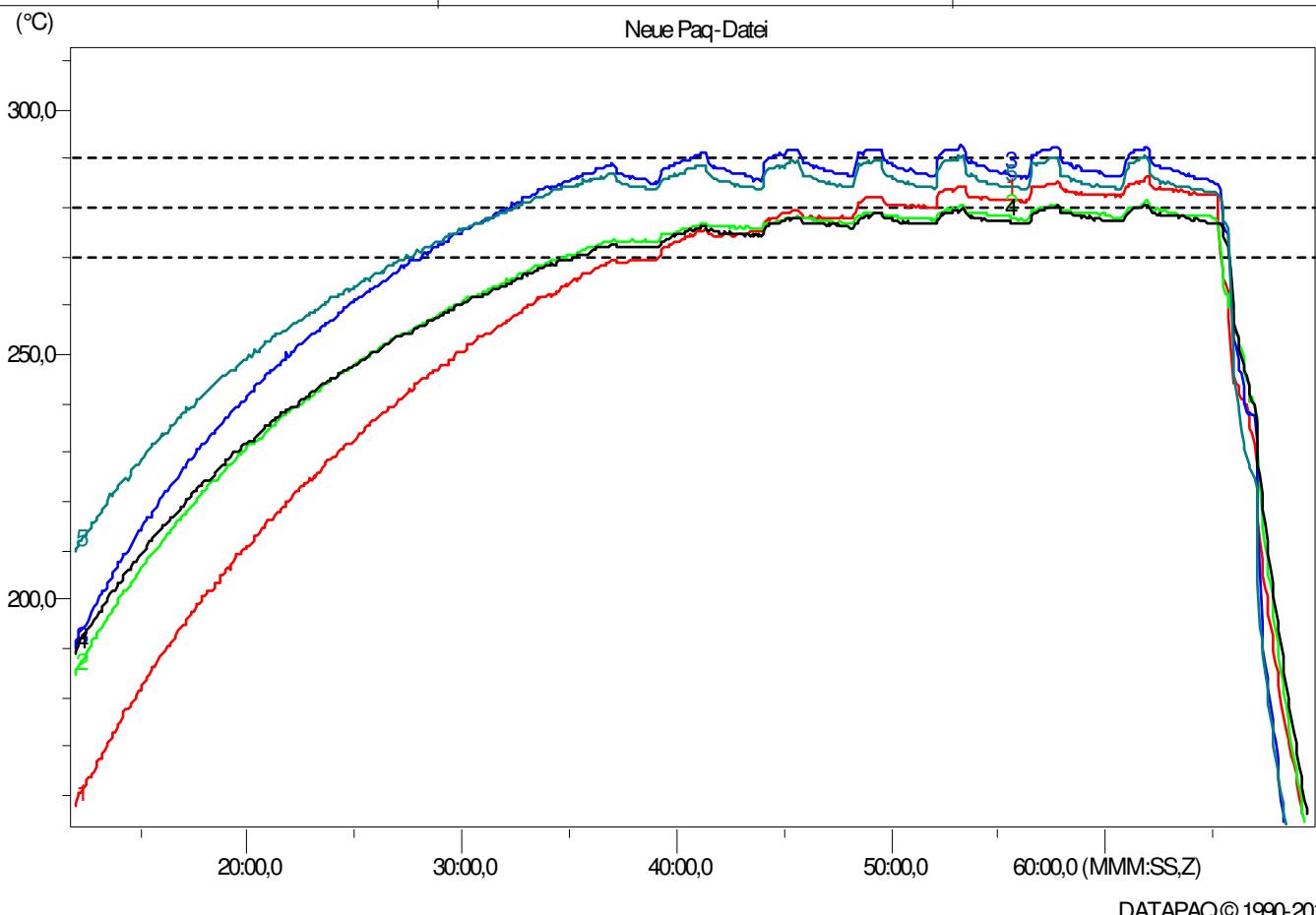
```

0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
    
```

Meßfühlerangaben	Temperaturmaxima und -minima in °C				Spitzengradienten in °C/s					Gradient zwischen 0,0 - 0,0°C (über Zoom)					Größte Differenz in °C		Zeit darüber Erreicht		Zeit darüber Erreicht		Zeit darüber Erreicht		
	Max:Temp	Max:Zeit	Min:Temp	Min:Zeit	Max(+)	Zeitpunkt	Max(-)	Zeitpunkt	Durchschnitt	Anstieg	Ansteigend	Abfall	Abfallend	Zeit	Größte Differenz	Zeitpunkt	285,0°C	285,0°C	280,0°C	280,0°C	275,0°C	275,0°C	
										Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s	Gesamt									
#1	282,5	69:25,0	243,0	22:50,0	+ 0,08	23:05,0	- 0,44	73:20,0	+ 0,00	***	***	***	***	***	267,5	29,5	73:00,0	0:00,0	***	21:30,0	45:45,0	37:40,0	34:55,0
#2	277,5	64:10,0	233,0	73:40,0	+ 0,08	45:30,0	- 0,62	72:35,0	+ 0,00	***	***	***	***	***	267,5	29,5	73:00,0	0:00,0	***	0:00,0	***	8:40,0	42:30,0
#3	276,5	64:10,0	237,0	73:40,0	+ 0,07	41:55,0	- 0,50	72:45,0	+ 0,00	***	***	***	***	***	267,5	29,5	73:00,0	0:00,0	***	0:00,0	***	7:40,0	42:20,0
#4	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	267,5	29,5	73:00,0	***	***	***	***	***	***
#5	282,0	59:30,0	235,5	73:40,0	+ 0,10	42:00,0	- 0,73	73:15,0	+ 0,00	***	***	***	***	***	267,5	29,5	73:00,0	0:00,0	***	5:45,0	42:25,0	35:25,0	34:45,0
#6	283,5	50:15,0	226,0	73:30,0	+ 0,18	45:30,0	- 0,86	72:50,0	- 0,01	***	***	***	***	***	267,5	29,5	73:00,0	0:00,0	***	11:10,0	29:05,0	37:45,0	25:20,0

Firma	Prozeß popouštění 280/30	Gedruckt 24.04.2015
Werk	Produkt	Ofengeschwindigkeit 0,0 (mm/min)

Datenerfassungsangaben	
Bediener:	
Prozeßdauer:	
Anzahl Meßfühler:	6
Meßtakt:	0:05,0 (MMSS,Z)
Trigger-Modus:	Temperatur 50,0°C
Daten geladen:	19:02:00 24.04.2015
Datenerfassung begonnen:	16:50:54 24.04.2015
Dateiname:	c:\datapaq\mereni\sfE15QJ02B.PAQ
Max interne Temp.:	36,5°C
Logger-ID:	H610-8319-00
DATAPAQ© 1990-2015, Furnace Tracker für Windows v4.10	



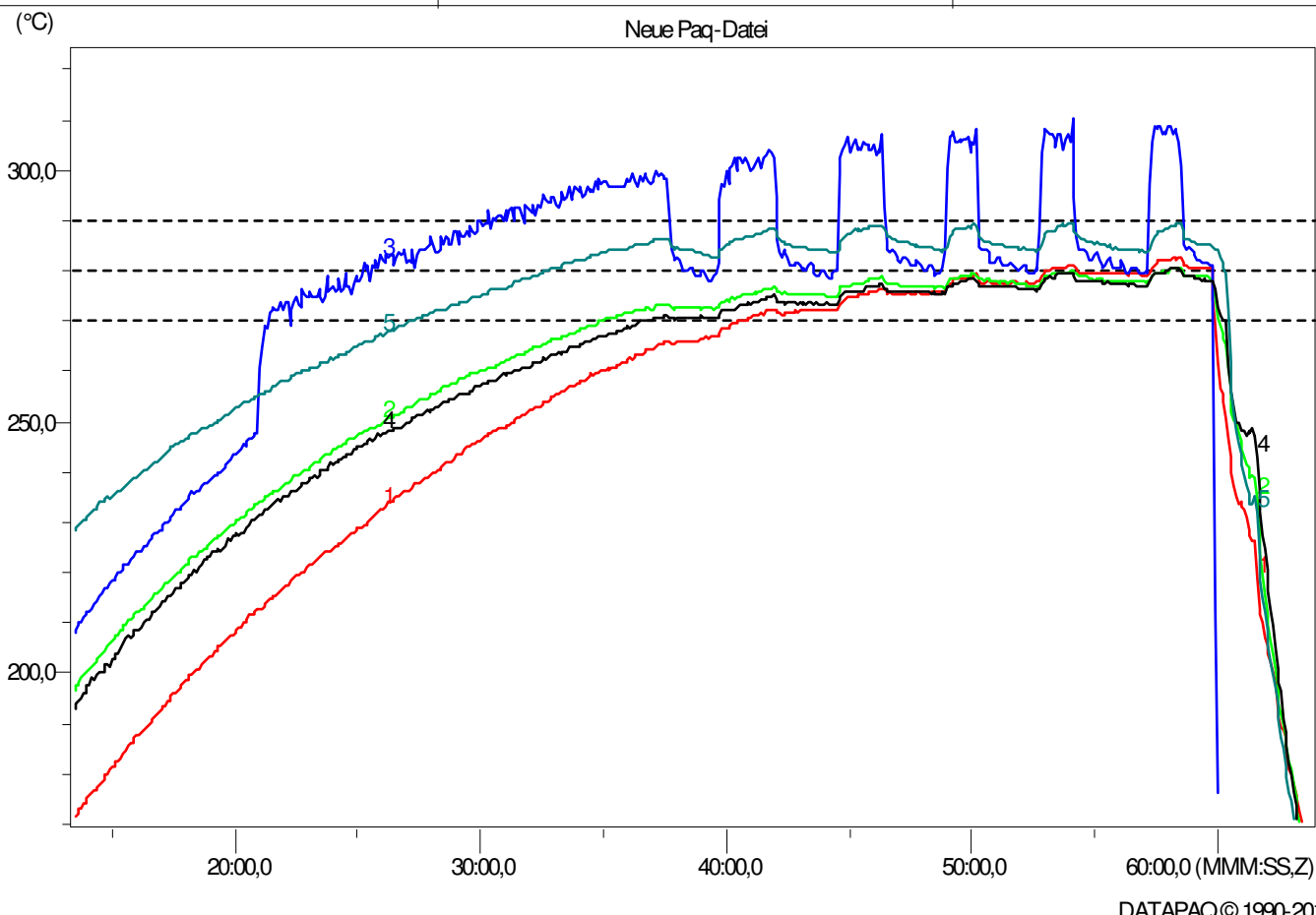
Notizen	

Meßfühlerplan	
Abmessungen: 1000 x 1000mm	
0 0	.
0 0	
0 0	
0 0	
0 0	
0 0	

Meßfühlerangaben	Temperaturmaxima und -minima in °C				Spitzengradienten in °C/s					Gradient zwischen 0,0 - 0,0°C (über Zoom)					Größte Differenz in °C		Zeit darüber Erreicht		Zeit darüber Erreicht		Zeit darüber Erreicht		
	Max:Temp	Max:Zeit	Min:Temp	Min:Zeit	Max(+)	Zeitpunkt	Max(-)	Zeitpunkt	Durchschnitt	Anstieg	Ansteigend	Abfall	Abfallend	Zeit	Größte Differenz	Zeitpunkt	280,0°C	290,0°C	280,0°C	290,0°C	270,0°C	270,0°C	
	Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s	Gesamt	Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s	Gesamt	Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s	Gesamt	Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s
#1	286,5	61:55,0	141,5	69:40,0	+ 0,14	11:55,0	- 0,79	67:20,0	+ 0,00	***	***	***	***	***	158,0	52,0	11:55,0	0:00,0	***	16:50,0	48:25,0	26:15,0	39:10,0
#2	281,5	61:55,0	144,5	69:40,0	+ 0,14	12:00,0	- 0,81	67:25,0	- 0,01	***	***	***	***	***	158,0	52,0	11:55,0	0:00,0	***	2:50,0	52:40,0	30:45,0	34:40,0
#3	283,0	53:15,0	114,0	69:40,0	+ 0,16	12:15,0	- 1,24	67:20,0	- 0,01	***	***	***	***	***	158,0	52,0	11:55,0	7:35,0	40:40,0	33:15,0	32:05,0	37:45,0	28:05,0
#4	280,5	57:45,0	149,5	69:40,0	+ 0,13	12:00,0	- 0,73	67:20,0	- 0,01	***	***	***	***	***	158,0	52,0	11:55,0	0:00,0	***	1:45,0	53:20,0	30:40,0	35:10,0
#5	290,5	53:10,0	120,5	69:40,0	+ 0,13	61:10,0	- 1,05	67:25,0	- 0,02	***	***	***	***	***	210,0	115,0	52:55,0	1:15,0	52:55,0	33:05,0	32:25,0	38:25,0	27:25,0
#6	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

Firma	Prozeß popouštění 280/25	Gedruckt 08.04.2015
Werk	Produkt	Ofengeschwindigkeit 0,0 (mm/min)

Datenerfassungsangaben	
Anzahl Meßfühler:	6
Meßtakt:	0:05,0 (MMSS,Z)
Trigger-Modus:	Temperatur 50,0°C
Daten geladen:	14:18:00 08.04.2015
Datenerfassung begonnen:	12:32:17 08.04.2015
Dateiname:	c:\DATAPAQ\MERENI\SF/E158E18A.PAQ
Max interne Temp.:	33,0°C
Logger-ID:	H610-8319-00
DATAPAQ© 1990-2015, Furnace Tracker für Windows v4.10	



Notizen	

Meßfühlerplan		
Abmessungen: 1000 x 1000mm		
1_patro_levy	0	0
1_patro_stred	0	0
2_patro_stred	0	0
3_patro_stred	0	0
4_patro_stred	0	0
4_patro_pravy	0	0

--	--

Meßfühlerangaben	Temperaturmaxima und -minima in °C				Spitzengradienten in °C/s					Gradient zwischen 0,0 - 0,0°C (über Zoom)					Größte Differenz in °C		Zeit darüber Erreicht		Zeit darüber Erreicht		Zeit darüber Erreicht	
	Max Temp	Max Zeit	Min Temp	Min Zeit	Max (+)	Zeitpunkt	Max (-)	Zeitpunkt	Durchschnitt	Anstieg	Ansteigend	Abfall	Abfallend	Zeit	Größte Differenz	Zeitpunkt	290,0°C	290,0°C	280,0°C	280,0°C	270,0°C	270,0°C
										Zeit	Gradient °C/s	Zeit	Gradient °C/s	Gesamt								
#1_1_patro_levy	282,5	58:10,0	158,0	63:55,0	+ 0,12	14:20,0	- 0,81	60:10,0	+ 0,00	***	***	***	***	***	40,0	61:35,0	0:00,0	***	3:50,0	53:00,0	19:25,0	40:30,0
#2_1_patro_stred	280,5	58:05,0	154,0	63:55,0	+ 0,12	13:25,0	- 0,76	61:55,0	- 0,01	***	***	***	***	***	243,0		0:00,0	***	0:55,0	54:00,0	25:15,0	34:50,0
#3_2_patro_stred	310,5	54:05,0	38,0	63:50,0	+ 0,59	57:15,0	- 3,83	60:10,0	- 0,01	***	***	***	***	***			15:40,0	29:55,0	32:00,0	25:15,0	38:25,0	21:25,0
#4_3_patro_stred	280,5	58:05,0	149,5	63:55,0	+ 0,12	13:35,0	- 0,84	61:55,0	- 0,01	***	***	***	***	***			0:00,0	***	0:40,0	57:55,0	23:55,0	36:30,0
#5_4_patro_stred	289,5	50:05,0	146,5	63:55,0	+ 0,10	13:25,0	- 0,84	60:45,0	- 0,02	***	***	***	***	***			0:00,0	***	27:45,0	32:35,0	33:25,0	27:05,0
#6_4_patro_pravy	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***			***	***	***	***	***	***



AutoMag 4

Chargen-ID

201503011311

Wärmebehandlungsnachweis

Chargendaten

Chargen-ID:	15-03 1311 /01	Anlage:	AM1
FA-Nr (AMS):		Wärmebehandlung:	
Startzeit:	19.03.2015 08:27:14	Stoppzeit:	19.03.2015 13:12:52
Erstellt durch:	Jezek	Erstellt am:	19.03.2015 08:27:14
Geändert durch:	AM4-SYSTEM	Geändert am:	19.03.2015 13:12:52

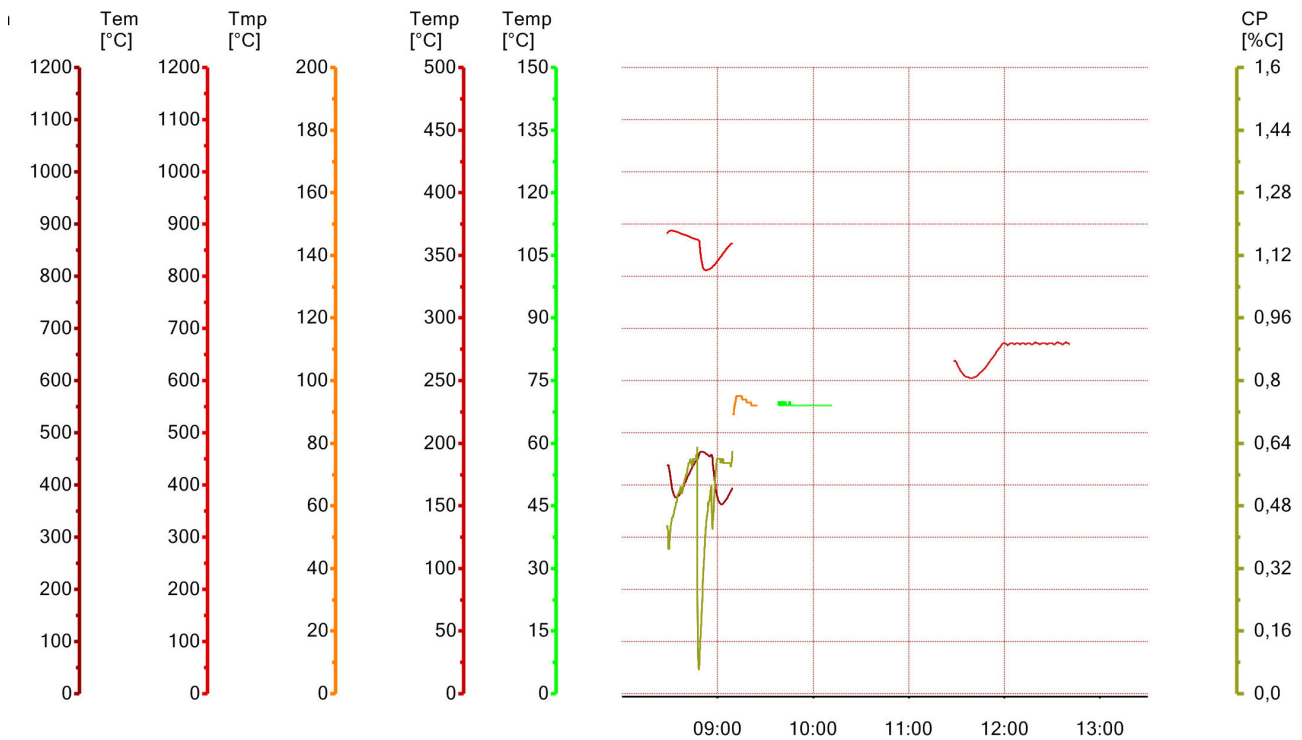
Auftragsliste

Auftragsnummer	Artikel- Nr	Artikelname	BHP-Nr	BHP-Name

280/40

Prozessschritt	Prozessschrittname	Programm	Ofen	Start	Ende	Status
1	Härten		TQQP-27.1	19.03.2015 08:28:24	19.03.2015 09:37:01	READY
2	Nachwaschen	WS 8/10/3/10	WPS-1	19.03.2015 09:38:07	19.03.2015 10:11:47	READY
3	Prüfen		LP43	19.03.2015 10:12:45	19.03.2015 11:19:33	READY
4	Anlassen	A 280/40	DL-27.2	19.03.2015 11:28:24	19.03.2015 12:40:56	READY
5	Kühlen	Kühlen 20	KP68	19.03.2015 12:41:51	19.03.2015 13:05:28	READY
6	Ausschleusen 1		OUT86	19.03.2015 13:06:33	19.03.2015 13:12:52	READY

Prozessverlauf (19.03.2015 08:27:14 - 19.03.2015 13:12:52)



- Temp. Vorwärmkammer TQ [°C]
- Temp. Heizkammer TQ [°C]
- C-Pegel TQ [%C]
- Temp. Ölbad TQ [°C]
- Temp. Ölbad TQ [°C]
- Temp. Heizkammer DL [°C]
- Temp. Wascher [°C]

Chargetracking

Station	Behandlungsschritt	Position	Startzeit	Stopzeit
UNI1		100	19.03.2015 08:22:54	19.03.2015 08:23:58
LP19		19	19.03.2015 08:23:58	19.03.2015 08:26:48
UNI1		100	19.03.2015 08:26:48	19.03.2015 08:28:22
TQQP-27.1		33	19.03.2015 08:28:22	19.03.2015 08:47:27
TQQP-27.1		133	19.03.2015 08:47:27	19.03.2015 09:09:22
TQQP-27.1		123	19.03.2015 09:09:22	19.03.2015 09:09:50
TQQP-27.1		122	19.03.2015 09:09:50	19.03.2015 09:19:45
TQQP-27.1		142	19.03.2015 09:19:45	19.03.2015 09:24:55
TQQP-27.1		42	19.03.2015 09:24:55	19.03.2015 09:36:57
UNI2		101	19.03.2015 09:36:57	19.03.2015 09:38:04
WPS-1		52	19.03.2015 09:38:04	19.03.2015 10:11:43
UNI2		101	19.03.2015 10:11:43	19.03.2015 10:12:43
LP43	3 - Prüfen	43	19.03.2015 10:12:43	19.03.2015 11:19:29
UNI2		101	19.03.2015 11:19:29	19.03.2015 11:20:34
KF1		51	19.03.2015 11:20:34	19.03.2015 11:22:45
KF1		67	19.03.2015 11:22:45	19.03.2015 11:27:01
UNI3		102	19.03.2015 11:27:01	19.03.2015 11:28:22
DL-27.2		85	19.03.2015 11:28:22	19.03.2015 12:40:53
UNI3		102	19.03.2015 12:40:53	19.03.2015 12:41:48
KP68	5 - Kühlen	68	19.03.2015 12:41:48	19.03.2015 13:05:25
UNI3		102	19.03.2015 13:05:25	19.03.2015 13:06:30
OUT86	Ausschleusen 1	86	19.03.2015 13:06:30	19.03.2015 13:12:52



AutoMag 4

Chargen-ID

201504011920

Wärmebehandlungsnachweis

Chargendaten

Chargen-ID:	15-04 1920 /01	Anlage:	AM1
FA-Nr (AMS):		Wärmebehandlung:	
Startzeit:	24.04.2015 14:08:16	Stoppzeit:	24.04.2015 18:33:22
Erstellt durch:	radim	Erstellt am:	24.04.2015 14:14:13
Geändert durch:	AM4-SYSTEM	Geändert am:	24.04.2015 18:33:22

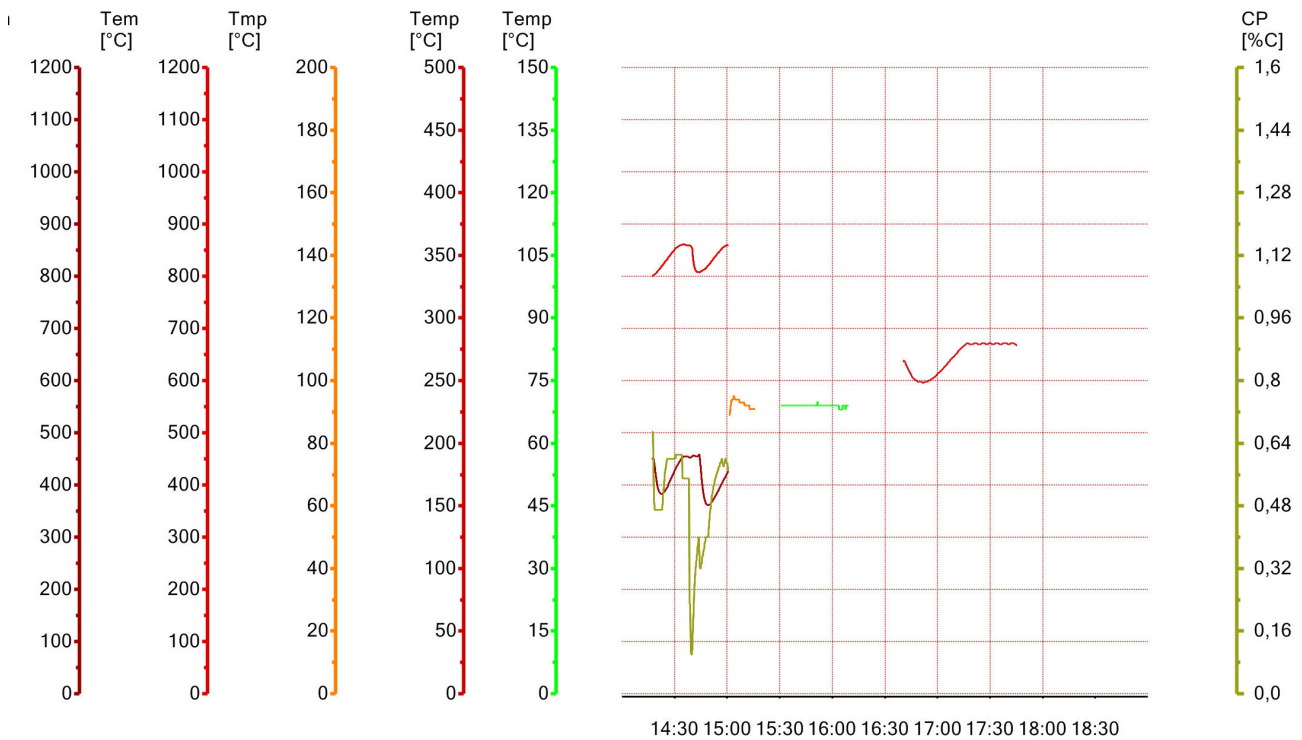
Auftragsliste

Auftragsnummer	Artikel- Nr	Artikelname	BHP-Nr	BHP-Name

280/30

Prozessschritt	Prozessschrittname	Programm	Ofen	Start	Ende	Status
1	Härten		TQQP-27.2	24.04.2015 14:17:22	24.04.2015 15:29:04	READY
2	Nachwaschen	WS 8/10/3/10	WPS-1	24.04.2015 15:30:48	24.04.2015 16:09:16	READY
3	Anlassen	A 280/30	DL-27.2	24.04.2015 16:40:23	24.04.2015 17:45:17	READY
4	Kühlen	Kühlen 20	KP68	24.04.2015 17:46:12	24.04.2015 18:25:07	READY
5	Ausschleusen 1		OUT86	24.04.2015 18:26:10	24.04.2015 18:33:22	READY

Prozessverlauf (24.04.2015 14:08:16 - 24.04.2015 18:33:22)



- Temp. Vorwärmkammer TQ [°C]
- Temp. Ölbad TQ [°C]
- Temp. Wascher [°C]
- Temp. Heizkammer TQ [°C]
- Temp. Ölbad TQ [°C]
- Temp. Heizkammer DL [°C]
- C-Pegel TQ [%C]

Chargetracking

Station	Behandlungsschritt	Position	Startzeit	Stopzeit
IN16	Einschleusen	16	24.04.2015 14:08:16	24.04.2015 14:12:30
UNI1		100	24.04.2015 14:12:30	24.04.2015 14:13:38
LP19		19	24.04.2015 14:13:38	24.04.2015 14:15:08
UNI1		100	24.04.2015 14:15:08	24.04.2015 14:17:19
TQQP-27.2	1 - Härten	29	24.04.2015 14:17:19	24.04.2015 14:39:05
TQQP-27.2	1 - Härten	129	24.04.2015 14:39:05	24.04.2015 15:00:32
TQQP-27.2	1 - Härten	119	24.04.2015 15:00:32	24.04.2015 15:01:06
TQQP-27.2	1 - Härten	120	24.04.2015 15:01:06	24.04.2015 15:10:55
TQQP-27.2	1 - Härten	139	24.04.2015 15:10:55	24.04.2015 15:15:49
TQQP-27.2	1 - Härten	39	24.04.2015 15:15:49	24.04.2015 15:29:01
UNI2		101	24.04.2015 15:29:01	24.04.2015 15:30:46
WPS-1	2 - Nachwaschen	52	24.04.2015 15:30:46	24.04.2015 16:09:13
UNI2		101	24.04.2015 16:09:13	24.04.2015 16:10:18
KF1		51	24.04.2015 16:10:18	24.04.2015 16:12:24
KF1		67	24.04.2015 16:12:24	24.04.2015 16:39:02
UNI3		102	24.04.2015 16:39:02	24.04.2015 16:40:20
DL-27.2	3 - Anlassen	85	24.04.2015 16:40:20	24.04.2015 17:45:14
UNI3		102	24.04.2015 17:45:14	24.04.2015 17:46:09
KP68	4 - Kühlen	68	24.04.2015 17:46:09	24.04.2015 18:25:04
UNI3		102	24.04.2015 18:25:04	24.04.2015 18:26:07
OUT86	Ausschleusen 1	86	24.04.2015 18:26:07	24.04.2015 18:33:22



AutoMag 4

Chargen-ID

201504010625

Wärmebehandlungsnachweis

Chargendaten

Chargen-ID:	15-04 0625 /01	Anlage:	AM1
FA-Nr (AMS):		Wärmebehandlung:	
Startzeit:	08.04.2015 09:56:04	Stoppzeit:	08.04.2015 13:47:56
Erstellt durch:	iav	Erstellt am:	08.04.2015 09:56:04
Geändert durch:	AM4-SYSTEM	Geändert am:	08.04.2015 13:47:56

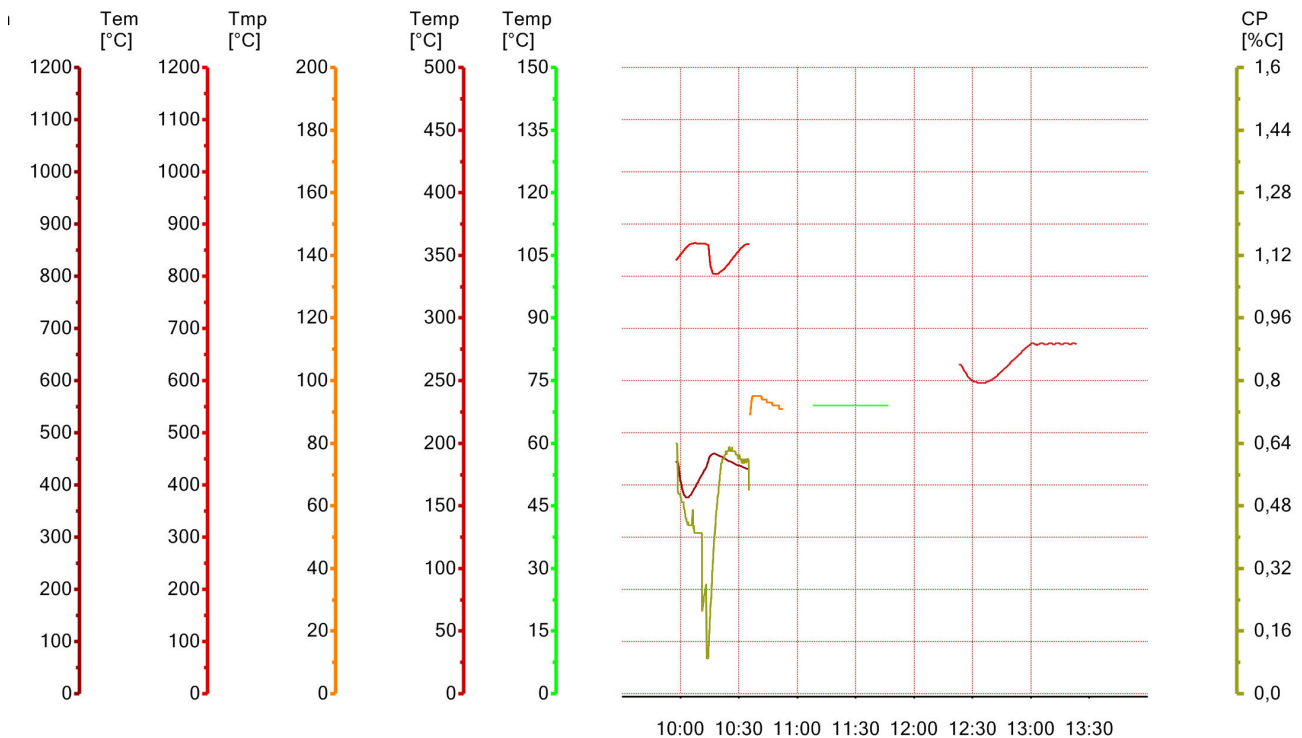
Auftragsliste

Auftragsnummer	Artikel- Nr	Artikelname	BHP-Nr	BHP-Name

280/25

Prozessschritt	Prozessschrittname	Programm	Ofen	Start	Ende	Status
1	Härten		TQQP-27.3	08.04.2015 09:57:46	08.04.2015 11:06:56	READY
2	Nachwaschen	WS 8/10/3/10	WPS-4	08.04.2015 11:08:11	08.04.2015 11:46:36	READY
3	Anlassen	A 280/25	DL-27.2	08.04.2015 12:23:01	08.04.2015 13:23:07	READY
4	Kühlen	Kühlen 20	KP68	08.04.2015 13:24:01	08.04.2015 13:45:16	READY
5	Ausschleusen 1		OUT86	08.04.2015 13:46:22	08.04.2015 13:47:56	READY

Prozessverlauf (08.04.2015 09:56:04 - 08.04.2015 13:47:56)



- Temp. Vorwärmkammer TQ [°C]
- Temp. Ölbad TQ [°C]
- Temp. Wascher [°C]
- Temp. Heizkammer TQ [°C]
- Temp. Ölbad TQ [°C]
- Temp. Heizkammer DL [°C]
- C-Pegel TQ [%C]

Chargetracking

Station	Behandlungsschritt	Position	Startzeit	Stopzeit
UNI1		100	08.04.2015 09:52:50	08.04.2015 09:53:57
LP19		19	08.04.2015 09:53:57	08.04.2015 09:55:26
UNI1		100	08.04.2015 09:55:26	08.04.2015 09:57:43
TQQP-27.3	1 - Härten	28	08.04.2015 09:57:43	08.04.2015 10:13:25
TQQP-27.3	1 - Härten	128	08.04.2015 10:13:25	08.04.2015 10:35:02
TQQP-27.3	1 - Härten	118	08.04.2015 10:35:02	08.04.2015 10:35:36
TQQP-27.3	1 - Härten	117	08.04.2015 10:35:36	08.04.2015 10:47:30
TQQP-27.3	1 - Härten	138	08.04.2015 10:47:30	08.04.2015 10:52:33
TQQP-27.3	1 - Härten	38	08.04.2015 10:52:33	08.04.2015 11:06:54
UNI2		101	08.04.2015 11:06:54	08.04.2015 11:08:09
WPS-4	2 - Nachwaschen	47	08.04.2015 11:08:09	08.04.2015 11:46:32
UNI2		101	08.04.2015 11:46:32	08.04.2015 11:47:56
KF1		51	08.04.2015 11:47:56	08.04.2015 11:50:05
KF1		67	08.04.2015 11:50:05	08.04.2015 12:21:36
UNI3		102	08.04.2015 12:21:36	08.04.2015 12:23:00
DL-27.2	3 - Anlassen	85	08.04.2015 12:23:00	08.04.2015 13:23:04
UNI3		102	08.04.2015 13:23:04	08.04.2015 13:23:57
KP68	4 - Kühlen	68	08.04.2015 13:23:57	08.04.2015 13:45:13
UNI3		102	08.04.2015 13:45:13	08.04.2015 13:46:19
OUT86	Ausschleusen 1	86	08.04.2015 13:46:19	08.04.2015 13:47:56