

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

**Materiálové testy ocelového plechu s tepelně
vytvrzovacím efektem**

Bakalářská práce

Autor: Pavel Šefčík

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzikálně–technická měření a výpočetní technika

Vedoucí práce: Ing. Karol Radocha, Ph.D., Ing. Lukáš Zuzánek

Hradec Králové

říjen 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, z kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne

Pavel Šefčík

Poděkování:

Mé díky patří Ing. Pavlu Pilařovi a Ing. Janu Škodovi, kteří umožnili vznik celého projektu a také Ing. Lukáši Zuzánkovi, který tuto práci odborně vedl a poskytl mi velmi cenné rady a podmětnou zpětnou vazbu během práce na projektu. Dále bych rád poděkoval Ing. Karolu Radochovi, Ph.D. za zaštitění celého projektu na akademické půdě univerzity Hradec Králové a také společnosti ALTRAN CZ a.s., která zapůjčila své vybavení a know-how. Díky rodině za její podporu, nekonečnou trpělivost a pochopení.

A nakonec ještě jednou, vřelé díky všem.

Anotace

ŠEFČÍK, P. *Materiálové testy ocelového plechu s tepelně vytvrzovacím efektem*. Hradec Králové, 2017. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karol Radocha, Ph.D. a Ing. Lukáš Zuzánek.

Bakalářská práce pojednává o chování oceli s tepelně vytvrzovacím efektem během procesu tváření, umělého teplotního stárnutí a následného stárnutí přirozeného. Je pozorován vliv tepelného a přirozeného stárnutí na mechanické vlastnosti materiálu. V Praktické části je popsán provedený experiment. Data z jednotlivých měření a vyhodnocení jsou přiložena jako konečná prezentace výsledků a protokol o měření.

Klíčová slova:

BH ocel, tahová zkouška, dislokace, kovová mikrostruktura

Annotation

ŠEFČÍK, P. *The Material tests of sheet metal of steel with beak hardening effect*. Hradec Králové, 2017. Bachelor thesis at the Faculty of Natural Sciences of the University in Hradec Králové. Bachelor thesis supervisors Ing. Karol Radocha, Ph.D. and Ing. Lukáš Zuzánek.

The bachelor thesis to discuss about behavior of the steel with beak hardening effect during forming, heat ageing and natural ageing processes. The effect of the heat ageing and natural ageing for mechanical properties is monitored. Whole realized experiment is described in practical part. All data from measuring and execution of the experiment are attach like final presentation of the results and test report.

Keywords:

BH steel, tensile test, dislocations, metal microstructure

Obsah

1 Úvod	5
2 Výrobní proces karosářských dílů.....	6
3 Složení BH oceli	7
4 Tváření.....	9
5 Struktura kovů	10
5.1 Bodové poruchy krystalové mřížky kovů.....	10
5.2 Dislokace.....	12
5.2.1 Hranová dislokace	14
5.2.2 Šroubová dislokace.....	14
5.2.3 Skluzová (Shockleyova) dislokace.....	15
5.3 Pohyb dislokací	16
5.3.1 Skluzový pohyb dislokace	16
5.3.2 Difuzní pohyb dislokace.....	17
5.4 Protínání dislokací	17
5.5 Frankův-Readův zdroj dislokací a další mechanismy	18
5.6 Dislokace v kovových strukturách	20
5.7 Interakce dislokací a ostatních poruch.....	21
6 Beak Hardening efekt	22
7 Na závěr teorie	24
8 Před započítím experimentu	24
9 Počáteční plastická deformace.....	29
10 Tepelné vytvrzení KTL.....	32
11 Ověřování mechanických vlastností materiálu	35
12 Vyhodnocení.....	36
13 Závěr	37
14 Seznam Použité literatury	37
15 Seznam použitých obrázků.....	38
16 Seznam příloh.....	38

1 Úvod

Materiály patří bezesporu do odvětví, které každý rok urazí neskutečně dlouhou cestu. Dnes a denně se dočítáme o konstrukcích, které se ještě nedávno

jevily jako naprosté science fiction, ale díky postupu materiálů kupředu jsou dnes skutečností. Velkou roli hrají materiály také pro jedno z nejvýznamnějších a největších odvětví průmyslu a tím je bezesporu průmysl automobilový. Zdokonalování materiálů ovlivňuje celé vozidlo, ať už se díváme na pohled z hlediska techniky, interiéru, exteriéru či třeba bezpečnosti. A je to nezbytností, protože řekněme si upřímně, že jsou na automobily kladeny stále větší a větší nároky.

Jak už bylo z počátku nastíněno, bude se tato práce zabývat materiály ve strojírenství, konkrétně jedním materiálem, a to ocelí s tepelně vytvrzovacím efektem neboli Beak Hardening ocelí. Smyslem této práce není „objevování Ameriky“, protože tento materiál i vytvrzovací efekt byly nespočetněkrát popsány v mnoha pracích. Účelem práce je přiblížit každému čtenáři procesy a děje v materiálech, které vnímá každý uživatel na konci výrobního procesu jako naprostou samozřejmost.

2 Výrobní proces karosářských dílů

Málo kdo se při cestování automobilem zamyslí nad tím, co všechno musí takový automobil podstoupit před tím, než se ve formě hotového výrobku dostane k zákazníkovi. A věřte nebo ne, ale jeho cesta je vcelku dlouhá a obtížná. Cílem této úvodní kapitoly je, Vám tuto cestu trochu přiblížit alespoň z hlediska jednotlivých karosářských dílů. Na začátku všeho jsou velké těžké svitky plechu, které mnohdy cestou na výrobní linky automobilových výrobců objedou i půlku světa. I to je jeden z důvodů, proč jsou svitky ocelových plechů před odesláním ještě impregnovány speciální olejovou emulzí a baleny do ochranných vaků, které zabrání tomu, aby plechy cestou výrazně degradovaly a jejich vlastnosti se měnily.

Ačkoliv materiály urazily dlouhou cestu i z hlediska korodování a stálosti, je nutné vzít v potaz fakt, že tloušťky zpracovávaných plechů se neustále zmenšují, a proto je jejich ošetření před transportem klíčovou záležitostí. Poté co plechy projdou vstupní kontrolou putují do skladu výrobního závodu, odkud se přesouvají do výroby, konkrétně na trn vstupního odvíjecího zařízení. Uplatňuje se zde tzv. nekonečný svitek, což znamená, že jednotlivé části rolí jsou mezi sebou napojovány

a tvoří tak jednu stovky metrů dlouhou roli. Pro velkosériové výroby obecně platí, že je pro ně velmi důležitá homogenita dodaných materiálů. To proto, aby mohli docílit faktu, že jeden vyrobený kus bude stejný jako druhý. Nejinak je tomu i v tomto případě. A jelikož někdy cestují role plechů od výrobce k zákazníkovi i dlouhé týdny a jejich hmotnost je nemalá, musí před jejich tvářením a zpracováním dojít k narovnání a obnově (homogenizaci) plechů samotných včetně ochranné olejové vrstvy. Hned poté je možné začít plechy tvářet do požadovaných tvarů a rozměrů. Plechy se tváří za studena zejména procesy lisování a stříhání. O dané procesy se starají obrovské lisy s výměnnými matricemi, čímž je zaručeno použití zařízení pro různé díly. I plechy jako takové jsou v tomto stavu měkké a tažné, což zaručuje dobrou možnost tvářením plechů za studena, aniž by docházelo k výraznější zmetkovitosti kovových výlisků. Samozřejmě, že je možné na automobilových konstrukcích nalézt dvě základní skupiny dílů. A to jsou díly bezpečnostního charakteru, kde jejich vysoká tvárnost umožňuje vstřebávat a odvádět pryč energii přijímanou během nárazu, aniž by zásadně ohrozila posádku automobilu a pak jsou tu díly pevné a špatně tvářitelné, které naopak slouží jako díly nosné. Není možné používat zcela měkké plechy, které jsou dnes neodmyslitelnou součástí pasivní bezpečnosti automobilu, tak jak je možné je vidět během procesů tvářením, a proto je nutné najít nějaký zdravý kompromis.

V tento okamžik vstupuje na scénu již zmíněný BH efekt, který dopodrobna popíši v dalších kapitolách. Tento efekt se aktivuje během vytvrzovacích procesů v lakovně při působení vyšších teplot a má za následek, že plechy do jisté míry ztratí část své tažnosti a nabývají vyšší pevnosti a meze kluzu, tedy přechodu mezi plastickou a stálou deformací, a ještě více tak podpoří zpevnění materiálu, které již už do jisté míry nastalo během procesu tvářením. A výsledkem jsou právě ty karoserie, se kterými se setkává běžný uživatel ve chvíli kdy obdivuje ladné linie svého nového automobilu.

3 Složení BH oceli

Výrobce garantuje u námi zkoumané BH oceli obsah příměsí, které jsou vedle železa v námi zkoumaném materiálu obsaženy. Jednotlivé prvky jsou uvedeny v následující tabulce 1. Složení prvků oceli bylo ověřeno chemickou analýzou

dodaných plechů, jejichž výsledky budou odprezentovány níže. Je dobré podotknout, že právě chemické složení prvků je základem pro objasnění vlastností materiálu.

1) Tab.1) Zastoupení jednotlivých prvků ve zkoumaném materiálu

Materiál	Uhlík (C)	Křemík (Si)	Mangan (Mn)	Fosfor (P)	Síra (S)	Hliník (Al)	Měď (Cu)
CR 180	≤ 0,06	≤ 0,50	≤ 0,70	≤ 0,060	≤ 0,025	≥ 0,015	≤ 0,20
BH	%	%	%	%	%	%	%

Pojďme se nyní podívat na význam jednotlivých příměsí pro daný materiál.

Uhlík (Carbon)

Podobně jako dusík má i uhlík značný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Volné atomy dusíku v podobě intersticiálního tuhého roztoku mohou za jistých okolností pronikat do krystalové mřížky, čímž zvyšují její vnitřní napětí a brání dislokacím v jejich pohybu, čímž dochází k růstu meze kluzu při nezměněné pevnosti materiálu. Dále se projevuje tzv. stárnutím oceli, tedy snížením tvářitelnosti za studena a proto je obecnou snahou výskyt tohoto prvku v ocelích tvářitelných za studena co nejvíce omezit.

Křemík (Si)

Podobně jako uhlík snižuje i křemík tvářitelnost za studena, na druhou stranu zvyšuje pevnost železných materiálů.

Mangan (Mn)

Legující neboli přísadový prvek, který se do materiálu přidává úmyslně za účelem zlepšení vlastností, jakými jsou například velikost zrna, korozní odolnost, tvářitelnost, pevnost. Mezi další legující materiály patří Hliník a Měď. Právě vhodnou kombinací legujících materiálů je možné dosáhnout požadovaných materiálových vlastností.

Fosfor (P)

Jedná se o prvek, který v ocelových slitinách způsobuje lámavost a také stojí za snížením vrubové houževnatosti.

Síra (S)

Právě síra stojí za tvorbou sulfidu železitého (FeS), ten pak zhoršuje tvářitelnost za studena a odolnost materiálu proti korozi. Vlivy síry v kovových materiálech považujeme za nepříznivé, a proto se snažíme o jejich eliminaci pomocí legujících prvků jako je například mangan popsany výše nebo pak prvky vzácných zemin.

4 Tváření

Jak už bylo naznačeno výše, dochází při zpracování plechů k tváření za studena. Při tomto tváření dochází ke zpevnování materiálu, zároveň se také navyšuje odpor vůči dalšímu tváření. Tento děj pokračuje až do chvíle, kdy dojde k vyčerpání plasticity materiálu. Po vyčerpání plasticity dochází k trvalé deformaci zrn ve směru vektoru tvářitelné síly následované tvorbou textury. Výsledkem je anizotropie mechanických vlastností. Tento jev se zdá jako velmi prostý, nicméně v pozadí stojí poměrně složité procesy, které se pokusím podrobněji vysvětlit v nadcházejících řádcích. Začneme tím, že si zodpovíme otázku, co je to vlastně plastická deformace?

O plastické deformaci je možno uvažovat tak, že se jedná o vzájemný pohyb částic kovu vůči sobě. Jedná se o nevratnou deformaci, která nastává po porušení oblasti plasticity, tedy oblasti, po jejímž překonání se materiál po zatěžování nevrátí do svého původního stavu. Rozměry zatěžovaného tělesa se trvale změní. Při plastické deformaci platí zákon o zachování objemu těles, tedy roste-li některý z rozměrů tělesa, pak vždycky na úkor jiného rozměru. Krystalová mřížka kovů není dokonalá a vlivem deformace dochází k pohybu a vzniku mřížkových poruch. Poruch krystalové mřížky existuje velké množství. Patří k nim bodové vakance, interstice, substituce, čárové hranové, plošné vrstvené, prostorové. Největší význam vzhledem k plastickým deformacím mají lineární čárové poruchy neboli dislokace.

5 Struktura kovů

Jelikož se v následujících kapitolách budu detailněji zabývat pojmy jako Dislokace, krystalová mřížka nebo kovová struktura, považuji za vhodné na tomto místě vysvětlit některé základní pojmy pevně spojené s touto tematikou.

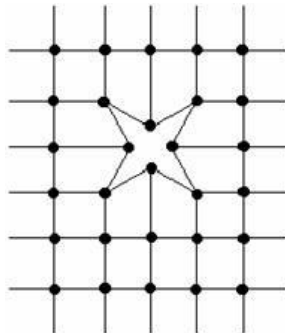
Vše hmotné, co nás obklopuje je sestaveno z různých částic, tedy molekul, atomů, iontů. Některé látky jsou tvořeny pravidelným uspořádáním v cyklicky opakovaném vzoru. Je-li tento vzor zachován z pohledu atomárního měřítka i na velmi dlouhé vzdálenosti, vytváří uskupení, které se nazývá jednotkovou buňkou. Dojde-li k pravidelnému opakování jednotkové buňky ve třech rozměrech, dojde ke vzniku tzv. krystalové mřížky. Nekonečným opakováním krystalové mřížky teoreticky vznikne uskupení ideálního krystalu. Taková struktura je ve všech směrech nekonečná, zcela pravidelná a prostá jakýchkoliv poruch. Nicméně je zcela jasné, že pojem ideální v přírodě neexistuje a člověk tento pojem vymyslel proto, aby mohl věci zjednodušit a naučit se lépe chápat přírodní principy. Ačkoliv není možné setkat se s ideálním krystalem, můžeme se setkat s něčím, co se ideálnímu krystalu zdánlivě blíží, a to s monokrystalem.

Monokrystaly se samozřejmě nerozpínají do nekonečna, ale jsou tvořeny periodicky opakující se krystalovou mřížkou v celém svém objemu. Nicméně i v této struktuře se vyskytují krystalové poruchy. Mezi tyto látky patří například křemen nebo diamant. Poté existují také uskupení polykrystalu. Jak již samotný název napovídá, jedná se o opakující se struktury krystalů. Tyto miniaturní struktury vytváří jednotlivá zrna materiálu, která jsou od sebe oddělena tzv. hranicemi zrn. Uvnitř těchto zrn jsou částice uspořádány pevně a pravidelně, nicméně vzájemná poloha jednotlivých zrn není nikterak pravidelná, naopak je ryze náhodná. A právě kovy řadíme do skupiny polykrystalů. Stejně jako u monokrystalů i polykrystalické struktury jsou zatíženy různými poruchami. Poruchy jsou různé a stejně tak odlišný může být jejich význam pro chování materiálu. Poruchy krystalové mřížky kovů můžeme rozdělit do 4 základních skupin (bodové, lineární, plošné, objemové).

5.1 Bodové poruchy krystalové mřížky kovů

Někdy jsou označovány taktéž jako vakance. Množství vakancí v krystalové struktuře je teplotně závislé, se zvyšující se teplotou jejich výskyt narůstá. Fyzicky

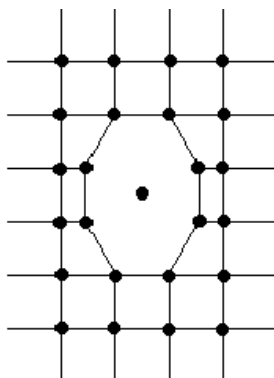
se jedná o atomem neobsazený uzel krystalové mřížky. Pro lepší představivost je možné ilustrativní obrázek bodové poruchy vidět na obrázku č.1.



Obr.1) Vakanční porucha krystalové mřížky

Aby mohlo dojít k vakanční poruše, musí určitá skupina částic vstřebat množství energie, které jim dovolí vyprostit se z pevného uskupení krystalové mřížky. Zdrojem této energie může být tepelný pohyb, ozáření krystalu proudem elektronů iontů či neutronů.

Další možností bodové poruchy jsou tzv. Intersticiální atomy označované také jako interstice. Jedná se o atomy, které jsou „vklíněny“ do mezi uzlových prostor. Důležité je, že v krystalových mřížkách kovů mohou tuto poruchu vyvolat jen a pouze atomy pěti nekovů. Jedná se o Uhlík, Kyslík, Vodík, Bor a Dusík. U námi zkoumaného materiálu je to právě Uhlík, který vznik těchto bodových poruch umožňuje. Interstice deformují svoje okolí uvnitř krystalové mřížky, tím vnášejí do krystalické struktury napětí, což má za následek zpevnění materiálu.



Obr.2) Intersticiální atom uvnitř krystalové mřížky

Ještě považuji za vhodné zmínit se o substituční poruše krystalové mřížky. Jedná se o chybu, kdy je původní částice v krystalové mřížce nahrazena jinou částicí, která do mřížky nepatří. Daná chyba může vznikat přírodně, kvůli nečistotě kovů. Nebo je schválně vytvořena během zpracování kovu formou vhodné příměsi, která ovlivňuje vlastnosti výsledné slitiny.

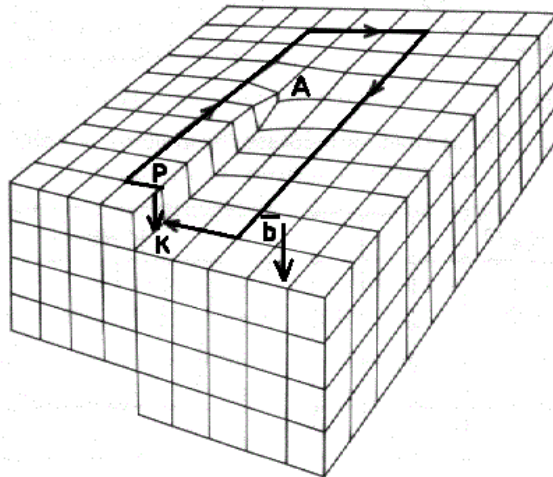
5.2 Dislokace

V české literatuře vystupují často pod názvem čárové poruchy a to proto, že tvar porušené části mřížky krystalu je zpravidla charakteru čáry. Jedná se o vysunutí atomů ze svých původních poloh krystalové mřížky nebo se dá také říci, že se jedná o přesun atomových rovin. Tato vysunutí se mohou pohybovat, vznikat i zanikat. Čárová porucha v krystalu vytvoří pružnou deformaci mřížky, která kolem celé dislokace vytvoří určité napětí.

Dislokace byla zavedena jakožto pojem ve chvíli, kdy byl zjištěn rozpor teoretických poznatků s výsledky experimentů. Při výpočtech kritického skluzového napětí, což je napětí, při kterém dochází k překročení meze kluzu (přechod mezi plastickou a trvalou deformací) docházelo k odlišnostem mezi experimentálně získanou hodnotou a hodnotou vypočítanou z teoretických poznatků, a to až o čtyři řády, přičemž hodnoty zjištěné výpočtem byly větší. A proto bylo nutné zamyšlení. Nakonec badatelé došli následujícího zjištění. Výpočet nesprávně uvažoval fakt, že skluz v krystalové mřížce je synchronní v celé uvažované rovině skluzu. Původní předpoklad byl takový, že vazebné atomární síly musejí být překonány v celé skluzové rovině současně.

Po zjištění rozporu teorie a experimentu, bylo nutné začít uvažovat o tom, že by se mohl skluz šířit postupně z místa své iniciace a že existuje část skluzové roviny, ve které ke skluzu doposud ještě nedošlo, a právě proto je dislokace považována za časovou poruchu krystalové mřížky. Tím je zřejmé, že se skluz děje pohybem dislokace ve skluzové rovině. Dislokace popisujeme t-vektory, které mají dané vlastnosti. Především jsou to spojnice středů atomů se stejným okolím, které není možné sestavit kombinací kratších vektorů.

Uvažujme o krystalové mřížce tak, že ji rozdělíme na dvě oblasti. Jedna z oblastí neobsahuje žádnou poruchu. Vezměme libovolný počet vektorů typu t a uspořádejme je do uzavřené smyčky. Pokud se pokusíme identickou smyčku vytvořit i v oblasti s poruchami, zjistíme, že smyčku nejsme schopni pomocí stejného počtu t -vektorů uzavřít stejným způsobem jako v předchozím případě. V tuto chvíli použijeme vektor jiného druhu k uzavření smyčky. Tento vektor je znám jako vektor b (Burgersův) a spojuje počáteční a koncový bod smyčky tvořené t -vektory. Ona smyčka nese pojmenování po významném nizozemském fyzikovi Johannesu Martinusovi Burgersovi, jenž se mimo jiné značnou měrou podílel na objevení a popisu dislokací. Pro lepší vizualizaci je možné vidět zakreslení Burgersovy smyčky na obrázku č.3 níže.



Obr.3) Vyobrazení Burgersovy smyčky v ilustrativní mřížové struktuře

Z uvedeného obrázku vyplývá, že dislokace je lineární porucha, kolem níž není vytvořena Burgersova smyčka uzavřena. Pomyslná čára vedená po středu porušené oblasti by byla čarou dislokační. Podle vztahu Burgersova vektoru k dislokační čáře, je možné rozdělit dislokace do dvou skupin a to na hranovou a šroubovou. O hranové dislokaci hovoříme ve chvíli, kdy b -vektor s dislokační čarou svírají pravý úhel. Jsou-li b -vektor a dislokační čára rovnoběžné, jedná se o dislokaci šroubovou. Mezi oběma druhy dislokací můžeme rozlišit ještě stav obecně smíšené dislokace, kdy dislokační čára svírá s Burgersovým vektorem libovolný úhel s výjimkou již zmíněných 90° .

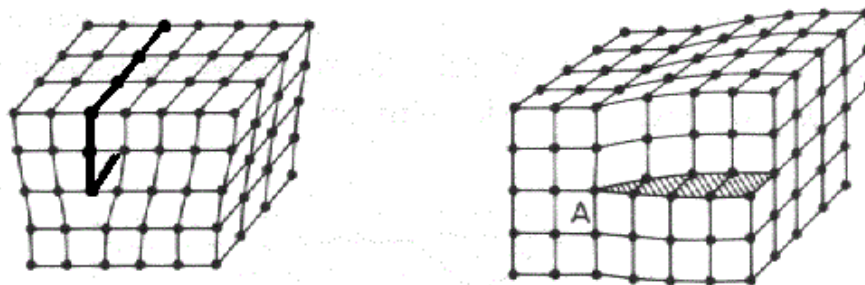
5.2.1 Hranová dislokace

Uvažujme o krystalové mřížce kovu jako o souboru rovin atomů. Rozdělíme-li tento soubor na dvě části a do vzniklé mezery vložíme polorovinu, dojde ke vzniku hranové dislokace. Přičemž spodní strana této poloroviny je hranovou dislokací.

Rozlišujeme kladné a záporné hranové dislokace, a to v závislosti na tom, zdali je atomová polorovina nad nebo pod skluzovou rovinou krystalu. O kladné hranové dislokaci mluvíme ve chvíli, kdy se vložená polorovina nachází nad rovinou skluzu. Dislokace zpravidla končí na povrchu krystalu nebo hranicích zrn, tedy za předpokladu, že nevytvářejí smyčku, to plyne z její definice jakožto hranice oblasti skluzu.

5.2.2 Šroubová dislokace

V literatuře někdy nese označení jako Burgersova. Představme si objemovou mřížku krystalu, tuto mřížku v její polovině „nastříhněme“ a jeden z volných konců zatlačme nebo vysuňme. Pro veškeré úvahy je nutné si uvědomit, že veškeré pohyby a posuny probíhají výhradně na molekulární úrovni, takže pokud mluvíme o vysouvání nebo zasouvání, děje se tak pouze na mezi atomárních vzdálenostech.



Obr.4) Vizualizace hranové dislokace (vlevo) a šroubové (vpravo)

Obě zmíněné dislokace mají jednu společnou vlastnost. U šroubových a hranových dislokací má v krystalové mřížce Burgersův vektor velikost jednotkové translace (pojmem translace označujeme posuvný pohyb v krystalové mřížce, pokud jde o jednu mezi atomární vzdálenost, viz. obrázek 4, mluvíme o jednotkové translaci). To je důvod, proč se o daných dislokacích mluví jakožto o jednoduchých. Pokud je výsledný b-vektor násobkem jednotkové translace, jedná se o dislokace násobné. Násobné dislokace jsou nestálé a běžně se rozkládají na dislokace jednoduché. V každém případě, ať už jde o dislokaci jednoduchou nebo složenou, vždy se jedná

o dislokaci úplnou. Úplná dislokace je dána velikostí Burgersova vektoru vzhledem k jednotkovému pohybu. Je-li Burgersův vektor celistvým násobkem jednotkové translace, jedná se o dislokaci úplnou a to i tehdy, jedná-li se o pouhý jednonásobek.

Další skupinu tvoří dislokace parciální, zjednodušeně neúplné nebo částečné. Velikost Burgersova vektoru je v případě částečných dislokací menší než jednonásobek jednotkového translačního pohybu. Tento typ poruchy velmi často vytváří okraj vrstvené chyby. Rozlišujeme dva základní druhy neúplných dislokací a to Skluzové a zakotvené.

5.2.3 Skluzová (Shockleyova) dislokace

Vyznačuje se tím, že Burgersovy vektory tohoto druhu dislokací leží přímo v rovinách na sebe vrstvených chyb. Daný druh dislokací se může pohybovat skluzovým pohybem, avšak tento pohyb je do jisté míry brzděn, protože samotný pohyb skluzové dislokace za sebou vytváří vrstvenou chybu, k čemuž je spotřebováno určité množství energie.

Oproti tomu zakotvená dislokace se posouvá pohybem difuzním. Tento pohyb je spjatý s pohybem bodových vakancí nebo intersticiálů. Vzniku zakotvené dislokace předchází pohyb dvou neúplných dislokací spojených pásem vrstvené chyby tzv. rozšířená dislokace. Ke vzniku rozšířené dislokace může dojít kdykoliv během rozpadu jakékoliv úplné dislokace. Pokud některé dislokace zásadně ovlivňují velikost plastické deformace materiálu, jedná se právě o dislokace rozšířené. Zejména pak ve chvíli, kdy se dvě rozšířené dislokace šířící se v různých rovinách setkají. Během tohoto okamžiku může dojít ke složení předních neúplných dislokací v neúplnou koutovou dislokaci. Takto vzniklá porucha je zakotvená a velmi stálá, v různých rovinách je spojena dvěma páry vrstvených chyb. Nazývá se Lomerovou-Cottrellovou dislokací, díky zakotvení se nemůže pohybovat, a to ani difuzním pohybem. Právě tato dislokace má fatální vliv při zpevnění plastické deformace. Několikrát jsem se v předešlých řádcích zmiňoval o pohybech dislokací, nyní bych rád toto téma rozebral podrobněji.

5.3 Pohyb dislokací

Fakt, že se mohou dislokace pohybovat, je velmi významný. Dislokace se může pohybovat pouze jako část, ale také jako celek. Tato skutečnost může vést ke změně tvaru dislokační čáry. Posun dislokací může být vyvolán mřížkovými poruchami, ale také vnějšími silami, které vyvolávají napětí. Obecně je hodnota energie dislokace závislá na její poloze a délce dislokační čáry. Existují dva základní druhy pohybu dislokací, a to difuzní a skluzové.

Dislokace se běžně pohybují na vzdálenosti, které jsou menší než vzdálenosti mezi atomy. V ideálním krystalové struktuře by docházelo k pohybu dislokací při působení jen velmi malého napětí, avšak v reálných strukturách je pohybu dislokací bráněno právě ostatními poruchami krystalové mřížky.

Během pohybu, vzniku a zániku dislokací může a nemusí docházet k přenosu hmoty. Pokud je hmota přenášena, hovoříme o pohybu nekonzervativním. V opačném případě se jedná o pohyb konzervativní. Na dislokační čáru je nutné vždy nahlížet jako na křivku, pouze v omezených částech totiž dislokace dosahují čistě hranového nebo šroubového charakteru. Vznikne-li dislokace v podobě uzavřené smyčky je možné ji vnímat jako obecnou dislokační čáru.

5.3.1 Skluzový pohyb dislokace

Skluzový pohyb hranové dislokace se vyznačuje se tím, že dislokační čára je rovnoběžná se směrem Burgersova vektoru. Průběh pohybu je omezen výhradně na skluzovou rovinu, ve které leží právě dislokační čára s Burgersovým vektorem. Rovina skluzu je za běžných podmínek taková rovina, která má největší atomární hustotu. Dojde-li k tomu, že vložená polorovina doputuje až na povrch krystalové struktury, vytvoří uskupení, kterému se říká skluzový stupeň. Pro jednoduchost si představte postupně postupující vlnu, která když doputuje na povrch, vytvoří na povrchu polorovinu, která naruší symetrický tvar mřížky.

Podobně jako pro hranovou dislokaci, i pro dislokaci šroubovou platí, že směr dislokační čáry je rovnoběžný s Burgersovým vektorem. Na rozdíl od hranové dislokace, se může šroubová dislokace pohybovat šplhavým pohybem napříč několika skluzovými rovinami. Jinými slovy se může pohybovat v libovolném svazku rovin, tedy za předpokladu, že jejich průsečnicí je dislokační čára. Pokud k takovému

pohybu opravdu dojde, jedná se o příčný skluzový pohyb. Rovinu, do které dislokace přejde pak označujeme jako rovinu příčného skluzu.

5.3.2 Difuzní pohyb dislokace

Dochází k němu během přemísťování intersticiálních atomů nebo vakančních bodových poruch. Difuzní pohyb směřuje kolmo k Burgersovu vektoru, týká se vklíněné poloroviny. Okrajové atomy poloroviny v krystalové mřížce se mohou dostávat do intersticiálních nebo vakančních poloh, tedy obsazují volná místa v uzlových bodech nebo se mezi uzlové body „protlačí“. Zde říkáme, že se dislokace pohybuje nahoru. Při pohybu dislokace dolů nastává jev opačný, tedy pohyb vakancí a intersticiálů směrem k vložené polorovině. Difuzní pohyb umožňuje hranovým dislokacím posun mezi jednotlivými skluzovými rovinami.

5.4 Protínání dislokací

Je více než zřejmé, že pohybem mnoha dislokací v dislokačních rovinách provázaných krystalových strukturách může dojít k setkávání pohybujících se dislokací s jinými dislokacemi, které v dané rovině neleží. Z výkladového hlediska a pro zjednodušení je vhodné uvažovat o protínání dislokací tak, že dislokace mají čistě šroubový nebo hranový charakter a že ve chvíli protnutí, spolu dvě dislokace svírají pravý úhel. Nicméně realita je daleko složitější. Dislokace ležící mimo dislokační rovinu jsou tzv. dislokacemi lesa a společně tvoří uskupení označované jako dislokační les. Pohybující se dislokace pak nějakou část dislokačního lesa protne. Dále je zde fakt, že dislokace lesa nejsou ke skluzové rovině kolmé. Existuje mnoho druhů možností, jak se dvě dislokace protnou, tím nejvýznamnějším je případ, kdy se společně protnou dvě šroubové dislokace. Během tohoto jevu vznikají na obou dislokacích stupně s hranovou orientací. Pohybuje-li se skluzovým pohybem hranová dislokace se stupněm, pak výlučně včetně svého stupně, který ji tak nikterak neklade při pohybu žádný odpor. Oproti tomu, při pohybu šroubové dislokace se stupněm, dochází k velmi prudkému pohybu stupně pomocí difuzního pohybu, ten je velice prudký. Tím dojde k vytvoření hranových oblastí, jež mají skluzové roviny orientované v těsné blízkosti nad sebou, což umožňuje za vhodných podmínek vzniku vakancí či intersticiálních atomů.

Šroubové dislokace s vytvořenými stupni, jsou pohybem těchto stupňů významně přibrzdovány. Jejich pohyb v porovnání s hranovými dislokacemi je za stejných podmínek asi 50x pomalejší.

Vedle stupňů může také docházet ke vzniku ohybů. Odlišnost ohybu a stupně spočívá v tom, že stupeň leží ve stejné skluzové rovině jako dislokace, na které vznikl. Porovnáme-li vlastnosti stupně a ohybu, zjistíme, že ohyb je nestabilní, snadno dojde k jeho vymezení napřímením dislokační čáry během tahového namáhání.

Protínání dislokací je běžný jev, ke kterému dochází zejména během procesu plastické deformace materiálu. To je důvod, proč dochází ke vzniku dislokací se stupni, jejichž pohybem jsou tvořeny v pravidelné krystalové struktuře bodové poruchy, zejména vakance, neboť energie nutná k jejich vzniku je menší než v případě intersticiálních atomů. V každém případě celá problematika protínání dislokací je ještě mnohem složitější, protože dochází k vzájemným pružným interakcím mezi jednotlivými dislokacemi.

5.5 Frankův-Readův zdroj dislokací a další mechanismy

Představme si pomyslnou dislokační čáru o délce l , pevně zakotvenou na svém počátku a konci. Zakotvení dislokační čáry je způsobeno rozsáhlým souborem čárových poruch, nečistot a dalších nedokonalostí krystalové mřížky. Působí-li na zakotvenou dislokační čáru smykové napětí o velikosti τ , začne se „rovná“ čára deformovat a zakřivovat. Potřebné smykové napětí k dosažení deformace s žádaným poloměrem r je rovno:

$$(1) \quad \tau = \frac{G \cdot \vec{b}}{r},$$

kde hodnota G odpovídá modulu pružnosti ve smyku pro daný materiál a \vec{b} je Burgersův vektor.

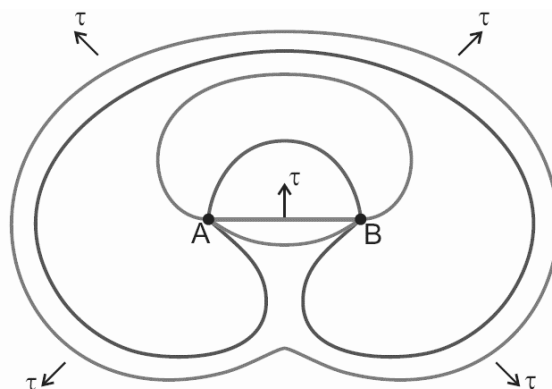
Působením napětí na dislokační čáru se poloměr zakřivení vznikající křivky postupně zmenšuje, a to až do hodnoty $r_M = \frac{l}{2}$, tedy na polovinu délky původní dislokační čáry. Této hodnotě odpovídá určitá hodnota smykového napětí, která je označována jako kritická. Hodnota kritického napětí je dána vztahem

$$(2) \quad \tau_K = 2 \cdot \frac{G \cdot \vec{b}}{l}$$

Hodnota τ_K může vyvolat další pohyb dislokační čáry, což způsobuje růst poloměru zakřivení r .

Velký význam nese okamžik, ve kterém se oba konce zakřivené dislokační čáry setkají. Vzájemným dotykem se obě části spojí načež dojde k rozdělení původní dislokační čáry na dvě části. Z jedné části vznikne nová samostatná smyčka a druhá část se vrátí do svého původního, výchozího stavu. Tento děj se může opakovat, avšak počet opakování je omezen na desítky, někdy stovky cyklů. Všechny vytvořené dislokační smyčky mají totiž stejnou orientaci a tudíž se vzájemně odpuzují. Tím pak silově působí proti zdroji vzniku. Tento jev byl objeven a popsán v roce 1950 dvojicí Frank, Read a dodnes nese jejich jména jako Frank-Readův zdroj dislokací. V některé literatuře se s ním můžeme setkávat pod pojmem „dislokační mlýn“.

Ačkoliv je tento zdroj bezpochyby nejvýznamnějším zdrojem dislokací, není ani zdaleka jediný. Mezi další mechanismy vzniku dislokací v pevných látkách můžeme zmínit také opakovaný příčný skluz. Jestliže u Frank-Readova zdroje může docházet ke vzniku dislokací hranových i šroubových, v případě opakovaného příčného skluzu vznikají pouze dislokace šroubové, protože právě jen ony mohou přejít do jiných skluzových rovin během příčného skluzu. Význam tohoto zdroje dislokací spočívá v tom, že může dojít ke vzniku většího množství dislokací nejen v původní skluzové rovině, ale také v sousedních rovnoběžných rovinách.



Obr.5) Mechanismus Frank-Readova zdroje dislokací (dislokační mlýn)

Dalším známým mechanismem šíření dislokací je Bardeenovův-Heringův mechanismus, který je založen na schopnosti hranových dislokací šplhat. Další

možností je vznik dislokací v oblasti trhlinek, kde je z pravidla vyšší napětí, které dostačuje k vytvoření dislokací nebo dislokace vyvolané tepelným pnutím.

Na druhou stranu je tu také možnost existence krystalů, kde se žádné dislokace nevyskytují. Jedná se o materiálové monokrystaly o velmi malých rozměrech, řádově je jejich průměr roven desetinám mikrometrů. Anglicky se tyto vzorky označují jako whiskery a vyznačují se právě tím, že jejich reálná pevnost je rovna pevnosti, kterou lze získat provedením teoretických výpočtů.

5.6 Dislokace v kovových strukturách

O tom, jak moc je dislokace v krystalové struktuře stálá nebo ne, rozhoduje hodnota její energie E , dána výrazem

$$(3) \quad E = k \cdot \vec{b}^2$$

. Hodnoty konstanty úměrnosti k pro šroubovou a hranovou dislokaci se liší.

Dojde-li k setkání několika dislokací, může nastat děj, kdy výsledná energie dislokací poklesne, aniž by došlo ke změně Burgersova vektoru. To je způsobeno tím, že dislokace předají určitou část svojí energie do krystalové mřížky. Orientace výsledné energie může být kladná, záporná, či 0. Upřednostňovány jsou obvykle reakce s kladnou energetickou orientací, čímž dochází ke snižování energie. To je také důvod toho, že u stálých dislokací je Burgersův vektor nerozložitelný na nižší hodnoty, u kterých by výsledný součet nové dislokace dával nižší úroveň energie.

Z tohoto pohledu, budou tedy vždy stále jen dislokace mající Burgersův vektor \mathbf{b} nerozložitelný na menší hodnoty. Je to také důvod, proč dochází k rozpadu násobných dislokací na dislokace jednoduché, jak již bylo popsáno výše.

Při rozkladu dislokací do dvou směrů lze realizovat rozložením Burgersova vektoru na složky \mathbf{b}_1 a \mathbf{b}_2 . Závislost velikosti jednotlivých složek a velikost celého Burgersova vektoru je ve vzájemném vztahu daném cosinovou větou:

$$(4) \quad \vec{b}^2 = \vec{b}_1^2 + \vec{b}_2^2 + 2 \cdot \vec{b}_1 \cdot \vec{b}_2 \cdot \cos\varphi,$$

úhel φ je úhel, který spolu svírají jednotlivé složky \mathbf{b}_1 a \mathbf{b}_2 . Provedeme-li drobnou úpravu rovnice vynásobením hodnotou konstanty úměrnosti k dostáváme rovnici energie

$$(5) \quad E = k \cdot 2 \cdot \vec{\mathbf{b}}_1 \cdot \vec{\mathbf{b}}_2 \cdot \cos\varphi.$$

Poslední člen rovnice rozhoduje o celkové orientaci výsledné energie. Jeho velikost je závislá na úhlu svírajícím složkami. Pro hodnoty $0 \leq \varphi < \pi/2$ je celková hodnota energie kladná. Naopak záporných hodnot je dosahováno při rozkladu hodnot svírajících úhel $\varphi > \pi/2$. Tato konfigurace pro rozklad není vhodná. Poslední případ nastane, pokud úhel svírající složkami \mathbf{b}_1 a \mathbf{b}_2 dosahuje právě hodnot $\varphi = \pi/2$. Tímto způsobem lze dosáhnout stanovení Burgersova vektoru každé stálé dislokace uvnitř jakékoliv krystalové struktury.

5.7 Interakce dislokací a ostatních poruch

Jednotlivé vlastnosti krystalů a jejich chování můžeme vysvětlit vzájemnými interakcemi mezi dislokacemi a ostatními poruchami krystalové struktury. Již bylo naznačeno, že dvě dislokace se mohou podobně jako dva elektrony vzájemně přitahovat nebo odpuzovat v závislosti na své orientaci. A stejně jako u elektronů platí že se přitahují dvě dislokace s opačnou orientací, kdežto dvě stejně shodně orientované dislokace se budou ve výsledku odpuzovat. Právě z tohoto důvodu se vyruší dvě hranové dislokace shodné orientace, když se setkají ve stejné skluzové rovině, kde následně vytvoří dokonalou krystalovou mřížku.

Je to právě vzájemné působení mezi dislokacemi a ostatními poruchami krystalové mřížky, kterými jsou dány plastické vlastnosti uvnitř krystalu. Pro představu, nečistoty v krystalech vyvolávají napětí, to brání ve volném pohybu dislokacím. K pohybu dislokací může dojít až ve chvíli, kdy vnější napětí působící na materiál překoná napětí vnitřní. Tento jev dokonale objasňuje mimo jiné Lüdersovu deformaci, což je část diagramu tahové zkoušky po překonání dolní meze kluzu, kdy hodnota napětí začne oscilovat, kolem konkrétní hodnoty.

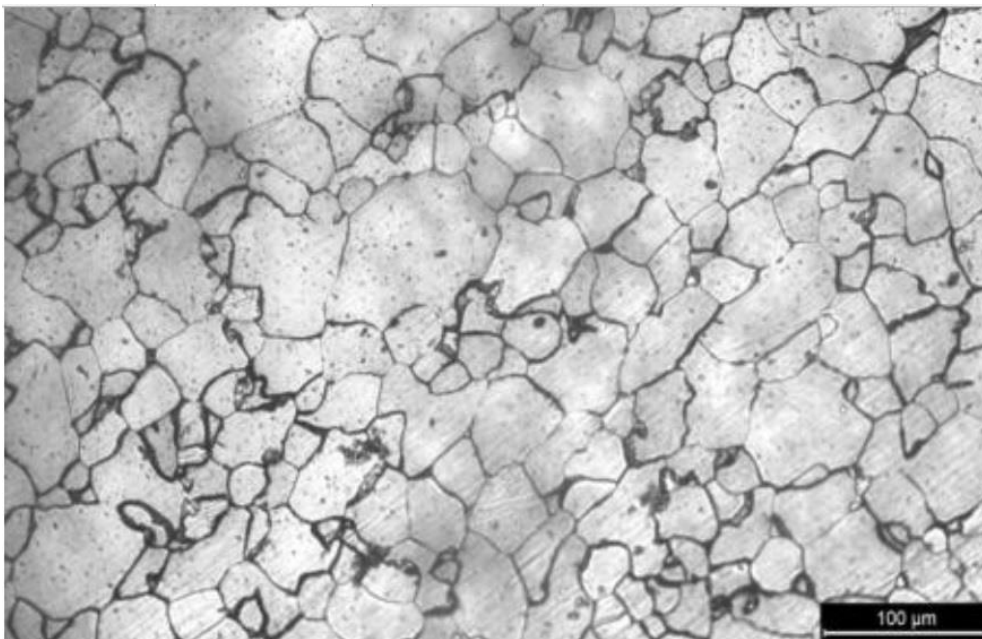
Také vakance a intersticiální atomy zabraňují dislokacím v pohybu, čímž dopomáhají ke zpevnění materiálů, což právě v našem případě hraje zásadní roli (bude blíže popsáno v praktické části této práce). Obecně je teorie dislokací velmi

užitečná při popisu dějů, které nastávají uvnitř krystalických materiálů během deformací. Je možné si díky ní představit mikroskopické struktury hranic zrn a subzrn, o kterých lze v této spojitosti uvažovat jako o navrstvení několika řad hranových dislokací.

6 Beak Hardening efekt

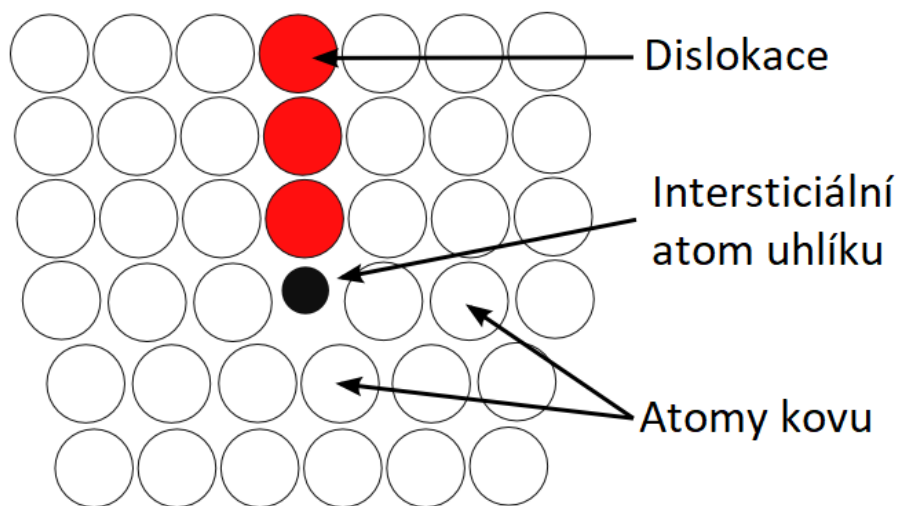
Hned na počátku této práce jsem se zmiňoval o materiálu s označením BH ocel a pak na dlouhou dobu od tohoto tématu odběhl kamsi k polykrystalům kovu a jejich struktuře. Ne však nadarmo, protože pochopení struktury materiálu je klíčové pro pochopení funkce BH efektu.

Hned na počátku se práce zmiňuje o chemickém složení zkoumaného materiálu, oceli CR 180 BH vyráběnou výrobcem Arcelor Mitall. Pro tepelně vytvrzovací efekt je klíčová přítomnost volných molekul uhlíku nebo dusíku. V našem případě se jedná o uhlík, který je přítomen v materiálu ve formě intersticiálního tuhého roztoku. Vstřebá-li materiál dostatečné množství energie, difundují tyto volné atomy v intersticiálních polohách do těsné blízkosti dislokací a vytvoří tak útvar, který nazýváme Cottrellovy mraky (obrázek Obr.6). Tím ještě více vzroste napětí uvnitř mechanické mřížky, tudíž k překonání tohoto napětí a „rozhýbání“ krystalové mřížky je zapotřebí na materiál působit ještě větším vnějším napětím, než kdyby se jednalo o dislokace samotné.



Obr.6) Reálná mikrostruktura BH oceli

Cíleně se tento jev přesunu intersticiálních atomů uhlíku a tvorby Cottrellových mraků aktivuje během vytvrzovacích procesů lakovny. Procesů je mnoho, ale největších účinků je dosaženo teplotami spadajícími do intervalu 170-180 °C. Záměrně jsem z počátku zmiňoval, přecházení atomů uhlíku do polykrystalické struktury vlivem vstřebávání okolní energie materiálem. Tento děj probíhá i za běžné pokojové teploty a je znám jako přirozené stárnutí oceli. Z konstrukčního hlediska není úplně žádoucí ve chvíli před zpracováním materiálu, protože materiál, který vlivem difuze molekul uhlíku do blízkosti dislokací dosáhne zvětšení pevnosti materiálu, ztratí zároveň určitou část své tažnosti, tedy tvárnosti, která je klíčová pro obrábění kovů za studena. To je důvod, proč je nutné daný materiál zpracovávat do určité doby od jeho vytvoření, protože jinak by mohlo dojít k jeho porušení během tvářících procesů. Možnost zpomalení přirozeného stárnutí materiálu poskytuje skladování materiálu ve snížených teplotách (5°C). Tento druh oceli je se běžně v automobilovém průmyslu využívá k výrobě panelových dílů, které představují například vnější část bočních dveří nebo kapota. Právě ke konstrukci kapoty se plech s označením CR 180 BH využívá.



Obr.7) Grafické zobrazení Cottrellova mraku

7 Na závěr teorie

Kovy a jejich krystalická struktura je dá se říci jakýsi svět ve světě, který má svá vlastní pravidla. Molekuly krystalů mají svou paměť a za jistých okolností se dokáží navracet na svá původní místa. Přeskupování atomů uvnitř krystalických struktur na venek můžeme vnímat jako změnu tvaru daného tělesa.

Avšak, když během deformací kovových struktur přesáhneme určitou mez, uspořádání krystalových mřížek se změní trvale, může také dojít k vytvoření trhlin a narušení celé krystalické struktury, což vede následovně k jejímu zničení.

8 Před započítím experimentu

Než mohlo vůbec dojít ke spuštění celého projektu, bylo nutné sejít se s představiteli českého výrobce automobilů Škoda auto a.s., nastínit svůj záměr ohledně experimentu a jeho možnosti prezentace v této práci. Po několika schůzkách, na kterých jsem obdržel cenné rady a připomínky, jsem dostal svolení ke spuštění celého experimentu.

Jeden z hlavních požadavků experimentu spočíval v tom, přiblížit se co nejvíce v laboratorních podmínkách reálnému výrobnímu procesu, který byl nastíněn v počáteční kapitole. Nejprve tedy bylo nutné získání vstupního materiálu a výroby normovaných vzorků pro tahovou zkoušku. Veškerý materiál, technologie i zázemí mi byla poskytnuta výrobním závodem Škoda Auto v Mladé Boleslavi.

Zde mi bylo umožněno odebrat plech ve stavu, kdy byl po přepravě znovu narovnan, jeho ochranná olejová vrstva byla homogenizována a došlo u něho k vystřižení základního tvaru pro lisování kapoty automobilu. Z těchto plechů jsem mohl vyrobit na lisovacím zařízení 280 ks normovaných tělísek pro tahovou zkoušku. Odůvodnění počtu normovaných vzorků, bude vysvětleno později. Údaje z kmenové karty odebraného materiálu můžete vidět v tabulce č.2.

2) Tab.2) Údaje z kmenové karty materiálu

Díl:	5E0 823 105A – Vnější plech kapoty
Číslo svitku:	7326599
Jakost:	HX180BD+Z100 MCO NIT ULT
Tloušťka:	0,68 mm
Dodavatel:	Arcelor Mittal
Ra:	1,26
Pc:	79

Po vylisování vzorků pro tahovou zkoušku přišla na řadu prvotní plastická deformace materiálu, kterou by plechy připravené na výrobu kapoty absolvovali v rámci lisování finálního tvaru. Zde vystala jedna z prvních zásadních otázek, jak velkou hodnotu deformace vlastně zvolit? Po poradě se zástupci zadavatele projektu vzešel požadavek na dvě hodnoty počáteční deformace a to na 2% a 12%. Deformace 2% byla zvolena jako nejmenší hodnota deformace plechu kapoty a hodnota 12% je významná z důvodu, že se jedná o deformaci kolem tzv. tornádo linií kapoty. V tento okamžik považuji za vhodné uvést všechny specifikace, které vznikly během schůzek a následných komunikací se zástupci zadavatelské společnosti.

Kompletní zhotovené díly procházejí lakovnou, kde při vytvrzování laku, dochází také aktivaci BH efektu zkoušeného materiálu a tím stejně jako v případě laku k jeho vytvrzení. Celý proces je poměrně dlouhý a skládá se z různých kroků od vytvrzovacích po vysoušecí. Zde bylo nasnadě, zamyslet se nad tím, zdali má nějaký význam do laboratorního experimentu přenášet celý teplotní profil lakovny. Nakonec byly vybrány jen 3 části celého procesu, jejichž vliv na vystárnutí materiálu se zdá být nejvýznamnější. Jednalo se o část KTL, během které materiál procházející lakovnou absolvuje nejvyšší teplotu $t = 185 \text{ }^{\circ}\text{C}$, poté sušení plniče s teplotou $t = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a časovou výdrž 15 minut a nakonec proces sušení DL3, kde je nastavena teplota $t = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 23 minut. Záměrně jsem neuvedl čas výdrže pro první stupeň vytvrzení KTL (kataforéza).

Jedním z cílů daného experimentu spočíval v určení, do jaké míry ovlivňuje vlastnosti daného materiálu čas strávený během tohoto vytvrzovacího stupně, a proto byly nakonec zvoleny celkem 4 doby vytvrzení: 6 min, 8 min, 12 min, a 20 min,

dle těchto časů kataforézy, byly také vzorky rozděleny do čtyř skupin, které nesly označení KTL6, KTL8, KTL12 a KTL20. Celkový přehled, všech skupin, můžete vidět v tabulce č.3, včetně pojmenování jednotlivých procesů, velikosti teplot a trvání aplikace dané teploty.

3) Tab.3) 4 teplotní profily k provedení experimentu

Druh KTL	Doba KTL (min) $t = 185\text{ }^{\circ}\text{C}$	Doba sušení plniče (min) $t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$	Doba sušení DL3 (min) $t = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$
KTL 6	6	15	23
KTL 8	8	15	23
KTL12	12	15	23
KTL20	20	15	23

Po tepelné úpravě došlo k přirozenému stárnutí plechů při pokojové teplotě, přičemž se v předem určených týdnech od ukončení tepelného stárnutí provádělo zjišťování požadovaných mechanických vlastností testovaného materiálu. Se zadávající stranou bylo dohodnuto, že tahová zkouška ke zjištění mechanických vlastností proběhne 0, 3, 8 a 12 týdnů od provedení tepelného stárnutí v lakovně. Aby bylo možné prohlásit naměřené výsledky za relevantní, bylo nutné pro získání dostačující statistiky provést každý typ zkoušky pro jednotlivé deformace, úpravy KTL v jednotlivých týdnech osmkrát. Zde se dostáváme k vysvětlení počtu vyrobených normo vzorků, kterých bylo celkem 280 ks. Celkový přehled můžete vidět v následujících tabulkách 4.

4) Tab.4) Vzorky trhané v jednotlivých týdnech (počty vzorků v zelených polích)

čas stárnutí po KTL v týdnech	Ocel s BH efektem-po pre-strain 2 %				počet ks v týdnu
	čas KTL [min]				
	6	8	12	20	
0	8	8	8	8	32
3	8	8	8	8	32
8	8	8	8	8	32
12	8	8	8	8	32
	Součet				128
čas stárnutí po KTL v týdnech	Ocel s BH efektem-po pre-strain 12 %				počet ks v týdnu
	čas KTL [min]				
	6	8	12	20	
0	8	8	8	8	32
3	8	8	8	8	32
8	8	8	8	8	32
12	8	8	8	8	32
	Součet				128

Součet všech vzorků činí celkem 256 kusů. Zbylých 24 vzorků posloužilo jako rezerva a pro zjištění mechanických vlastností vstupního materiálu. Z dalších 8 vzorků došlo ke zjištění vlastností neupraveného vstupního materiálu. Požadavkem zadavatele bylo zjištění následujících mechanických vlastností materiálu CR 180 BH: Youngův modul pružnosti E , Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, Tažnost při mezi kluzu, Tažnost při mezi pevnosti. Všechny parametry byly určeny v souladu s obecnou normou pro tahové zkoušky při pokojové teplotě ČSN EN ISO 6892-1. Zde několik citací z normy k jednotlivým sledovaným veličinám:

Modul pružnosti (module of elasticity) E

Podíl změny napětí ΔR a změny prodloužení v procentech měřeného průtahoměrem Δe v oblasti hodnocení, násobený 100 %.¹

$$(6) \quad E = \frac{\Delta R}{\Delta e} \cdot 100 \%$$

Smluvní mez kluzu R_p

Napětí, při kterém je plastické prodloužení měřené průtahoměrem rovno předepsanému procentu měřené délky průtahoměru. K dolnímu indexu se přidává číslo vyjadřující předepsané procento. Stejně jako v našem případě $R_{p0,2}$.¹

Tažnost při mezi kluzu A_e

U materiálů vykazujících nespojitost na výrazné mezi kluzu, prodloužení měřené průtahoměrem mezi počátkem plastického kluzu a počátkem deformačního zpevnování, vyjádřené v procentech měřené délky průtahoměru. ¹

Celková tažnost A_t v procentech

Celkové prodloužení měřené průtahoměrem (pružné plus klasické) v okamžiku lomu, vyjádřené v procentech měřené délky průtahoměru. ¹

¹ ÚNMZ. 2017. ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály-Zkoušení tahem*

9 Počáteční plastická deformace

Ještě dříve, než materiál projde lakovnou, kvůli povrchovému ošetření, získá během procesů tváření svůj konečný tvar. Tímto lisováním dojde v různých částech plechu k různým hodnotám deformace a jak už bylo zmíněno v kapitole o poruchách polykrystalických struktur, jednou z možností navýšení meze pevnosti materiálu je jeho počáteční deformace. Tento fakt není možné zanedbávat, a proto i vyrobené vzorky pro tahovou zkoušku museli projít před tepelnými úpravami počáteční deformací.

Jak již bylo vysvětleno výše, bylo ujednáno, že pro celý experiment budou na vzorcích realizovány dvě hodnoty velikosti plastické deformace a to 2% a 12%. Pro realizaci simulace plastické deformace při procesech tváření bylo použito zkušebního stroje LabTest 3.50 v kombinaci s jednoosým průtahoměrem MFN-A a tenzometrickým snímačem síly HBM U3 10 kN. Pro uchycení tahových vzorků byly zvoleny hliníkové čelisti s bočním upnutím, které se jevily jako nejvhodnější, protože další druhy samosvorných čelistí, nedojde-li k přetržení vzorku během zkoušky, mají tendenci při odepínání vzorku z čelistí, působit silou proti vytvořené deformaci, čímž znemožňují dosáhnout přesné hodnoty plastické deformace.

Před zahájením úkonu počáteční deformace normovaných vzorků, byl celý proces aplikován na jeden testovací vzorek, aby došlo ke zjištění, zdali v čelistech s bočním upnutím nedojde během zatěžování vzorku k jeho proklouzávání v čelistech. Obava byla experimentálně vyloučena, tudíž bylo možné přejít k samotné zkoušce. Po instalaci vhodného průtahoměru a siloměru mohlo dojít ke spuštění testovacího zařízení a jeho spárování s řídicím PC. Po spuštění softwaru Labpro, došlo k inicializaci zkušebního stroje. Jelikož měřící kanály siloměru a polohy příčnicku zkušebního zdroje neukazovaly nulové hodnoty, byly tyto kanály před upnutím prvního vzorku offsetovány. Záhy na to bylo možné sestavení definice zkoušky, tedy souboru různých podmínek, za kterých bude celá zkouška probíhat.

Jako základ definice byla použita šablona obecné zkoušky v tahu s průtahoměrem. Základní měřená délka průtahoměru ve výchozí pozici byla nastavena na $l_0 = 80$ mm. Vzhledem k výchozímu rozměru vzorků, se tato délka průtahoměru jevila jako ideální. Poté došlo k nastavení zkušební rychlosti. Obecná norma pro tahovou zkoušku nijak významně zkušební rychlost nespécifikuje. Nicméně je nutné zajistit,

aby zkouška neproběhla příliš rychle, protože velmi rychlý průběh, by mohl výrazněji zkreslit výsledky zkoušky. Norma také umožňuje nastavit během zkoušky na různých úsecích tahové křivky různé rychlosti. Pro náš experiment byla použita rychlost v závislosti na konstantní hodnotě růstu napětí o hodnotě 3 MPa/s.

Jediné riziko, které může nastat při tomto druhu řízení rychlosti spočívá v tom, že po překročení meze kluzu už síla a tím i napětí příliš nenarůstá, což vyvolává postupné zrychlování zkušebního zařízení. V některých případech hrozí až záporná hodnota zpětnovazebního činitele. Jelikož se ale v této fázi experimentu do zmíněné části křivky tahové zkoušky nedostaneme, je dané řízení rychlosti pro tuto zkoušku vhodné.

Dalším úskalím pro řízení rychlosti tahové zkoušky v závislosti na růstu napětí, byla nutnost zadání průřezu vzorku, který je pro výpočet napětí nezbytný. Pracovní prostředí LabPro umožňuje výběr z několika profilů, pro testované vzorky platí, že se jedná o profil plochý.

Po zadání tohoto typu profilu bylo nutné vyplnit šířku a tloušťku testovaného vzorku. Jelikož by bylo časově velmi náročné měřit tyto rozměry u každého vzorku zvlášť, byl proveden náhodný výběr deseti vzorků z celé série a u nich bylo provedeno měření tloušťky a délky pomocí posuvného měřítka.

Měření bylo realizováno pro každý vzorek na několika různých místech, přičemž byl zaznamenán nejmenší z naměřených údajů. Všech deset hodnot bylo zaznamenáno do tabulky tab.5. Pro zadání tloušťky a délky byly použity průměrné hodnoty z 10 provedených měření.

5) Tab.5) Naměřené hodnoty tloušťky a šířky normovaných vzorků

Měření rozměrů vstupního materiálu - BH ocel			
měření	tloušťka (mm)	Šířka (mm)	průřez (mm ²)
1	0,69	20,05	13,835
2	0,68	20,07	13,648
3	0,68	20,08	13,654
4	0,68	20,06	13,641
5	0,68	20,1	13,668
6	0,67	20,08	13,454
7	0,69	20,06	13,841
8	0,68	20,08	13,654
9	0,68	20,06	13,641
10	0,68	20,07	13,648
Ø	0,68	20,07	13,67

Po nastavení zkušební rychlosti došlo k definování kritéria pro ukončení zkoušky, zde se ideálně hodila možnost ukončení zkoušky po dosažení hodnoty deformace na průtahoměru. Pro jednu skupinu vzorků byla nastavena deformace 1,6 mm odpovídající 2% z původní měřené délky l_0 a hodnota 9,6 mm odpovídající dvanáctiprocentní hodnotě plastické deformace. Při upínání vzorků do čelistí byla zjištěna deformace prohnutím na upínaných vzorcích, čímž by byly ovlivněny hodnoty získané z průtahoměru, a proto bylo do definice zkoušky přidáno ještě počáteční předpětí vzorku na hodnotu 100 N, čímž došlo k narovnání vzorku.

Po dosažení požadované hodnoty předpětí, byla zkouška pozastavena, aby mohlo dojít k přiložení extenzometru a poté opětovně spuštěna, až do hodnoty požadované deformace. Po zastavení zkoušky byly upínací čelisti povoleny a vzorek uložen do příslušné skupiny dle hodnoty deformace. Celkem vzniklo pro každou skupinu 135 vzorků. Úplně nakonec byl příčník zkušebního stroje navrácen do své výchozí polohy dané původní offsetovou pozicí. Poté došlo k založení dalšího vzorku. Celý postup byl aplikován na všechny připravené vzorky.

Během tohoto procesu došlo dvakrát k znehodnocení zkoušky. Poprvé byla chyba způsobená selháním zkušebního zařízení, podruhé obsluhou, která zapoměla po předpětí na vzorek přiložit průtahoměr. Oba vzorky byly výrazně označeny jako NOK a vyřazeny před dalšími úpravami.

10 Tepelné vytvrzení KTL

Vytvrzování materiálu probíhá při běžném výrobním procesu během průchodu materiálu lakovnou, kdy dochází ke katodforéznímu vytvrzování laku. Do laboratorních zkoušek, byly přesunuty jen tři dílčí části celého procesu, a to ty s nejvyšší teplotou, jejichž vliv na celkové stárnutí oceli je považován za nejvýznamnější. Aby došlo k co nejpřesnějšímu napodobení laboratorního experimentu s reálným procesem, bylo nutné přiblížit se co nejvíce reálným teplotním profilům. Nejsložitějším požadavkem pro napodobení sušení byl fakt, že během reálného procesu se lakované plechy dostanou na požadovanou teplotu během deseti minut. Tento fakt vznesl na celý experiment dva zásadní požadavky, a to rychlé zahřátí vzorků na požadovanou teplotu a její následné udržování pro požadovaný čas a měření teploty přímo na povrchu daného vzorku.

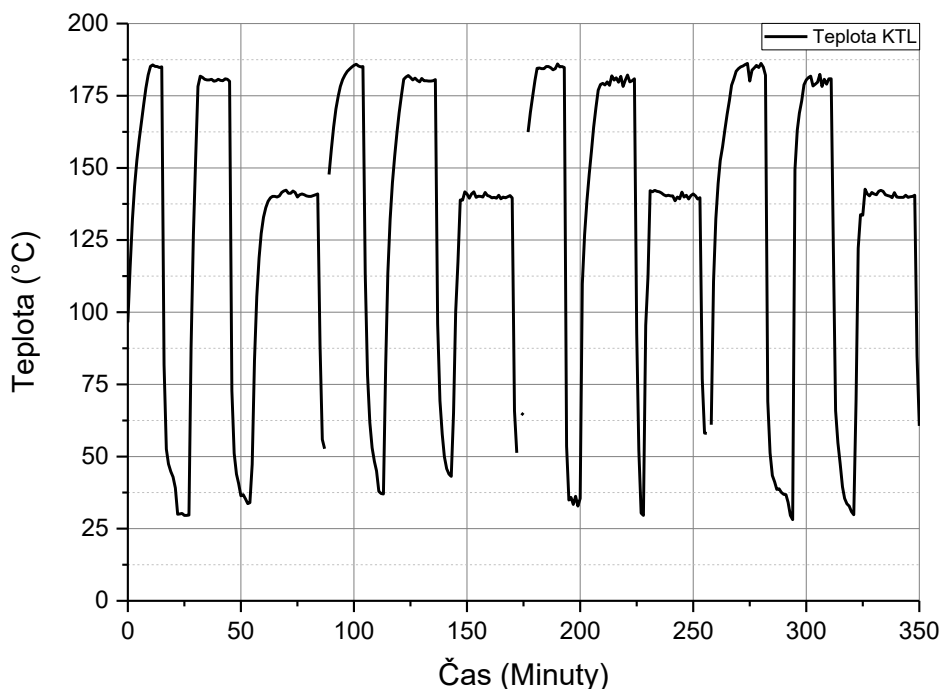
Pro realizaci experimentu byla vybrána teplotní komora Memmert UFP600 s nuceným prouděním vzduchu, jejíž parametry dovolily rychlé zahřátí a následně konstantní temperování vzorku a zároveň díky většímu objemu a nucenému proudění vzduchu bylo možné provádět experiment pro větší množství vzorku najednou. Teplota byla monitorována vždy na povrchu jednoho vzorku za pomoci externího termočlásku a datalogeru Alborn Almeo. Díky nucené cirkulaci vzduchu bylo možné považovat teplotu vzduchu v celém vnitřním objemu teplotní komory za konstantní a tím pádem považovat povrchovou teplotu testovaných zkušebních vzorků za stejnou. Průběh celého experimentu je popsán na následujících řádcích.

Ze všeho nejdříve bylo nutné celý experiment vyzkoušet na nečisto na jednom jediném vzorku, aby chybným nastavením nedošlo ke znehodnocení většího množství zkušebních vzorků. Pro tuto zkoušku jsem vybral jeden z rezervních kusů, na nějž jsem přidělal termočlánek a vložil do předem vyhřáté pece. Ve chvíli, kdy došlo k založení vzorku do teplotní komory, byla vnitřní teplota 190 °C. Otevřením

dveří komory a založením zkušební vzorku, došlo k poklesu vnitřní teploty na 157 °C. Vzorek se dostal na požadovanou teplotu 185 °C během 4 minut. Tento čas jsem vyhodnotil jako dostatečně rychlý. Avšak pro zahájení experimentu jsem zvolil teplotu předehřátí teplotní komory ještě vyšší, protože bylo patrné, že zakládání většího množství vzorků si vyžádá delší čas, zde jsem se ubíral úvahou, že dveře teplotní komory zůstanou otevřené delší dobu a více vnitřního tepla unikne do okolního prostoru, proto byla zvolena teplota počátečního předehřátí teplotní komory vždy o 15 °C vyšší, než byla požadovaná teplota na povrchu vzorku (185,180,145) °C

Po předchozím ověření, mohlo dojít k zapnutí pece a její nastavení na požadovanou teplotu 200 °C. Během temperování teplotní komory byly zkušební tyčky rovnoměrně rozmístěny na rošty. Vzorky byly na rošt umístěny tak, aby z každé strany vzorku byla mezera mezi vzorky alespoň 3 mm, proto, aby se mezi sebou vzájemně vzorky teplotně neovlivňovali a prohřátí bylo opravdu rovnoměrné. Jak odhalila předchozí část experimentu, došlo během zakládání vzorků po uzavření a zajištění dveří teplotní komory k poklesu vnitřní teploty zhruba o 50 °C. Po založení vzorků na roštu do teplotní komory, bylo spuštěno logování průběhu teploty na vzorku se vzorkovací frekvencí $f = 0,016$ Hz, tedy jeden vzorek za minutu. Po uplynutí požadované doby na teplotě 185 °C byly vzorky vyjmuty z teplotní komory a ochlazeny vzduchem na pokojovou teplotu, poté byla teplota uvnitř pece přenastavením elektrické regulace snížena na 180 °C a celý proces se opakoval pro tuto teplotu. Po dosažení požadované teploty, byl odpočítán čas 15 min a vzorky byly opět vytaženy z teplotní komory ven. Po opětovném ochlazení následovala poslední část laboratorního vytvrzovacího pokusu při teplotě 140 °C po dobu 23 minut. Po dokončení vytvrzovacího procesu byly všechny vzorky roztrženy do 4 skupin pro počáteční deformaci o velikosti 2% a do 4 skupin pro vzorky s deformací 12% (skupiny KTL6, KTL8, KTL12, KTL20).

Po ukončení tohoto experimentu došlo ke stažení zaznamenaných dat z přístroje Almeo Alborn do osobního počítače. Zde byly převedeny vhodným softwarovým vybavením z výchozího formátu txt do formátu TDMS, jež je vhodným pro tabulkový procesor Origin. Poté byla naměřená data zpracována do podoby grafu, který můžete vidět na následujícím obrázku.



Obr.8) Teplotní záznam z experimentálního simulování průchodu plechu lakovnou

Na grafu je možné všimnout si nespojitostí vždy po dokončení poslední teploty jednoho celého cyklu skládajícího se z teplot (185, 180 a 145) °C. Nespojitost je způsobena chybějícími daty, protože vždy po dokončení celého cyklu a ochlazování vzorků na vzduchu, došlo k přerušení záznamu dat z důvodu úspory paměti měřícího přístroje.

Až do tohoto bodu bylo zapotřebí všechny vzorky skladovat ve snížené teplotě 5 °C, aby nedocházelo k jejich umělému stárnutí. Jelikož celý experiment započal v zimním období, ze všeho nejdříve bylo uvažováno skladovat vzorky v krytých venkovních prostorech. Nicméně za takových podmínek hrozila koroze materiálu vlivem vzdušné vlhkosti, a proto byly vzorky po celou dobu tohoto experimentu přechovávány v uměle vytvořeném suchém, chladném klimatu. Před každou dílčí úpravou, ať už počáteční deformací nebo teplenou úpravou KTL, museli být vzorky vždy vyndány z chladu s jistým předstihem, aby se celý materiál rovnoměrně vytemperoval na okolní teplotu.



Obr.9) A) teplotní komora použitá k simulaci vytvrzovacích procesů lakovny
B) Uchytení termočlánku na povrchu jednoho z testovaných vzorků

11 Ověřování mechanických vlastností materiálu

Po ukončení všech dílčích úprav, byly všechny vzorky vyjmuty z chladného klimatu 5 °C a ponechány volně ložené ve standardním klimatu 23 °C a 50% relativní vlhkosti, kde byly vystaveny přirozenému stárnutí. Během tohoto stárnečného procesu byly v týdnech 0, 3, 8 a 12 zjišťovány požadované mechanické vlastnosti materiálu, kdy bylo vždy náhodně vybráno osm tahových vzorků od každé z osmi skupin (4 druhy KTL a 2 hodnoty plastické deformace). Osm kusů bylo zadavatelem uznáno jako dostatečně velký a statisticky vypovídající náhodný soubor.

Pro zjišťování mechanických vlastností bylo opět použito zařízení LabTest 3.50 s průtahoměrem MFN-A a tenzometrickým snímačem síly HBM U3 50 kN.

Změna siloměru byla nutná z důvodu použití větších samosvorných čelistí, které zabránily prokluzování vzorku během testování, jak tomu bylo zjištěno u hliníkových čelistí s bočním upínáním během prvotních zkušebních testů. Nadále bylo pokusem zjištěno, že velký rozsah siloměru, nevnese do experimentu žádnou vážnější nepřesnost. A to tak, že byl použit ruční digitální siloměr s rozsahem 200N působící proti siloměru zkušebního stroje LabTest 3.50. Výsledné vyobrazené hodnoty na displejích se lišili pouze v řádu desetin newtonů.

Po ověření siloměru, došlo k sestavení nové definice zkoušky. Základ definice byl stejný, jako v případě počáteční plastické deformace. Největší rozdíly spočívaly v tom, že tentokrát došlo k nastavení vyhodnocování všech požadovaných veličin a to (modulu pružnosti, smluvní meze kluzu, tažnosti při mezi kluzu a celkové tažnosti). Další odchylkou od původní definice bylo provádění zkoušky až do chvíle destrukce vzorku. Všechny parametry definice byly nastaveny v souladu s normou pro obecnou zkoušku v tahu ČSN EN ISO 6892-1 a požadavků zadavatele. Na následujících obrázcích (obr.10A), 10B) a 10C) si můžete prohlédnout konfiguraci a průběh tahové zkoušky. Po nastavení definice, mohlo dojít k upnutí vzorku do čelistí zkušebního stroje a spuštění zkoušky, ta se po dosažení hodnoty předpětí *100 N* pozastavila, aby na vyrovnaný vzorek, který byl vlivem upnutí deformován mohl být přiložen průtahoměr. Po přiložení průtahoměru pokračovala zkouška až do destrukce vzorku. Bezprostředně po zkoušce byly vyhodnoceny všechny požadované veličiny. Dílčí naměřené hodnoty byly uloženy do formátu CSV a TDMS pro následné zpracování a vyhodnocení.

12 Vyhodnocení

Pro vyhodnocení jsem zvolil sérii, grafů, která zřetelně vykresluje a popisuje změny vlastností tepelně vytvrzovací oceli HX 180 BD a to jednak v závislosti na druhu tepelného stárnutí KTL a délky přirozeného stárnutí a poté také porovnání grafů průběhů jednotlivých tahových zkoušek výchozího materiálu bez úprav a materiálu po tepelných úpravách. Zpracovány jsou také statistické tabulky z hodnot získaných během testování mechanických vlastností.

Z důvodu značné rozsáhlosti jsem zvolil zařazení této kapitoly do příloh, které jsou odevzdávány společně s touto prací v podobě protokolu o měření a prezentace s názvem

13 Závěr

Cíl této práce byl ověřit mechanické vlastnosti plechu CR 180 BH, který je zadavatelem využíván v automobilovém průmyslu k výrobě kapot. Všechny mechanické vlastnosti byly ověřeny dle zadání ze strany zadavatele v souladu s obecnou normou pro tahové zkoušky při pokojové teplotě ČSN EN ISO 6892-1 a všechny výsledky byly zadavateli odprezentovány na společné prezentaci výsledků.

Mým osobním cílem této práce bylo získat zkušenosti z pro mě ne příliš probádaného oboru strojírenství a materiálů, což se z mého hlediska povedlo více než vrchovatou měrou, a to ne všechny zkušenosti, které jsem získal, tato práce zohledňuje.

Pokud bych se měl zamyslet nad tím, co bych v budoucnu udělal jinak nebo lépe, rozhodně bych takovým způsobem nezanedbal přípravu, která kdyby byla z mojí strany intenzivnější, dopomohla by ještě k vyšší úrovni této práce, třeba v podobě vlastních snímků měnících se kovových mikrostruktur během zpracování a stárnutí materiálu.

14 Seznam Použité literatury

- [1] ALAXIN, Ján. 1987. *Fyzikální metalurgie I*. Liberec: VŠST. ISBN 55-802-87. VELES P. 1989. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: ALFA.
- [2] GIRMAN, Vladimír a Valentina HRABČÁKOVÁ. 2012. *Kovové materiály automobilových konštrukcií: II.- Karoséria a karosárske plechy* [online]. Košice [cit. 2015-05-15]. ISSN 1337–8953. Dostupné z:
<http://www.materialing.com/sites/default/files/Kovov%C3%A9%20materi%C3%A1ly%20automobilov%C3%BDch%20kon%C5%A1trukcii%20II%20-%20Karos%C3%A9ria%20a%20karos%C3%A1rske%20plechy.pdf>
- [3] LENFELD, Petr. 2009. *Technologie II: 1. část Tváření kovů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-466-5.

[4] DAVIS, Joseph R. 1988. *ASM Metals Handbook: Vol. 14: Forming and Forging*. 9. ASM International. ISBN 978-0871700209.

[5] ÚNMZ. 2017. *ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály-Zkoušení tahem*

15 Seznam použitých obrázků

Obr.1). Zdroj: http://fyzika.jreichl.com/data/Termo_3_pevne_latky_soubory/image028.jpg

Obr.2). Zdroj: http://fyzika.jreichl.com/data/Termo_3_pevne_latky_soubory/image029.png

Obr.3). Zdroj: <http://www.xray.cz/kryst/obr/obr9-4.gif>

Obr.4). Zdroj: <http://www.xray.cz/kryst/obr/obr9-2.gif>

Obr.5). Zdroj: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/Frank-Read_Source.png?uselang=cs

Obr.6). Zdroj: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/5930/1/e-97.pdf> (str. 17)

Obr.7). Zdroj: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/CottrellAtmosphere.png>

Obr.8). Zdroj: Soukromý archiv

Obr.9). Zdroj: Soukromý archiv

16 Seznam příloh

Příloha 1) Protokol o měření

Příloha 2) Konečná prezentace Stárnutí BH oceli s výsledky