



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

DAMASCÉNSKÁ OCEL

DAMASCUS STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Szymon Czudek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|---|
| Ústav: | Ústav materiálových věd a inženýrství |
| Student: | Szymon Czudek |
| Studijní program: | Strojírenství |
| Studijní obor: | Základy strojního inženýrství |
| Vedoucí práce: | Ing. Eva Mollíková, Ph.D., Paed IGIP |
| Akademický rok: | 2019/20 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Damascénská ocel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se v úvodní části své bakalářské práce bude věnovat materiálům na bázi železa a to zejména ocelím a způsobům jejich výroby. Hlavní část práce bude věnována damascénské oceli – její charakteristice, způsobům výroby a z nich vyplývajícím vlastnostem. V závěru práce budou zmíněny možné praktické aplikace damascénské oceli.

Cíle bakalářské práce:

- charakterizovat materiály na bázi železa,
- popsat metody výroby oceli,
- specifikovat damascénskou ocel,
- zmínit způsoby výroby damascénské oceli,
- uvést vlastnosti damascénské oceli,
- na příkladech doložit možnosti využití damascénské oceli.

Seznam doporučené literatury:

SACHSE, Manfred: Damascus steel, 3rd ed., Stahleisen-Verlag, 2008. ISBN 13: 9783514007512.

KOSMÁK, Jaroslav. Historie výroby oceli. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.

RUDOLF, Tomáš. Damašková ocel. Brno, 2010. Diplomová práce. Mendelova Universita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilní dopravy.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se v úvodu krátce zabývá charakterizací materiálu na bázi železa a stručně popisuje průběh výroby oceli a suroviny při tomto procesu použité. V další části tato práce pojednává o historii damascenské oceli, procesech a metodách výroby tohoto druhu oceli a vlastnostech, které dosahuje díky těmto postupům. V další kapitole se zabývá konkrétními případy použití tohoto materiálu v dnešní době a na závěr pojednává o jiných materiálech které jsou často mylně považovány za druh damascenské oceli.

Klíčová slova

ocel, damascenská ocel, wootz, kovářské svařování.

Abstract

This bachelor thesis briefly deals with the characterization of iron-based material and describes the process of steel production and raw material used in this process. In the next part, this thesis is about the history of damascus steel, the processes and methods of producing this type of steel and the properties it receive through these processes. The next chapter discuss specific usage of this material nowadays and in the end it is about other materials that are often erroneously considered for a kind of damascene steel.

Keywords

Steel, damascen steel, wootz, forge welding

CZUDEK, Szymon. *Damascénská ocel*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121786>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Eva Molliková.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Damascenská ocel** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval své vedoucí Ing. Evě Mollikové, Ph.D., Paed IGIP za cenné rady, vedení a hlavně trpělivost při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval dalším pracovníkům ústavu materiálových věd a inženýrství za jejich rady a podněty a také svým blízkým za podporu během studia.

Obsah

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1. Úvod | 1 |
| 2. Cíle práce | 2 |
| 3. Charakterizace materiálu na bázi železa | 3 |
| 3.1. Železo a jeho slitiny | 3 |
| 4. Výroba slitin železa | 3 |
| 4.1. Technologie výroby surového železa..... | 3 |
| 4.1.1. Nepřímá výroba surového železa | 4 |
| 4.1.2. Přímá výroba surového železa..... | 4 |
| 4.2. Suroviny pro výrobu surového železa..... | 5 |
| 4.2.1. Železné rudy | 5 |
| 4.2.2. Palivo a struskotvorné přísady..... | 5 |
| 5. Ocel | 7 |
| 5.1. Výroba oceli..... | 7 |
| 5.1.1. Elektrická oblouková pec..... | 7 |
| 5.1.2. Kyslíkový konvektor | 7 |
| 6. Damascenská ocel..... | 9 |
| 6.1. Historie damascenské oceli | 9 |
| 6.2. Současné způsoby výroby damascenské oceli | 10 |
| 6.2.1. Krystalizační damašek | 11 |
| 6.2.2. Kovářské svařování..... | 12 |
| 6.2.3. Prášková metalurgie | 14 |
| 6.3. Vlastnosti damascenské oceli | 16 |
| 6.4. Současné uplatnění damascenské oceli | 20 |
| 6.4.1. Výroba chladných zbraní | 20 |
| 6.4.2. Využití v puškařství | 21 |
| 6.4.3. Damascenská ocel jako šperk..... | 23 |
| 6.5. Materiály podobné damscenské oceli..... | 23 |
| 6.5.1. Mokumé Gane | 23 |
| 6.5.2. Mokumé Gane | 24 |
| 7. Závěr..... | 25 |
| 8. Literatura..... | 26 |
| 9. Seznam použitých zkratk a symbolů..... | 29 |
| 10. Seznam obrázků | 30 |

1. Úvod

Při pohledu zpět na člověkem vytvořené tisíce let staré nástroje, je velmi fascinující si uvědomit, jak je homo sapiens sapiens vynalézavý a jak je možné, že při tak primitivních podmínkách dokázal vytvořit obdivuhodné věci.

Jedním z mnoha fascinujících vynálezů je ocel, slitina železa. Železo uměl člověk zpracovat už před naším letopočtem, což dokazují archeologické vykopávky. Železo a jeho zpracování mělo obrovský vliv na vývoj dějin, jelikož v minulosti základem žití bylo primárně přežít. Člověk musel lovit, bojovat o své území, chránit sebe i svou rodinu a k tomu potřeboval zbraň. Ty se vyráběly z různých materiálů, od dřeva až po ocel, mezi nimiž nejvíce vyčnívala ocel zvaná damascenská.



Obr. 1. Meč z damascenské oceli [40]

Tato specifická ocel se pyšnila nevídanými mechanickými vlastnostmi a fascinujícími vzory, které nabývala díky speciálním postupům výroby, které se bohužel nedochovaly a ještě do nedávna byly záhadou.

2. Cíle práce

Cílem této práce je charakterizovat materiály na bázi železa, popsat jejich výrobu. Dále specifikovat damascenskou ocel, zmínit způsoby její výroby, uvést její vlastnosti a na příkladech doložit možnosti jejího využití v dnešní době.

3. Charakterizace materiálu na bázi železa

3.1. Železo a jeho slitiny

Čisté železo je podobně jako jiné čisté kovy velmi měkké a má malou pevnost. Je to polymorfní kov. V závislosti na teplotě může mít rozdílnou krystalografickou modifikaci. Do teploty 760°C je železo označováno jako modifikace α a má krystalickou mřížku krychlovou prostorově středěnou. Od této teploty železo přestává být feromagnetické, což znamená že ztrácí své magnetické schopnosti a až do teploty 912°C si zachovává krystalickou mřížku krychlovou prostorově středěnou a označuje se jako modifikace β . V intervalu od 912°C až do 1 392°C je železo ve formě krystalické mřížky krychlové plošně středěné s označení γ . Nad tímto intervalem nabývá železo v modifikaci δ opět krystalickou mřížku krychlovou prostorově středěnou a to až do teploty tavení 1 539°C. [1][6]

K vlastnostem slitin železa, zpravidla nejvýznamněji přispívá uhlík, který ovlivňuje důležité vlastnosti slitin. Ovlivňuje jednak materiálové vlastnosti R_e , R_m , A , Z , tvrdost, ale také technologické vlastnosti jako např. svařitelnost nebo odolnost proti opotřebení.

Slitiny železa můžeme podle obsahu uhlíku rozdělit na dvě skupiny. Oceli a litiny. Oceli se rozumí slitina železa a uhlíku s maximální koncentrací uhlíku do 2%. Kromě uhlíku mohou oceli obsahovat doprovodné prvky, pocházející z procesu výroby a přísady jinak také zvané legury, což jsou úmyslně přidávané prvky pro zlepšení vlastnosti slitiny. Naopak litiny mají minimální koncentraci uhlíku 2% a zároveň součet příměsí nesmí přesáhnout 2%. Tento materiál se používá výhradně k výrobě odlitků. [2][6]

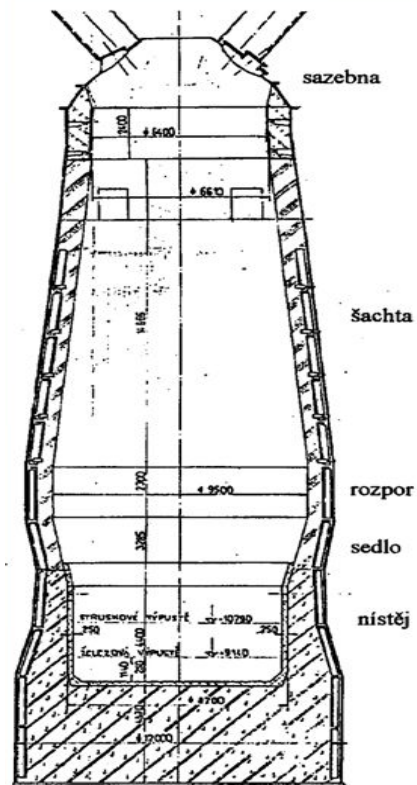
4. Výroba slitin železa

4.1. Technologie výroby surového železa

Principem výroby slitin železa je redukce oxidu železa obsažených v železných rudách.

4.1.1. Nepřímá výroba surového železa

Nepřímá výroba surového železa probíhá v tzv. Vysoké peci. Je to šachtová pec s plynulým zavážením paliva, kovonosné vsázky a struskotvorných přísad. Palivo, převážně koks, je spalován vzduchem předehřátým na 1 000 až 1 300°C vháněného do pece výfučkami, v jejichž oblasti pak vzniká redukční plyn o teplotě 1 800 až 2 100°C. Redukčními činidly jsou CO a H_2 . Vyredukované železo je nauhličováno koksem a shromažďuje se v nístěji pece. Struska se naopak shromažďuje na povrchu, nad hladinou surového železa. Zakončením redukčního procesu ve vysoké peci je takzvaný odpich surového železa, který probíhá v pravidelných intervalech. Vysoká pec vyrábí surové železo nepřetržitě 10-15let. [1][3][4]



Obr. 4.1.1.1 Schéma vysoké pece [1]

Produktem této technologie je surové železo, které má obsah uhlíku 3-4% a dále zpracováváno v ocelárnách nebo ve slévárnách. Převážná část produkce surového železa je vyráběná pomocí této metody.

4.1.2. Přímá výroba surového železa

Touto metodou se železo vyrábělo již od počátku hutnictví. Používané pece se zhotovovaly z žáruvzdorných jíílů a podle typu pece byly vysoké asi 1,2m až 1,5m. Vzduch byl přiváděn buďto přirozeně tzv. komínovým efektem anebo pomocí měchu. V těchto pecích se dosahovalo pouze teploty okolo 1 300 - 1 350°C, což nestačilo k roztavení železa a tak se dosahovalo pouze těstovitého stavu kovu. Po 8 až 12 hodinách byl vytažen více či méně nauhličený, pórovitý, nehomogenní, kujný kus železa, který se nazýval železnou houbou, dejlem nebo vlkem. Pro dosažení potřebných vlastností tato železná houba musela být dále zpracovaná ohřevem a prokováním, což mělo za úkol materiál zhomogenizovat a zbavit zbytku strusky. V roce 1784 byly Henrym Cortem

zavedeny tzv. pudlovací pece vytápěné černým uhlím. Díky ním došlo ke snížení spotřeby paliva. [1][3][5]

U technologie přímé výroby železa je potřeba používat kvalitní rudu s vysokým obsahem železa a nízkým obsahem nežádoucích prvků. Z ekonomických důvodů je v dnešní době tato metoda vytlačována hlavně nepřímou výrobou železa.

4.2. Suroviny pro výrobu surového železa

4.2.1. Železné rudy

Kovonosné rudy můžeme dle chemického složení rozdělit na: bezvodé oxidy, hydratované oxidy a uhličitany.

Do skupiny bezvodých oxidů náleží Fe_2O_3 hematit jinak také známý jako krevet. Je červené barvy a má obsahovat asi 68% Fe. Dále do této skupiny náleží také Fe_3O_4 magnetit, neboli magnetovec. Tento bezvodý oxid je magnetický a má obsahovat asi 68% Fe.

Limony $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ jinak také hněděle, jsou hydratovanými oxidy, které se dělí dle obsahu chemicky vázané vody.

Siderit neboli ocelek $FeCO_3$ patří do skupiny uhličitánů. Je to ruda s nízkým obsahem Fe. Má pouze 25 až 40% Fe.

Toto jsou nejvíce používané rudy pro výrobu surového železa, nejvíce z nich je však využíván první zmiňovaný hematit. [1][5][7]

4.2.2. Palivo a struskotvorné přísady

Palivem pro nepřímou výrobu ve vysokých pecích je metalurgický koks, který obsahuje 83 až 91% uhlíku a 6 až 12% popela. Metalurgický koks musí mít také odpovídající kusovost.

V minulosti se pro přímou metodu jako palivo využívalo dřevěné uhlí. Jelikož dřevěné uhlí bylo neekonomické a náročné na výrobu, nahradily ho jiné efektivnější paliva např.: hnědé uhlí, lignit, těžký topný olej a zemní plyn.

Většina rud má kyselý charakter, proto se používají zásadité struskotvorné přísady. Vápenec CaCO_3 je hlavní struskotvornou přísadou. Mimo něj se používá dolomitický vápenec nebo dolomit.[1][5]

5. Ocel

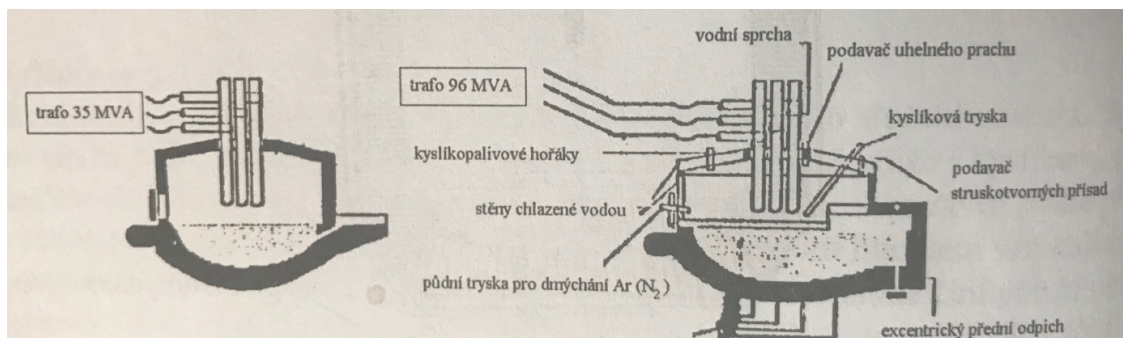
5.1. Výroba oceli

V současnosti se pro výrobu oceli ze surového železa používají převážně dva způsoby. Ve slévárnách se nejčastěji používají elektrické obloukové pece a v hutních ocelárnách kyslíkové konvektory.

5.1.1. Elektrická oblouková pec

Elektrická oblouková pec je tvořená pecní nádobou. Pecní nádoba je svařená z ocelového plechu a je umístěna na kolíbcích, díky kterým se pec může naklápět. Ocelový plášť pece je vyzděn žáruvzdorným materiálem na bázi dolomitu nebo magnezitu. Víko pece je chlazeno vodou.

Hlavním úkolem elektrické obloukové pece je oduhličení a odfosfoření roztavené oceli. V elektrické obloukové peci hoří oblouk mezi třemi grafitovými elektrodami a vsázkou. Jako vsázka se nejčastěji používá ocelový odpad, který se při teplotě oblouku 3 000 až 4 000°C taví. Po natavení vsázky probíhá oduhličení a odfosfoření následuje odpich a po něm ještě dezoxidace, dolegování, odsíření, které už probíhá v pánvi.[3]



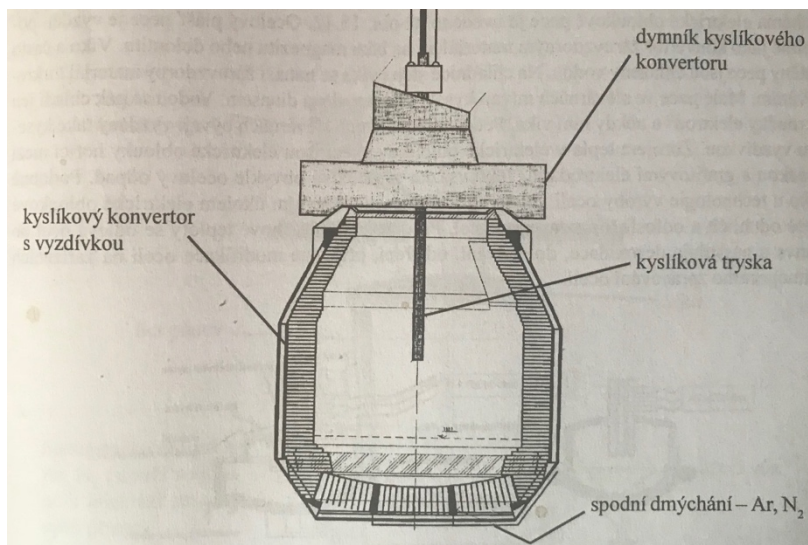
Obr. 5.1.1.1 Schéma Elektrické obloukové pece [1]

5.1.2. Kyslíkový konvektor

Kyslíkový konvektor je otočná ocelová nádoba. Podobně jako u elektrických obloukových pecí, je vyzdívka kyslíkového konvektoru na bázi magnezitového nebo

dolomitového materiálu. Ze shora je do konvertoru zasunutá kyslíková tryska, chlazená vodou, která do surového železa dmychá kyslík.

Kyslíkové konvektory mohou mít objem 30 až 300t. Jako vsázku se v kyslíkovém konvertoru používá, podobně jako u elektrických obloukových pecí, ocelový odpad jehož množství záleží na teplotě a složení surového železa a druhu vyráběné oceli. Kyslík je dmychán na hladinu surového železa, tím dochází k oduhličení a odfosfoření.

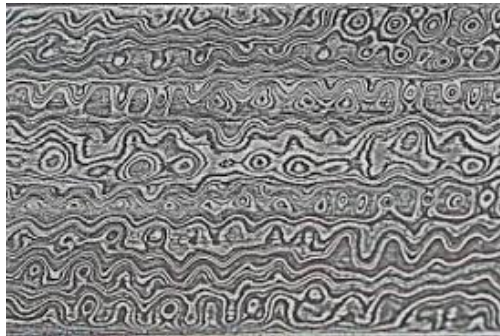


Obr. 5.1.2.1 Kyslíkový konvektor [1]

Oxidace uhlíku, fosforu a dalších prvků je hlavním zdrojem tepla, které slouží k ohřevu oceli na teplotu přibližně 1 600°C a zároveň roztavení ocelového odpadu. Tavidlo v podobě bauxitu nebo kazivce a vápna, se v průběhu tavby přidávají jako struskotvorné přísady. Tavba v závislosti na velikosti pece trvá 20 až 30 min. [1][3][9]

6. Damascenská ocel

Damascenská nebo také damask, damasková, či damašková ocel je speciálním druhem nehomogenní oceli s pravidelnou strukturou, skládající se ze dvou nebo i více různých ocelí anebo oceli a jiného kovu. Charakteristické pro tento druh oceli je její speciální vzhled, který se díky vybroušení a naleptání ukáže na jejím povrchu. Příklad můžeme vidět na obr. 6.1. Tento vzor se může podle použité techniky při výrobě lišit.



Obr. 6.1. struktura damascenské oceli [26]

Damascenská ocel je nejenom estetickým kovem, ale při použití vhodných materiálů má také výborné mechanické vlastnosti. I při obsahu 1,25-1,6% uhlíku v železe, dokáže být tvrdá a zároveň i poměrně houževnatá, což je zapříčiněno spojením dvou různých ocelí. Tato kombinace estetiky a dobrých mechanických vlastností vedla k tomu, že se damascenská ocel stala vyhledávanou a velmi používanou ocelí hlavně na výrobu chladných zbraní. Je tomu tak i dodnes. [12]

6.1. Historie damascenské oceli

Damascenská ocel dostala své jméno podle města ležícího v dnešní Sýrii, Damašku. Toto centrum obchodu se díky svým kovářům proslavilo kováním kvalitních damascenských mečů. Za místo vzniku se však považuje Indie, kde se výrobky v podobě lité oceli tzv. Wootzu, nebo krystalického damašku, šířily do celého světa. První důkazy o její existenci pochází přibližně z roku 500 př. n. l. [10] Tato technologie výroby damascenské oceli je časově i materiálově náročná a její ovládnutí není, ani nebylo jednoduché. Jelikož její mechanické vlastnosti předčily jiné druhy slitin, postupem času

si tuto technologii, anebo její napodobeninu tzv. svařkovy, osvojily všechny národy ovládající zpracování železa.

Tehdejší způsob výroby oceli přímou metodou, byl poměrně komplikovaný a náročný. Dosáhnout teploty tání za použití starých pecí, při niž železo přechází do tekutého stavu, nebylo možné. Výsledkem byla pórovitá a nehomogenní železná houba, která musela projít dalšími procesy. Metodou vyčištění a zhomogenizování oceli bylo opakované překovávání, vytahování a opětovné svařování do silnějšího kusu. To vše přispělo k rozvoji svařkové technologie. [13]

Svařkový damašek spočívá v několikanásobném překládání a svařování materiálu, přičemž počet vrstev exponenciálně narůstá a je dosaženo žádaných vlastností. Do dnes se bez bližší specifikace damascenskou ocelí myslí materiál vyrobený touto technologií.

S příchodem palných zbraní se od chladných zbraní začalo ustupovat a tak začala ustupovat i výroba damascenské oceli. Ta se ze začátku používala i k výrobě hlavní, kde tato ocel prokazovala dobré výsledky přesnosti. Kvůli vzrůstající poptávce po palných zbraních a velké náročnosti na přípravu damascenské oceli se však od této metody ve většině případu odstoupilo. To zapříčinilo, že tyto prvotní postupy a receptury výroby jak wootzu, tak i svařkového damašku se nedochovaly.

V polovině 20. století došlo k opětovnému používání tohoto materiálu a to zásluhami nožířů, kteří v damascenské oceli našli ideální materiál na výrobu sběratelských nožů. Damascenská ocel, díky své vizuální stránce přilákala spoustu sběratelů a poptávka po těchto nožích rostla. Kvůli rostoucí poptávce, kováři začali znovu objevovat staré řemeslné postupy. [13]

6.2. Současné způsoby výroby damascenské oceli

V dnešní době se damascenská ocel těší poměrně velké oblíbenosti a to hlavně díky nožířům. Jelikož od dob počátku damascenské oceli se průmysl posunul daleko v před, damascenská ocel se v dnešní době vyrábí různými způsoby. Některé z nich se zakládají na tradici a některé se drží spíše pokroku metalurgie.

6.2.1. Krystalizační damašek

Krystalizační damašek neboli také wootz, bulat, litá damascenská ocel anebo pravá damascenská ocel, je název pro materiál objevující se v jižním cípu Indie. Tato ocel se ve formě jakýchsi dvou kilogramových koláčků roztavila do kováren. Tento materiál byl dále překován v čepele vysoké kvality. Zbraně z tohoto materiálu charakterizovala kresba na jejich povrchu. Byla popisována jako vzor pavučiny, zrnko obilí, nebo jako vlny hladiny. Recepturu a postup výroby této oceli se však nepodařilo zachovat. Poslední známé čepele vytvořené s tohoto typu damascenské oceli pochází přibližně ze 17. století. Jako jednu z příčin zániku pokládá profesor J. D. Verhoeven, který se litou damascenskou oceli zabývá i v dnešní době, je vytěžení zdroje rudy v jižní části Indie.



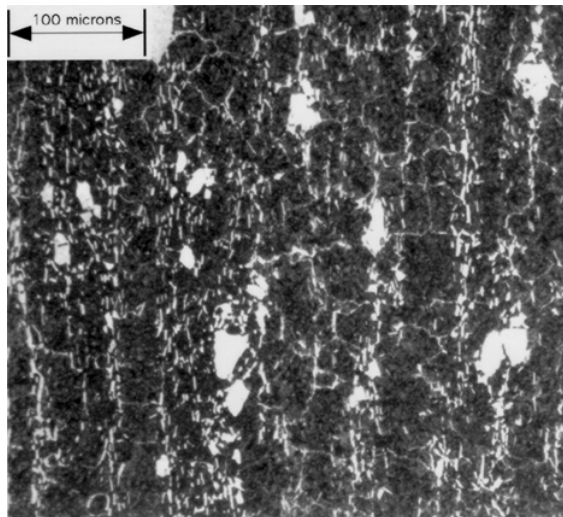
Obr 6.2.1.1 Kresba na povrchu wootz [27]

Tato ruda obsahovala různé legující prvky jako například Cr, Mo, Nb, Mn nebo V, který je velmi efektivní v produkování svazku Fe_3C (cementit) ve vysokouhlíkových ocelích. [14]

V 19. Století se povedlo provést pár pokusů o výrobu lité oceli, které se ukázaly jako úspěšné. Tento úspěch byl ale velmi rychle zapomenut. Až ve druhé polovině dvacátého století, začalo toto metalurgické odvětví růst a to zejména díky americkému profesoru J.D. Verhoevenovi z university v Iowě. Spolu s ním pracoval kovář A. Pendrayem, se kterým společně se podařilo vysvětlit a z velké části obnovit postupy doprovázející výrobu této oceli. Jejich studie, knihy a dále pokusy ruských kovářů

postavili základní kámen pro mnoho dalších kovářů a nadšenců, kteří se v posledních letech snaží tuto zapomenutou techniku oživit. [14]

Pro výrobu této oceli, která probíhá v tavicím kelímku, se jako vsázka používá bílá litina, vhodné oceli nebo jejich směsi. Pokud se použije ocel, je třeba dodat uhlík pro nauhličení až na žádanou hodnotu. Do této směsi je rovněž vhodné přidat vanad, který podporuje vznik Fe_3C . Ohřev je možné provádět v libovolné peci, která má ale dostatečnou teplotu pro roztavení vsázky. Po roztavení se kelímek s vsázkou nechá pomalu chladnout. To má za následek růst velkých dendritických zrn, na jejichž hranici se při dalším ochlazování vylučuje sekundární Fe_3C . Po ochlazení následuje žíhání k rozrušení lité struktury. Po tomto procesu je možno materiál kovat. Při všech procesech po ochlazení je třeba, aby byly dodržovány teploty pod teplotu rozpouštění Fe_3C , aby nedošlo k znehodnocení damascenské oceli. Jelikož je rozsah teplot takto omezen, je proces kování velmi zdlouhavý. [14][15][42]



Obr. 6.2.1.2 Mikrostruktura wootz [8]

6.2.2. Kovářské svařování

Kovářské svařování je dnes většinou kovářů opomíjeno a bráno jako přežitek. Doba si žádá hlavně kvantitu, někdy dokonce i na úkor kvality. Plnit tyto požadavky v současném tempu je neslučitelné s tradičními a zdlouhavými postupy. Díky umu starých řemeslných kovářských mistrů však tato technologie přežila.



Obr 6.2.2.1 Kovářské svařování [28]

Metoda kovářského svařování je technologicky složitá a její výroba může být i pro zkušeného kováře náročná, jelikož jediná chyba v tomto procesu může zničit dlouhou práci kováře a jeho pomocníků. Nejprve si kovář musí připravit a vytvarovat konce svařovaných ocelových tyčí. Materiál se předehřeje, očistí od okují, posype tavidlem a nahřeje na požadovanou teplotu, která se v závislosti od svařovaného materiálu může lišit. Po nahřátí na požadovanou teplotu se materiál prokováním spojí v jeden celek.[11]

V případě výroby damascenské oceli kovářským svařováním, kovář zvolí dvojici vhodných materiálů, nejčastěji je to kombinace měkkého a tvrdého materiálu resp. méně a více nauhličené oceli. V dnešní době však kováři často vyrábějí jenom napodobeninu, pro vytvoření damascenského vzoru. Pro tento účel použijí dvě nástrojové oceli z nichž jedna z nich obsahuje nikl. Po naleptání nezčerná, ale zůstane stříbrná. Vraťme se však zpět k výrobě ze dvou ocelí rozdílně nauhličených. K tomuto postupu je vhodné zvolit plechy materiálu o tloušce asi 2-3mm, v dostatečném množství a před složením je očistit až na holý kov. Ideální je zvolit čím jak největší počet vrstev hned na



Obr 6.2.2.2 Kovářské svařování damascenské oceli[29]



Obr 6.2.2.3 Paket [30]

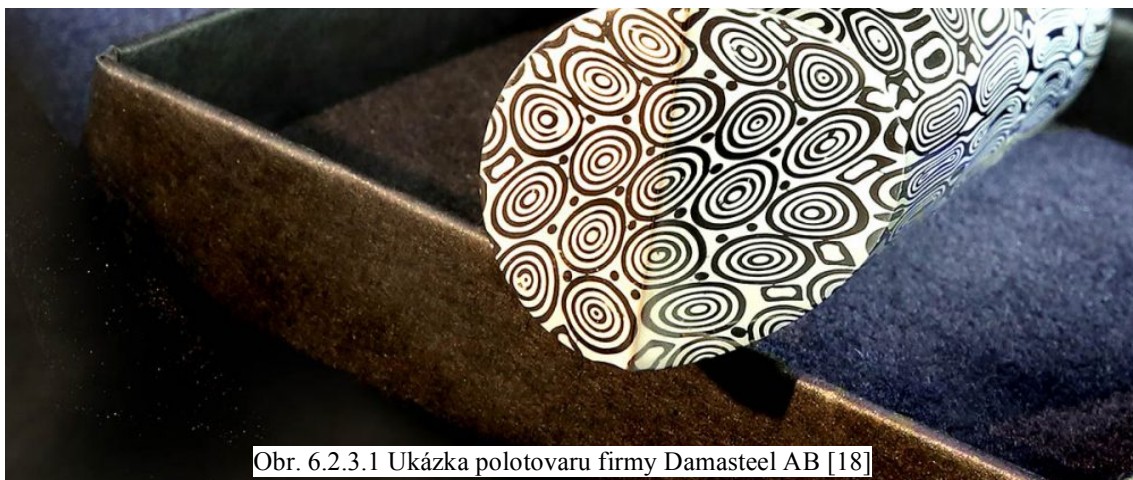
první svaření. Pro lepší manipulovatelnost jsou plechy k sobě svařeny obloukovou svářečkou. Takto svařené plechy se přivaří na vhodnou tyč. [13]

Takto připravený paket je třeba dostatečně posypat tavidlem např.: boraxem nebo křemičitým pískem se sodou, které spolu s okujemi při kování vystříknou ve formě řídké strusky. Ohřev je nutno provádět rovnoměrně a zároveň toto svařování provést rychle, stejnoměrně a razantně. Je velmi důležité při celém procesu správně odhadnout teplotu. Kdyby byl polotovár moc nahřátý pod úder kladiva by se rozpadl, kdyby byl naopak málo nahřátý jeho svar by byl nedokonalý. Po základním svaření následuje proces skládání vrstev, který probíhá naseknutím polotovaru složením a rozkováním. Tento postup se opakuje tak dlouho, dokud se nedosáhne žádaného počtu vrstev. Tento postup je také možná provádět zkroucením polotovaru a překládáním, čímž docílíme jiné kresby. [16]

V minulosti se tento postup od toho dnešního moc nelišil. Místo paketu se k sobě svařily dvě tyče s různým obsahem uhlíku a polotovár se překládal tak dlouho, dokud nebyl kovář spokojen. Jelikož v minulosti byla ocel vyšší kvality s větším obsahem uhlíku dražší, musela být kvůli náročnosti na výrobu ocel více nauhličena a musela mít minimálně 0,35% uhlíku, aby byl výsledný materiál vhodný ke kalení. [17]

6.2.3. Prášková metalurgie

Stále rostoucí poptávka po damascenské oceli zapříčinila vznik švédské firmy Damasteel AB, která tuto ocel produkuje pomocí práškové metalurgie. Tato firma vyrábí Damascenskou ocel od roku 1995.[16]



Obr. 6.2.3.1 Ukázka polotovaru firmy Damasteel AB [18]

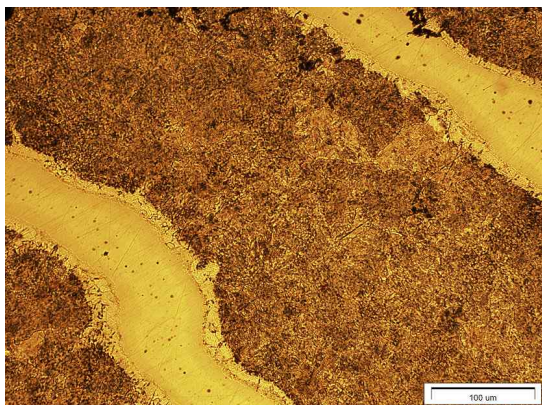
Prášková metalurgie je metoda výroby obrobků spékáním prášků kovů, oxidů, karbidů kovů a nekovových materiálů. Aby se tavenina rychle ochladila, rozprašuje se tryskou za použití vzduchu, dusíku nebo vody jako nosného média. Přibližná rychlost ochlazování je $10^3 - 10^5 \text{ K.s}^{-1}$ do pevného stavu. Vznikají tak kapky o velikosti řádově 60 μm . Takto získaný prášek se následně plní do kapslí, které se vakuově uzavřou. Při tlaku okolo 1000 MPa a teplotě 1150°C je tento prášek izostatickým lisováním zhutňován. Takto se utvoří heterogenní materiál. Pomocí této metody lze vytvořit materiál, který se jinými metodami vytvořit nedá a to je nerezová damascenská ocel. [16][17][19]

Firma Damasteel AB, k této výrobě používá dva druhy nerezových oceli a to RWL 34 a PCM 27. Složení těchto oceli je uvedeno v tabulce 6.2.3.1

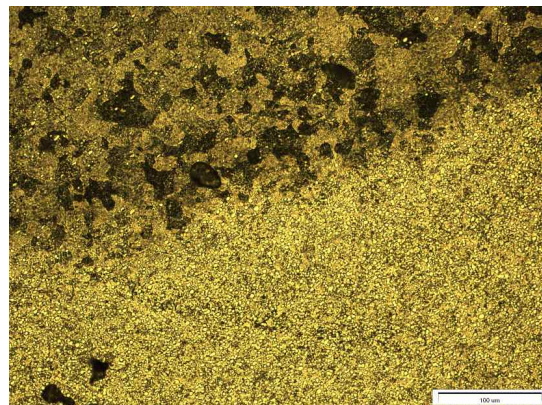
| Ocel | C | Si | Mn | Cr | Mo | V |
|--------|-------|-------|-------|--------|----|-------|
| PCM 27 | 0,60% | 0,50% | 0,50% | 13,50% | | |
| RWL 34 | 1,05% | 0,50% | 0,50% | 14,00% | 4% | 0,20% |

Tab. 6.2.3.1[19]

Na Damasteel, vyrobenou práškovou metalurgií, je při porovnání s damascenskou ocelí vyrobenou pomocí kovářského svařování vidět v mikrostruktúře velký rozdíl. Na Obr 6.2.3.2 je vidět svařovaný materiál, na kterém je vidět hranice, která je tvořena díky difúzí uhlíku a také neúplného promísení materiálu. Zase u oceli Damasteel můžeme na obr. 6.2.3.3 vidět promísení obou materiálů. V horním levém rohu ocel PCM 27 a v dolním ocel RWL 34.



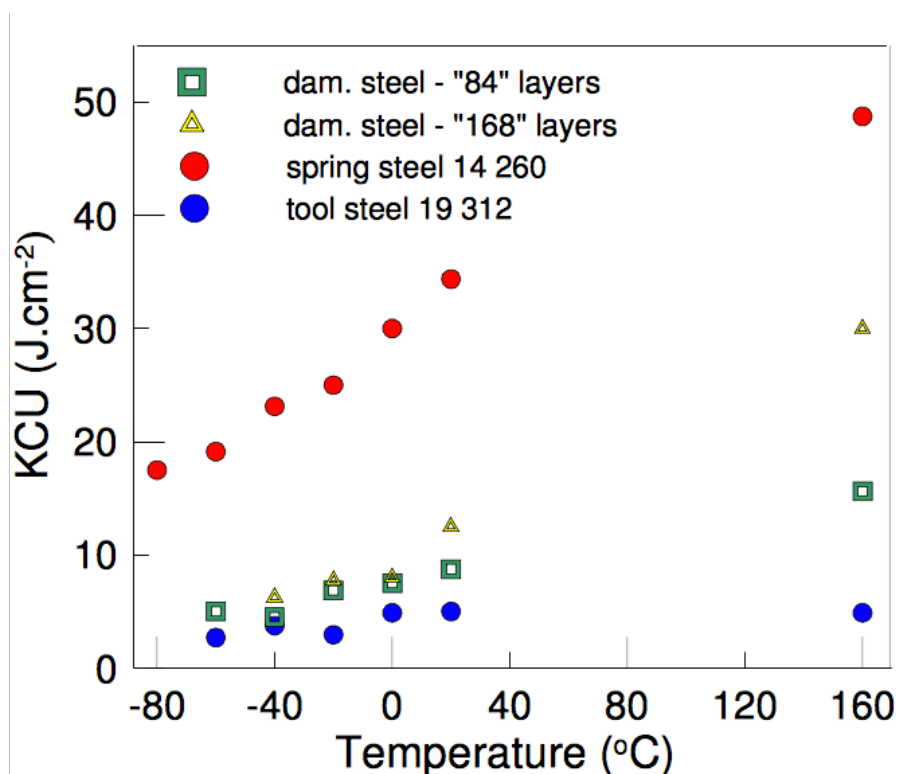
Obr 6.2.3.2 Mikrostruktura svařované damascenské oceli [31]



Obr.6.2.3.3 Mikrostruktura Damasteel [31]

6.3. Vlastnosti damascenské oceli

Damascenská ocel ať už to vyrobená pomocí kovářského svařování, lití, nebo práškovou metalurgií je pověstná svými mechanickými vlastnostmi. Dokonce o ní panují různé mýty nebo legendy. Jedna z nich je popsána v románu Waltera Scotta, Talisman. Vypráví o setkání dvou vladařů Richarda I. a sultána Saladina, kteří porovnávali, či čepel je lepší. Anglický král prý přesekl ocelovou tyč o tloušťce půl palce a na jeho meči nezůstal jediný zářez. Sultán naopak ukázal ostrost své šavle. Lehkým švihnutím rozsekl na půl hedvábný pérový polštář.



Obr. 6.3.1. Teplotní ovlivnění vrubové houževnatosti [20]

Dle některých zdrojů damascenská ocel vyrobená kovářským svařováním [13], dokáže převzít lepší z vlastností obou ocelí, ze kterých byla vytvořena. Z nízkouhlíkové, měkké a houževnaté oceli převezme její houževnatost a z vysokouhlíkové, tvrdé a křehké oceli převezme její tvrdost. Tím se z ní stane tvrdá a zároveň houževnatá ocel, které má ještě lepší vlastnosti než obě oceli samotné.

Má ale damascenská ocel opravdu mechanické vlastnosti, kterými oplývají báje a legendy a umí převzít ty nejlepší vlastnosti z obou svých polotovarů?

Na obrázku 6.3.1 můžeme vidět graf vrubové houževnatosti. Testovány byly čtyři materiály. Damascenská ocel s osmdesátičtyřmi vrstvami, damascenská ocel se stošedesátiosmi vrstvami, a oceli z nichž byly vyrobeny damašky 14 260 a 19 312. [20] Na výše uvedeném grafu můžeme vidět, že vrubová houževnatost damascenské oceli není lepší než oceli 14 260, ale její vrubová houževnatost je větší než u oceli 19 312.

V článku Basic mechanical properties of layered steels [41] byla testována damascenská ocel, která byla vyrobena s oceli 19133 a 80CrNi11 pomocí kovářského svařování. Tato ocel byla podrobená množství mechanických zkoušek, tepelně neupravená ale i kalená do vody či do oleje při teplotách 150 a 350°C. V tabulkách 6.3.1.1 a 6.3.1.2 můžeme vidět výsledky pevnosti v tahu a mikrotvrdosti. V tabulkách 6.3.1.3 a 6.3.1.4 můžeme vidět výsledky ze zkoušky rázem v ohybu pomocí charpyho kladiva. V 6.3.1.3. jsou uvedeny výsledky pro vzorek kalený do vody bez vrubu a v 6.3.1.4 jsou uvedeny výsledky pro vzorek kalený do oleje s U vrubem, jelikož vzorek kalený do oleje bez vrubu nebyl přeražen.

VII: Results of microhardness measurements

| Measurement | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | Deviation | Range | Average | |
|----------------|-------------|----------|------|------|------|------|---------|-----------|--------|---------|----|
| heat treatment | Steel layer | [HV] | [HV] | [HV] | [HV] | [HV] | [HV] | [HV] | [HV] | [HRC] | |
| 870 °C/water | 19 133 | 1062 | 1034 | 1034 | 1091 | 1062 | 1056.6 | 21.28 | 452.64 | 68 | |
| | 80CrNi11 | 908 | 932 | 932 | 956 | 908 | 927.2 | 17.96 | 322.56 | 66 | |
| | p.t. | 19 133 | 1007 | 981 | 956 | 932 | 956 | 966.4 | 25.54 | 652.24 | 67 |
| | 150°C | 80CrNi11 | 865 | 844 | 824 | 886 | 805 | 844.8 | 28.72 | 824.56 | 64 |
| | p.t. | 19 133 | 702 | 718 | 734 | 751 | 734 | 727.8 | 16.59 | 275.36 | 60 |
| | 350°C | 80CrNi11 | 644 | 658 | 672 | 658 | 644 | 655.2 | 10.48 | 109.76 | 56 |
| 900 °C/oil | 19 133 | 644 | 631 | 618 | 631 | 618 | 628.4 | 9.73 | 94.64 | 55 | |
| | 80CrNi11 | 908 | 932 | 956 | 956 | 932 | 936.8 | 17.96 | 322.56 | 67 | |
| | p.t. | 19 133 | 581 | 559 | 570 | 581 | 559 | 570 | 9.84 | 96.8 | 52 |
| | 150°C | 80CrNi11 | 805 | 768 | 768 | 786 | 805 | 786.4 | 16.55 | 273.84 | 62 |
| | p.t. | 19 133 | 644 | 630 | 617 | 632 | 617 | 624 | 9.23 | 26 | 55 |
| | 350°C | 80CrNi11 | 581 | 570 | 559 | 570 | 581 | 572.2 | 8.23 | 67.76 | 52 |

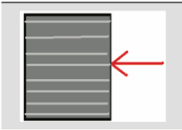
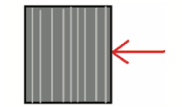
Tab. 6.3.1.1 Mikrotvrdost [41]

VI: Results of tensile tests

| Sample No. | R _{p0.2} | R _m | R _{fr} | A | B | t | v |
|------------|-------------------|----------------|-----------------|------|-------|-------|------|
| | [MPa] | | | [mm] | | [sec] | [mm] |
| 1 | 876.56 | 1264.75 | 1215.48 | 3.84 | 9.98 | 612 | 2 |
| 2 | 876.45 | 1169.52 | 1134.57 | 3.77 | 10.28 | 365 | 2 |
| 3 | 880.08 | 1262.8 | 1193.02 | 3.77 | 10.08 | 395 | 2 |


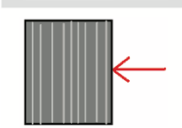
Tab. 6.3.1.2 Zkouška tahem [41]

IV: Test specimens quenched into water

| Specimen No. | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | Average | Range | Deviation | |
|---|-----|------|------|------|------|---------|-------|-----------|------|
|  | 150 | 2.80 | 3.10 | 4.30 | 6.40 | 2.90 | 3.90 | 1.85 | 1.36 |
| | 350 | — | — | — | — | — | — | — | — |
|  | 150 | 7.00 | 5.40 | 4.30 | 4.50 | 5.10 | 5.26 | 0.91 | 0,96 |
| | 350 | — | — | — | — | — | — | — | — |

Tab. 6.3.1.2 Zkouška rázem v ohybu pro materiál kalen do vody [41]

V: Oil quenching

| Specimen No. | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | Average | Range | Deviation | |
|--|-----|------|------|------|------|---------|-------|-----------|------|
|  | 150 | 2.30 | 3.00 | 2.50 | 2.10 | 2.50 | 2.48 | 0.09 | 0.30 |
| | 350 | 1.70 | 3.20 | 2.60 | 3.10 | 2.90 | 2.70 | 0.29 | 0.54 |
|  | 150 | 5.10 | 4.20 | 3.90 | 4.60 | 4.30 | 4.42 | 0.17 | 0.41 |
| | 350 | 4.50 | 6.70 | 5.10 | 6.40 | 6.40 | 5.82 | 0.74 | 0.86 |

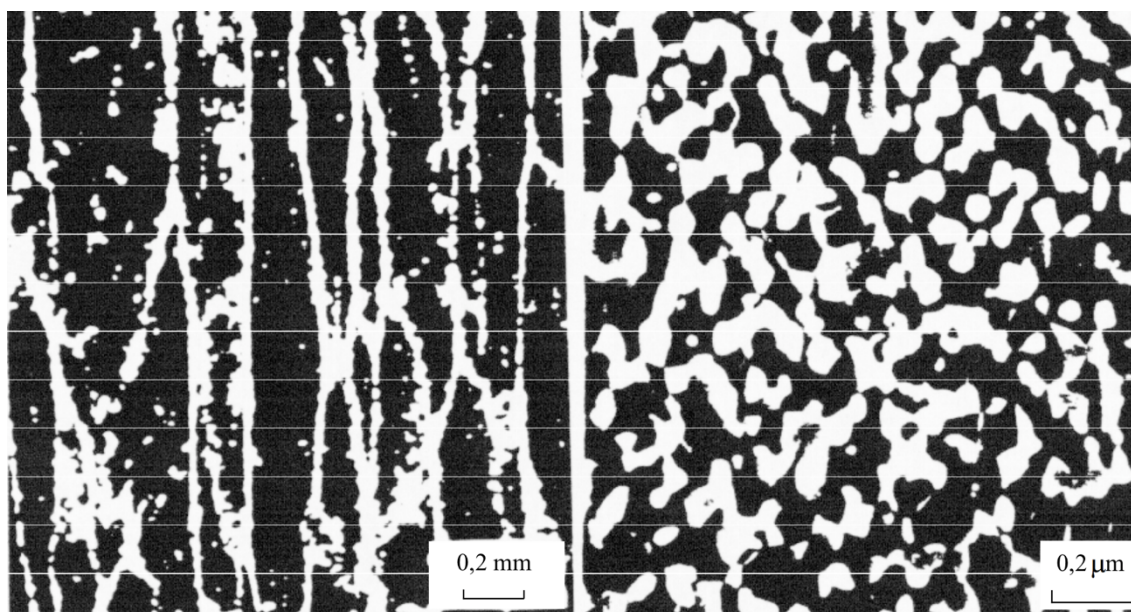
Tab. 6.3.1.2 Zkouška rázem v ohybu pro materiál kalen do oleje [41]

Tyto výsledky spolu dohromady svědčí o tom, že damascenská ocel vyrobená kovářským svařováním, dokáže skloubit jak velkou tvrdost, tak i zároveň dobrou houževnatost.[41]

Na základě těchto poznatků můžeme říct, že damascenská ocel vyráběná kovářským svařováním je opravdu velmi kvalitní. Její tvrdost, resp. houževnatost, nepředčí tvrdost resp. houževnatost tvrdší resp. houževnatější oceli, z které byla vyrobená. Dokáže ale vlastnosti těchto dvou materiálů smísit dohromady tak, že získaný materiál se může chlubit nezvyklou kombinací tvrdosti, houževnatosti a pružnosti.

Damascenská ocel litá, tzv. wootz nebo také bulat je vysokouhlíková ocel s obsahem uhlíku více než 1,8%. Při nahřátí této oceli do bílého žáru, přibližně 1200°C, je u této oceli dosaženo růstu zrn železa, následným pomalým ochlazováním vylučování cementitu neboli také karbidu železa, na hranici zrn ve formě sítí, které vytvoří vzor damascenské oceli viditelný pouhým okem. Dále mechanickým zpracováním při teplotě 650 až 750°C, ve které se karbidy železa neroztaví, zůstanou tyto sítě rozbité na jednotlivé

globulární částice. Tato síť karbidu už není jednotná, ale pro lidské oko zůstává spojitá, což zachovává damascenský vzor na oceli. To můžeme vidět na obr. 6.3.2 a 6.3.3.



Obr. 6.3.2 [42]

Obr. 6.3.3 [42]

Takto zhotovená ocel s chemickým obsahem 1,8% Fe 1,6 Al, 1,5% Cr, 0,5% Mn prokázala superplasticitu při tahové zkoušce při 750°C. Vzorek byl testován při deformační rychlosti 2% za minutu a dosáhl prodloužení o 450%. Tento materiál byl testován rovněž při pokojové, měl mez kluzu 920 MPa a Mez pevnosti 1 145 MPa a celkové prodloužení 12%. [42]

Tento materiál rovněž prokázal pozoruhodnou kombinaci síly a tažnosti. Na základě těchto poznatku docházím k názoru, že damascenská ocel vyrobená ať už to kovářským svařováním nebo litím, je při dodržení technologických postupů specifická svými dobrými mechanickými vlastnostmi a je pozoruhodně tvrdá, tažná a houževnatá.

6.4. Současné uplatnění damascenské oceli

Jelikož z vývojem průmyslu metalurgové dokážou vytvořit materiály pevnější, anebo zase houževnatější, damascenská ocel má největší využití ve výrobcích, které vyžadují kombinaci těchto vlastností. Pravděpodobně největší využití má tato ocel nepochybně díky své neobvyklé kresbě, která je lákadlem pro mnoho lidí.

6.4.1. Výroba chladných zbraní

Damascenská ocel je nejvíce využívána hlavně v nožířství. Je to taky odvětví, které se zasloužilo o obnovu těchto starých receptur a postupů. Tyto nože jsou často pouze sběratelským předmětem, ne však kvůli tomu, že by postrádaly nějaké z vlastností kvalitních nožů, ale spíše kvůli svému designu a v neposlední řadě ceně. Při výrobě nožů lze dosáhnout různých vzorů. Ty můžeme rozdělit podle struktury, způsobu zpracování a dle použití zdrojového materiálu. Dělení podle struktury je pravděpodobně neobsáhlejší skupinou, jelikož vzorů, kterých je možné na čepeli nože dosáhnout, je obrovské množství. Můžeme mít například lineární, vlnitý, vlasový, mapový neboli náhodný. Další vzory můžeme získat různými způsoby výroby, např. peříčkový vzor získáme rozseknutím paketu ve směru vrstev, zároveň kolmo na rovinu vrstvy a následným skováním zpět. Vzory můžeme získat i přidáním různých ocelových nástrojů, dílů nebo předmětu. K velice vyhledávaným patří např. lanový vzor, který je dosažen za použití lan.



Obr. 6.4.1.1 Peříčkový vzor [32]



Obr. 6.4.1.2 Lanový vzor [33]

Kromě nožů se damascenská ocel používá na výrobu mečů. Japonské meče, jinak zvané katany, se považují za vrchol technologie výroby svářkové damascenské

oceli. Díky své složité výrobě, která byla starými mistry dovedena prakticky až k dokonalosti, starým samurajským mečům nemůžou konkurovat ani dnes vyrobené čepele. Tyto meče jsou proslavené hlavně díky své výjimečné ostrosti, která je dosažená díky speciálnímu postupu při kalení meče. Toto kalení probíhalo lokálním nanesením



br. 6.4.1.3 Japonský meč z damascenské oceli [34]

tenké vrstvy kalící pasty na ostří a silnější vrstvy na zbytek místa. Takto ostří získalo větší zakalení, díky rychlejšímu ochlazování. Rozdílné rychlosti zapříčinily také charakteristické zahnutí meče.[23]

6.4.2. Využití v puškařství

Již na počátku, kdy palné zbraně začaly vytlačovat chladné zbraně, byly pokusy o výrobu hlavních z damascenské oceli. Z této oceli se vyráběly nejen hlavně, ale i jiné kovové části pušek. Tyto hlavně prokazovaly vyšší přesnost při iterované střelbě, což se projevilo hlavně až u opakovacích zbraní. Jiné části zbraně tvořené damaškovou ocelí však už byly pouze dekorativní. Problémem byla také vyšší hmotnost, což zhoršovalo manipulovatelnost ale zároveň zmenšovalo zpětný ráz zbraně. [15]



Obr. 6.4.2.1 Torzirovaní ocelových prutů [35]

Výroba této hlavně spočívala ve zhotovení damascenských ocelových prutů, které se následně torzírovaly, neboli zkroucely. Poté byly zase zakulaceny a válcovány na plocho.

Po tomto procesu následovalo navaření na trn a následné navíjení do tvaru šroubovice. Tento trn byl poté odvrtán a pro vyniknutí struktury se hlaveň vybrousila a naleptala.

Takto produkované hlavně nemohly ale být užívány při použití bezdýmného střelného prachu, protože nevydržely vysoký tlak nového prachu. Tento prach měl vyšší výkonnost než předtím používané prachy.

V pozdějších dobách se zřídka kdy objevovaly zbraně z damascenskou hlavní, nejčastěji to byly kulovnice a zalamovací brokovnice.

V dnešní době se stále damascenská ocel pro výrobu hlavní používá. Jelikož by však damascenská ocel tlak bezdýmného střelného prachu nevydržela, musí být použita vnitřní nosná hlaveň, která je vyrobená z materiálu lépe odolávající vysokým tlakům. Damascenská ocel se už nenavíjí na trn, ale přímo na vnitřní hlaveň.

Pozoruhodné je, že takto vyrobené damascenské hlavně nejsou jenom designovou záležitostí, ale také prokazují větší přesnost a to hlavně při střelbě rychle opakované. Proč tomu tak je, je však dodnes záhadou. Kvůli své pracnosti a vysokým nákladům nejsou tyto zbraně velmi rozšířené. [15]



Obr. 6.4.2.2 Damascenská hlaveň zalamovací brokovnice [36]

6.4.3. Damascenská ocel jako šperk

V poslední době tato ocel nabývá na populárnosti také jako šperk. Nejčastěji v podobě prstenu. Autoři takových prstenu uvádějí mnohé výhody těchto šperku.



Obr. 6.4.3.1 Damascenský prsten [24]

Mezi ně patří především korozivzdornost, ošřuvzdornost, minimální údržba a beze sporu i cena. Jelikož tyto šperky nemusí mít požadované parametry na tvrdost nebo houževnatost, ve většině případů bývají vyrobeny kovářským svařováním, přičemž jedna z oceli obsahuje Ni. [24]

6.5. Materiály podobné damascenské oceli

Jsou materiály, které jsou damascenské oceli velmi podobné a často zahrnované do jedné skupiny, i když to nejsou materiály na bázi železa.

6.5.1. Mokumé Gane

Tento materiál pochází z Japonska. Může se zdát velmi podobný damascenské oceli a to díky svému vzorování. Základem tohoto materiálu však není železo, ale měď. Své jméno dostal dle svých charakteristických rysů. Mokumé totiž znamená dřevěné oko a gane ocel. Tento materiál se zrodil na přelomu 16. a 17. století, díky zálibě, japonského lidu, ve



Obr. 6.5.1.1 Prsten z mokumé gane [37]

zdobení mečů. Výroba tohoto materiálu se připisuje kovářskému mistru jménem Denbei Shoami. On zkombinoval měď s „shakudo“ což je slitina mědi se zlatem. [25]

Výroba tohoto materiálu je poměrně jednoduchá. Materiály v podobě čistých kovů, anebo jejich slitin se naskládají na sebe a svaří se vysokým tlakem při teplotě tavení s nejnižším bodem tání jednoho z kovů. Díky jednomu mylnému popisu tohoto materiálu, kde bylo chybně uvedeno, že je možno vytvořit tento materiál při použití jednoho materiálu jako pájky, se hodně kovářů setkalo s nezdarem při výrobě mokumé gane. [25]

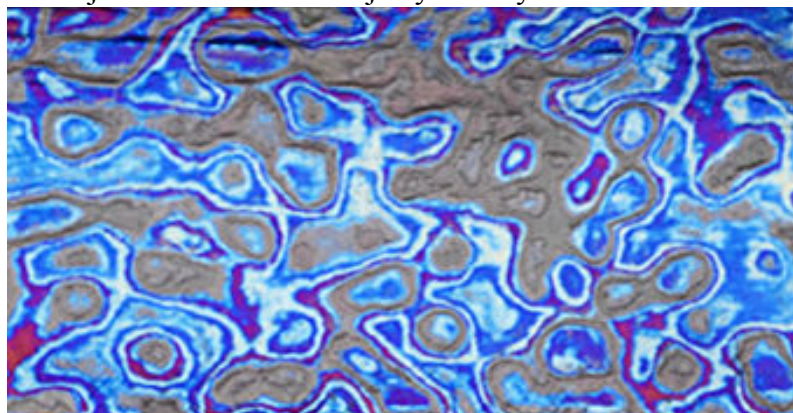


Obr. 6.5.1.2 Nevybroušený polotovar mokumé gane [38]

Japonci však toto umění opustili, avšak díky svému zajímavému designu se v sedmdesátých letech 20 století přeneslo do Ameriky kde se stalo populární a v dnešní době v Americe na tomto materiálu pracuje více lidí než kdy vůbec v Japonsku. [25]

6.5.2. Mokumé Gane

Druhým podobným materiálem jako damascenská ocel je tzv. timascus, neboli timaskus. Tento material je velmi podobný damascenské oceli. Netvoří ho však ocel, ale slitiny titanu. Odlišuje se hlavně barvou a je využíváný ke zdobení nožů.



Obr. 6.5.2.1 Timascus [39]

7. Závěr

Už v dávné historii byla damascénská ocel velmi kvalitním materiálem, což dokazují dochované exempláře mečů vytvořených z této oceli. Postupem času a vývojem nových zbraní se však na damascenskou ocel, která byly převážně v minulosti využívána na výrobu mečů, zapomnělo a tak byly ztraceny postupy i receptury na její výrobu.

V této práci se obecně pojednává o výrobě oceli jako takové, o historii damascenské oceli a její výroby, která byla ztracena, ale díky spolupráci kovářů a metalurgů znovu obnovena. I přes pokročilý průmysl a mnoho zdrojů informací však toto obnovení nebylo jednoduché. Obnova tohoto umění trvala poměrně dlouho, což naznačuje že proces výroby a jeho postupy jsou velmi náročné a mistři kováři minulé doby museli prokázat opravdový um při výrobě damašku.

Tento materiál je možné vyrábět různými způsoby od historických postupů až po novodobou práškovou metalurgii. I když se hutní průmysl posunul daleko v před od starodávných technologií výroby damascenské oceli, pro její výrobu se musel vrátit zpět ke kořenům.

V bakalářské práci jsou popsány základní principy, jak původní tak i moderní výroby damascenské oceli. Damascenská ocel se sice nemůže pyšnit žádným prvenstvím v mechanických vlastnostech, nebo snad v množství vyrobeného materiálu, ale její předností je kombinace a dobré výsledky tvrdosti a houževnatosti o čemž svědčí nože a meče z ní vyrobené.

V dnešní době jsou metalurgové schopní vyrobit materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi než je damascenská ocel. Žádný z nich, však neskloubí tyto své vlastnosti s estetikou v podobě vzorů jaké má damascenská ocel. Hlavně díky této své vlastnosti, se damascenská ocel může v dnešní době těšit novému zájmu nejen v řadách nožířů, nebo sběratelů nožů, ale také ve výrobě ozdobných předmětů nebo pušek.

8. Literatura

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
- [2] SKÁLOVÁ, Jana. *Fyzikálně metalurgický slovník*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-831-5.
- [3] ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, 2008, 311 s. : il. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [4] GREENWOOD, N. N. (Norman Neill) a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků. Svazek II*. Praha: Informatorium, 1993, s.794-1635. ISBN 80-85427-38-9.
- [5] JIRÁSEK, J. a M. VÁVRO. *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3.
- [6] Konstrukční materiály. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/09-BUM%20-%20konstrukcni%20materialy,%20kovy.pdf>
- [7] TALLA, Dominik. Mineralogické a genetické typy železných rud. *Spolek Františka Kruh přátel Technického muzea v Brně* [online]. Brno: Technické muzeum v Brně, 2010, 13. Červenec 2013 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.starahut.com/node/7#sthash.gaQ3ohwd.dpbs>
- [8] VERHOEVEN, J.D., A.H. PENDRAY a W.E. DAUKSCH. *The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9809/Verhoeven-9809.html#Ref1>
- [9] Kyslíkové konvektory. *Strojírenství - vše co student potřebuje vědět* [online]. Strojírenství, 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/kyslkov-konvertory.html>
- [10] SACHSE, Manfred. *Damascus Steel, Myth, History, Technology Applications*. 3. vyd. Düsseldorf: Stahleisen-Verlag, 2008. ISBN 978-3514007512.
- [11] GOŇA, Karel a Miroslav. *Umělecké kovářství a zámečnictví*. Praha: SPN - Státní pedagogické nakladatelství, 1984. ISBN 14-495-84.
- [12] DABAKYAN, Arkady. O Bulatu... Začátek. *KovarCZ* [online]. Praha [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://kovar-a.cz/o-bulatu...-za-atek.html>
- [13] Damašková Ocel. *Knife.cz - vše o nožích* [online]. Milan Pokorný, 2006 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.knife.cz/Knifecz/Technika/tabid/57/ctl/Details/mid/384/ItemID/50/Default.aspx>
- [14] *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society: JOM*. 1998, **50**(9). VERHOEVEN, J.D., A.H. PENDRAY a W.E. DAUKSCH. *The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9809/Verhoeven-9809.html#Ref1>
- [15] ČECHLOVSKÝ, Stanislav a Michal ČERNÝ. Povídaní o damaškové vrstvené oceli - část I - Nože nůž. *Nože nůž* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.noze-nuz.com/recenze/damasek1/damasek1.php>

- [16] LOKAJÍČEK, Jan. *Damasková ocel v učňovském školství*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně, Pedagogická fakulta, Katedra didaktických technologií. Vedoucí práce Zdeněk Hodis.
- [17] KOSMÁK, J. *Historie výroby oceli*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Šenberger.
- [18] Fenja. In: *Welcome to a more beautiful world of steel - Damasteel®* [online]. Söderfors: Damasteel® [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://damasteel.se/pattern/fenja/>
- [19] OCEL RWL 34. *František Štraub - výhradní dovozce produktů firmy Damasteel AB* [online]. František Štraub - výhradní dovozce produktů firmy Damasteel AB, 2012 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.damascen.cz/cz/4834-vyrobky-ocel-rwl-34.html>
- [20] *Impact strength and failure analysis of welded damascus steel* [online]. Žilina: Žilina: Strojnícka fakulta Žilinskej univerzity, 2011 [cit. 2019-05-20]. ISSN 1338-6174. *Materiálové inžinierstvo*. ISSN ISSN 1338-6174.
- [21] RUDOLF, Tomáš. *Damašková ocel*. Brno, 2010. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy.
- [22] Damascus - Wootz mechanical properties. *Damascus Steel and Hand Forged Knives* [online]. France [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://damascus.free.fr/f_damas/f_quest/f_wsteel/lounyov.htm
- [23] LOPEZ, Ana M. *Metalworking through History: An Encyclopedia: An Encyclopedia*. Westport, CT and London: Greenwood, 2009. ISBN 978-0313336546.
- [24] Damascus Steel Rings - Pros and Cons. *Unique Mens Wedding Bands - Damascus Steel Rings, Tungsten, & Titanium* [online]. Pillar Styles Unique Mens Wedding Bands, 2018 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://pillarstyles.com/blogs/news/damascus-steel-rings-pros-and-cons?fbclid=IwAR2o_KFd_FtBeFUPXe9J_HhQnVlttO-gIAKXuPts2p-SZYq06jtXMPwOdvA
- [25] RANGANATHAN, S. A Tale of Wootz Steel. *Resonance*. 2006, , 71-72.
- [26] Vzor vrstvené oceli. In: *Sharp Life* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.sharplife.eu/index.php/noze-vseobecne/doc-ing-michal-cerny-csc/24-vybrane-vlastnosti-vrstvenych-oceli>
- [27] Wootz steel. In: *Sword Forum International* [online]. Sword Forum, 2002 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.swordforum.com/vb4/showthread.php?88889-Wootz-steel>
- [28] Forge welding my first axe head. In: *I Forge Iron* [online]. Invision Comunity, 10 May 2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.iforgeiron.com/topic/46668-forge-welding-my-first-axe-head/>
- [29] DAVIS, A. Billets awaiting the new year. In: *A. Davis Metalworx* [online]. La Vergne, Tennessee, December 2010 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://adavismetalworx.wordpress.com/2010/12/29/billets-awaiting-the-new-year/>
- [30] DAVIS, A. Billets awaiting the new year. In: *A. Davis Metalworx* [online]. La Vergne, Tennessee, December 2010 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://adavismetalworx.wordpress.com/2010/12/29/billets-awaiting-the-new-year/>
- [31] Mikrostruktura nástrojových ocelí Microstructure of tool steels. In: *Stránky o nožích* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/metalka/metalografie.html>
- [32] Drop point feather damascus. In: *BladeForums.com* [online]. BladeForums.com, 1998, 9 July 2009 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.bladeforums.com/threads/drop-point-feather-damascus.659322/>

- [33] Cable Damascus integral knife. In: *Ariel Salaverria - Stainless San Mai and Cable Damascus Custom Knives* [online]. AES Custom Knives, 2004 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://aescustomknives.com/popups12/4integralcable2.htm>
- [34] Pattern Welded Fantasy Katana. In: *Bronze by Jeffrey J Robinson* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.bronzebyjeffreyjrobinson.com/damascuskatana.html>
- [35] KRÁL, Román. Kroucení - torzírování II. In: *Amaterský kovář* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://kovarna.webzdarma.cz/obrazky/torzirovani2/torzirovani22a.jpg>
- [36] Damascus barreled shotguns. In: *Gun repairs, new, used and bespoke shotgun sales* [online]. Norham, Northumberland: Castle Gunmakers [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.castlegunmakers.co.uk/blog/2014/04/28/damascus-barreled-shotguns/>
- [37] George Sawyer Design mokume gane style wedding ring. In: *Joe Escobar Diamonds* [online]. JOE ESCOBAR DIAMONDS, [2019] [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.escobardiamonds.com/wedding-rings/mens-wedding-bands/mokume-gane-wedding-rings/george-sawyer-design-mokume-gane-style-wedding-ring-in-14k-rose-gold-copper-and-sterling-silver.html>
- [38] THE TECHNIQUE OF CREATING MOKUME GANE. In: *Eytan Aharoni Creator of Masterpieces* [online]. Canberra Australia: Aharoni Jewellery, 2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.aharoni-jewellery.com/index.php/mokume-gane/creating-mokume-gane>
- [39] Moire, Black Timascus. In: *Titan Materials & Manufacturing* [online]. Titan Materials & Manufacturing, [2019] [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.titan-mm.com/product/moire-black-timascus-6/>
- [40] Gladius Sword- High Carbon. In: *Swords For Sale - High Carbon, Damascus Steel Swords and Knives - Battling Blades* [online]. Battling Blades, [2019] [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://battlingblades.com/products/gladius-sword-high-carbon-damascus-steel-sword-28->
- [41] ČERNÝ, Michal, Jozef FILÍPEK a Petr DOSTÁL. Basic mechanical properties of layered steels. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* [online]. 2004, 8.4.2013, **61**(1), 25-38 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.11118. ISSN 2464-8310. Dostupné z: https://acta.mendelu.cz/media/pdf/actaun_2013061010025.pdf
- [42] SHERBY, Oleg a Jeffrey WADSWORTH. *Ultrahigh carbon steels, Damascus steels, and superplasticity*. 1985/01/01, **252**. DOI: 10.2172/555400.

9. Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

Fe - železo

C - uhlík

CO – oxid uhličitý

H₂ - vodík

Fe₂O₃ - Hematit

Fe₃O₄ - Magnetit

Fe₂O₃.nH₂O - Limonit

FeCO₃ - Siderit

CaCO₃ – Vápenec

V- Vanad

Cr – Chrom

Mo – Molybden

Nb – Niob

Mn – Mangan

Fe₃C – Cementit

Si – Křemík

Ni - Nikl

Symboly

Re [MPa] – mez kluzu

Rm [MPa] - mez pevnosti v tahu

A [%] – Tažnost

Z [%] - Kontrakce

KCU [J.cm⁻²] – Vrubová houževnatost s U vrubem

10. Seznam obrázků

Obr. 1.1 Damascenský meč

Obr. 4.1.1.1 Schéma vysoké pece

Obr. 5.1.1.1 Schéma elektrické obloukové peci

Obr. 5.1.2.1 Kyslíkový konvektor

Obr. 6.1. Struktura damascenské oceli

Obr. 6.2.1.1 Kresba na povrchu wootz

Obr. 6.2.1.2 Mikrostruktura wootz

Obr. 6.2.2.1 Kovářské svařování

Obr. 6.2.2.2 Kovářské svařování damascenské oceli

Obr. 6.2.2.3 Paket

Obr. 6.2.3.1 Ukázka polotovaru firmy Damasteel AB

Obr. 6.2.3.2 Mikrostruktura svařované damascenské oceli

Obr. 6.2.3.3 Mikrostruktura Damasteel

Obr. 6.3.1. Teplotní ovlivnění vrubové houževnatosti

Obr. 6.3.2 Mikrostruktura damascenské oceli v měřítku 2mm

Obr. 6.3.3 Mikrostruktura damascenské oceli v měřítku 2 μ m

Obr. 6.4.1.1 Peříčkový vzor damascenského nože

Obr. 6.4.1.2 Lanový vzor damascenského nože

Obr. 6.4.1.3 Japonský meč z damascenské oceli

Obr. 6.4.2.1 Torzirování ocelových prutů

Obr. 6.4.2.2 Damascenská hlaveň zalamovací brokovnice

Obr. 6.4.3.1 Damascenský prsten

Obr. 6.5.1.1 Prsten z mokumé gane

Obr. 6.5.1.2 Nevybroušený polotovar mokumé gane

Obr. 6.5.2.1 Timascus

Tab. 6.2.3.1 Chemický obsah oceli PCM 27 RWL 34

Tab. 6.3.1.1 Mikrotvrdost damascenské oceli

Tab. 6.3.1.2 Zkouška tahem damascenské oceli

Tab. 6.3.1.3 Zkouška rázem v ohybu damascenské oceli kalené do vody

Tab. 6.3.1.4 Zkouška rázem v ohybu damascenské oceli kalené do oleje