

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra tváření

Katana vs. Ulfberht - Metalurgický a technologický rozbor
výroby nejlepších mečů historie

Katana vs. Ulfberht - Metallurgical and technological analysis
of the production of the best swords in history

2015

Jan Růžička

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra tváření materiálu

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Růžička**

Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor: 2109R034 Technologie tváření a úpravy materiálu

Téma: Katana vs. Ulfberht - Metalurgický a technologický rozbor výroby
nejlepších mečů historie
Katana vs. Ulfberht - Metallurgical and technological analysis of the
production of the best swords in history

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Vstupní suroviny
3. Postup výroby
4. Metalografie a mechanické zkoušky
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] MORIMOTO, M. *The Forging of a Japanese Katana*. Colorado School of Mines, 2004, dostupné na: https://www.forging.org/system/files/field_document/JapaneseSword.pdf
- [2] WILLIAMS, A. A Metallurgical Study of some Viking Swords. *Gladius*, XXIX (2009), pp. 121-184. ISSN: 0436-029X
- [3] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering : An Interactive E-text*. Wayne Anderson. 5th edition. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2001, 952 s., CD. ISBN 0-471-39551-X.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.**

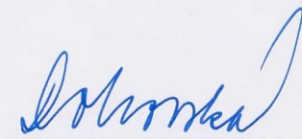
Konzultant bakalářské práce: Ing. Tomáš Kubina, Ph.D.

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 30.04.2015


prof. Ing. Jiří Kliber, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na

ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

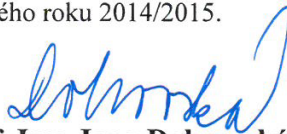
uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.



Ostrava 4. 11. 2014

Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

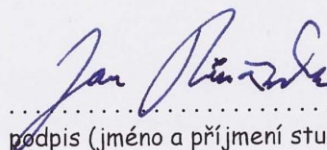
Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

27. 5. 2015



.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce **Doc. Ing. Richardu Fabíkovi, Ph.D.** a konzultantovi **Ing. Tomáši Kubinovi Ph.D.** za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

Abstrakt

Účelem této bakalářské práce je porovnat japonskou katanu a vikingský ulfberht. A to z hlediska: Použitých materiálů, postupů výroby a metalurgie a mechanických zkoušek. Také určit základní výhody a nevýhody při postupech výroby těchto mečů. Závěrem pak určit jaký je tedy rozdíl mezi těmito meči a který je lepší.

Klíčová slova

meč, katana, ulfberht, damašková ocel, wootz, metalografie

Abstract

The purpose of this bachelor work is to compare the Japanese katana and Viking ulfberht. In terms of: Materials, manufacturing processes and metallurgy and mechanical tests. Also to determine the basic advantages and disadvantages in making processes of these swords. It will then determine what the difference between these swords is and which sword is gradually better.

Key words

sword, katana, ulfberht, damascene steel, wootz, metallography

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Výchozí materiály	3
2.1. Základ samurajského meče	3
2.1.1. Tavba	3
2.1.2. Vytvoření hlavní suroviny pro výrobu katany.....	4
2.1.3. Kování <i>kawagane</i> a <i>shigane</i>	5
2.1.4. Konečný výsledek	5
2.2. +ULFBERH+T	5
2.2.1. Základní železný materiál středověké Evropy.....	6
2.2.2. Čínská litina.....	7
2.2.3. Tyglíková ocel	7
2.2.4. Problematika tavby v tyglíku.....	8
3. Postup výroby.....	10
3.1. Základní postup výroby překládané damaškové oceli	10
3.1.1. Právý damašek neboli <i>wootz</i>	10
3.1.2. Nepravý damašek	11
3.2. Postup výroby japonské katany	12
3.2.1. Konstrukce čepelí	12
3.2.1.1. Čepele z jednoho typu oceli	13
3.2.1.2. Čepele ze dvou druhů oceli	13
3.2.1.3. Čepele ze tří typů oceli.....	14
3.2.2. Vykování a hrubá úprava tvaru i povrchu	15
3.2.3. Závěrečná tepelná úprava a tvorba linie <i>hamon</i>	16
3.2.4. Úprava tvaru a zakřivení.....	21
3.2.5. Broušení a leštění	21
3.3. Teoretický rozbor výroby meče +ULFBERH+T.....	22
3.3.1. Různorodé konstrukce historických evropských mečů	22
3.3.2. Vikingské meče	24
3.3.3. Meče Indie a středního východu.....	26
3.4. Porovnání výroby japonského a vikingského meče.....	27
4. Metalografie a mechanické zkoušky	29
4.1. Metalografie.....	29

4.2.	Rozložení mikrostruktur	32
4.2.1.	Japonské meče	32
4.2.2.	Rozložení mikrostruktur v evropských mečích	35
4.2.3.	Mikrostruktura mečů 'Ulfberht'	35
4.2.3.1.	Skupina A – meče s nápisem +VLFBERH+T	36
4.2.3.2.	Skupina B – meče s nápisem +VLFBERHT+.....	37
4.2.3.3.	Skupina C – odlišně označené ocelové meče	38
4.2.3.4.	Skupina D – Odlišně označené železné meče	39
4.2.3.5.	Skupina E – Další meče s označením.....	40
4.3.	Mechanické zkoušky.....	40
4.3.1.	Zkouška tvrdosti	41
4.3.2.	Zkouška tahem.....	42
4.3.3.	Zkouška ohybem	42
4.3.4.	Zkouška prokalitelnosti	42
4.3.5.	Hledané kvality pro kvalitní zbraň	43
5.	Závěr.....	44
	Použitá literatura.....	45

1. Úvod

Meč, elegantní tvarově jednoduchá zbraň, která prakticky určovala historii až do 14. století. Zbraň králů, jarlů, nobility. V Japonsku dodnes znak úcty a loajality. Válečníci všech kultur i věků říkají, že meč je krásná zbraň určená jen k zabíjení, která postrádá jakýkoli praktický účel. Meč je znak moci.

Chceme-li porovnat nejlepší meče historie, nejlépe nám poslouží meče vikingské nesoucí jméno Ulfberht, meče tak kvalitní a žádané, že i po smrti svého stvořitele byly dále vyráběny a jméno Ulfberht vstoupilo mezi mečíře a kovářské mistry jako punc kvality a jedinečnosti. Jméno, které bylo dále používáno i zneužíváno za účelem zvýšení ceny u méně kvalitních kusů. Jak nálezy dokazují, po Evropě se vyskytují necelé dvě stovky kusů podepsány jménem Ulfberht, ale jen hrstka z nich jsou vysoce kvalitní mistrovská, tedy originální, díla. Na základě rozboru jména jsou jedni lingvisté a archeologové rozhodnutí, že místo původu je Porýní, tedy oblast mezi městy Mainz a Bonn. Další zase tvrdí existenci jistého kmenového válečníka, který produkci mečů pouze organizoval. Tezí o původu může být mnoho, ale dokázat která je pravdivá je prakticky nemožné.

Původ kvalitního materiálu je také zastřen rouškou tajemství, ale metalografické a chemické zkoušky naznačují, že meče Ulfberht používali ocel velice podobnou oceli, jež byla používána ve Střední Asii, jež k nám byla dopravována po řece Volze, což byla nejpoužívanější obchodní stezka pro styk se Střední Asií.

Jako druhý meč je nejvhodnější si vybrat produkt japonský mistrů, kteří své umění pěstovali, doladřovali a hýčkali po mnoho generací, takovýmto mečem nemůže být žádný jiný, nežli meč samurajský, katana. Katana byla vlastnictví samurajů, neohrožených válečníků, kteří dodržovali přísnou etiku kodexu Bushido a byli plně oddáni svým pánům. A to ve válce i míru. První dochované železné exempláře lze nalézt kolem roku 400 n. l. takovéto meče byly rovné se zakaleným ostřím a spíše připomínali meče čínské výroby, ze kterých byly nejspíše vyvozeny. Postupem času byly katany přizpůsobovány bojišti. Čepel byla zakřivena, začala se používat svářková ocel, na různé části meče byly používány různé typy ocelí.

Materiál pro výrobu těchto mečů se tradičně získává z vulkanického písku, z černých pláží. Tento černý písek není nic jiného než oxid železitý Fe_3O_4 .

Dalším velkým pojmem, který nesmím opomenout zmínit, než pokročím k dalšímu je damascénská ocel, též známá jako damašek nebo ocel svářková. Takováto ocel je vyráběna kovářským svařováním nesčetného množství plátků oceli. Tradičně se toho dosahuje překládáním dvou typů ocelí s různým obsahem uhlíku. Postupný proces překládání navíc zajišťoval vytlačení vměstků z materiálu a jeho celkovou větší čistotu a homogenitu.

Práce je rozdělena do několika částí, kde v první části se budu věnovat materiálu, ze kterého byl daný meč vyroben, výchozí surovině bez, které by to nebylo možno. V další části uvedu postupy výroby a jejich problematiku, porovnáám, co mají společné a v čem se naopak liší. Nakonec uvedu a porovnáám metalurgické a mechanické zkoušky provedené na mečích, které budu čerpat z uvedené literatury.

V této bakalářské práci se hodlám věnovat porovnávání těchto mečů a chtěl bych zjistit, který postup výroby byl lepší, který byl složitější. Celkově jak se lišili, a také který nakonec vyprodukoval lepší výsledek.

2. Výchozí materiály

Jak jsem předeslal v úvodu, materiál použit k výrobě katany je hojně známý a víme o něm mnohé. Na druhou stranu materiál použitý pro výrobu meče Ulfberht není vůbec jistý. Proto jsem se rozhodl, že jako první rozeberu suroviny potřebné k výrobě samurajského meče.

2.1. Základ samurajského meče

Základním materiálem je *satetsu* což je písek vulkanického původu, nazýván též železný. Železný písek se získává z řek, jezer a pláží, kde byl před dávnou dobou naplaven těmito vodními toky z přilehlých vulkanických zřídél. Získaná surovina je poté vyprána a usušena a přechází se k samotné tavbě. [1, 4]

2.1.1. Tavba

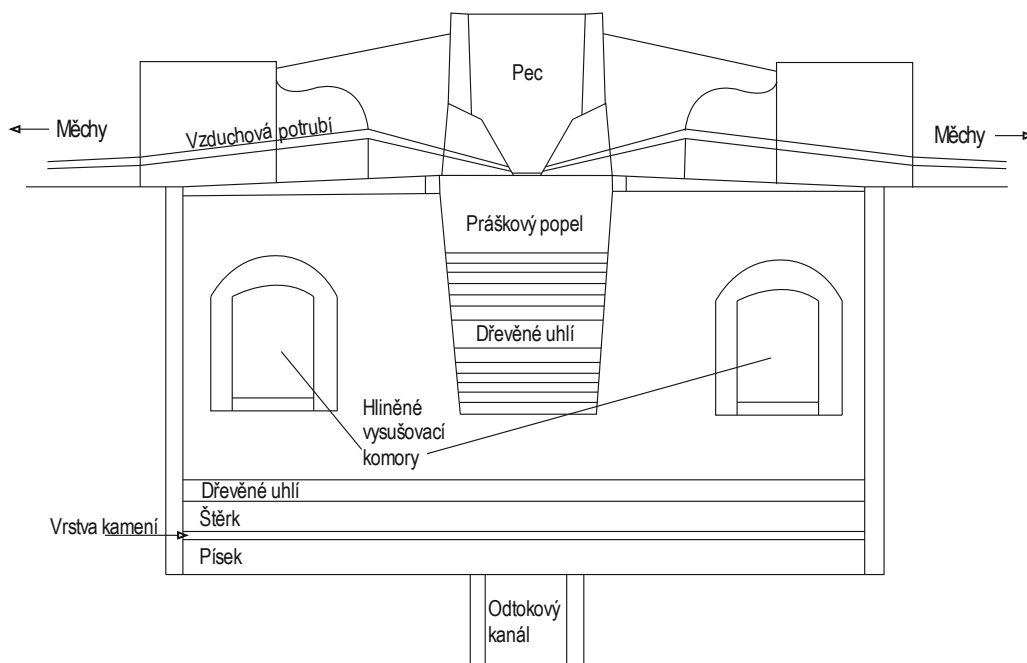
Proces tavení se provádí na speciálně upraveném místě. Jedná se o v zemi zahloubený, systém vzduchových komor, které kondenzují vlhkost, a jámě vyplněné suchými savými materiály, což je jemně drcené dřevěné uhlí a popel. Tady toto uspořádání minimalizují stoupání vlhkosti do pece a snižování teploty v peci. Takováto „podlážka“ může fungovat mnoho let, pokud je dobře udržována a chráněna před nežádoucí vlhkostí. [4]

Samotná tavící pec *tatara* je obdélníková nádoba, která má na výšku a na šířku cirká 1 metr a na délku asi 3 metry a je vyhotovena z jílu a jílových cihel, které se speciálně vyrábí pro tento účel. Poté, co je pec postavena projde celkovým vysušením a nakonec se vypálí. Po obou stranách pece jsou umístěny masivní měchy, které do pece dmýchají vzduch. Ty jsou navíc tradičně chráněny přídavnými stěnami, aby nešlo k jejich poškození vysokým žářem v peci. Stavba pece, zabere minimálně jeden den.

Obsah tavící pece tvoří železný písek, ten je prokládám vrstvami kvalitního dřevěného uhlí, které zajišťuje bohatý přísun uhlíku a samozřejmě slouží jako palivo při ohřevu. Vrstvy uhlí se postupně propalují a železná složka písku je redukována uhlíkem z uhlí. Uhlí a písek se do pece vkládá každých 30 minut nepřetržitě podobu 72 hodin. Teplota v peci je udržována při 1 500°C. Při tomto procesu se ze směsi uvolňují veškeré nečistoty a usazují se na povrchu ve formě strusky. Pec spotřebuje na jednu tavbu asi 8 tun železného písku a 13 tun uhlí. [1, 4]

Po třech dnech tavení je samotná pec *tatara* rozbita a je vyjmut blok pórovité oceli zvaný *kera*. Takovýto blok, váží přibližně 2 tuny a kvůli jeho nezpracovatelnosti je rozbit na

menší valouny oceli. Asi polovina bloku *keru* obsahuje okolo 0,6 až 1,5 procent uhlíku a je dále označováno jako *tamahagane*. Cirka dvě třetiny mají optimální obsah uhlíku v rozmezí 1,0 až 1,2 procent. Zbývá jedna třetina je zušlechtěna kombinací materiálů s vysokým a nízkým procentem uhlíku. Na **obrázku č. 1** můžeme vidět řez pecí *tatara* a příslušného systému pod ní. [4]



Obr. č. 1 Pec *tatara* a vysušovací systém pod ní

2.1.2. Vytvoření hlavní suroviny pro výrobu katany

Kusy *tamahagane* se dělí podle obsahu uhlíku, protože ve výsledku chceme zbraň, která je pružná ale zároveň drží ostří, ale není tvrdá a křehká takže se nezlomí. Rozdělíme tedy valouny oceli na ty s vyšším obsahem uhlíku zvané *kawagane*, tvrdá plášťová ocel. Ocel s nižším obsahem uhlíku je zvaná *shigane*.

Jelikož oba tyto surové materiály jsou silně pórovité a obsahují velké množství vměstků, vad a nedokonalostí, musí být dále zpracovávány a upravovány. Jsou samozřejmě zpracovávány odděleně. To se provádí v samotné kovářské výhni, kdy je ocel rozkována do tenkého plechu. Ocel je v této fázi ještě docel křehká a pórovitá a je jednoduše rozlámána na množství menších úlomků. Jednotlivé úlomky jsou seskládány na plochou rozkovanou část tyče, jsou zabaleny do rýžového papíru a polity keramickou, jílovou směsí. Takto vytvořený blok se vloží do výhně, kde by měla teplota dosahovat 1 300°C. Následně se blok vyjme z výhně a opakovanými údery velkých kovářských kladiv, které ovládají mistrovi pomocníci,

se svaří do jednotného celku. Vznikne ucelený a čistější kus materiálu. Další postup se liší v závislosti na tom, jestli jde o materiál s vysokým procentem uhlíku, *kawagane*, nebo materiál s nižším procentem uhlíku, *shigane*. [1]

2.1.3. Kování *kawagane* a *shigane*

Blok materiálu se následně přeloží kolmo na manipulační tyč a následuje další svaření v ohni výhně. Materiál se poté přeložení ještě několikrát, vždy je potřeba několik zahřátí, aby svar při přeložení byl kompletní. Tento proces se nazývá *shita-gitae* dává vzniku ucelenému kusu materiálu, ale ten obsahuje ještě hodně vměstků a je nehomogenní. Kovář tedy přistoupí k dalšímu kroku, který je označován jako *age-gitae*. Materiál je prodloužen a naseknut na třech místech a přeložen, vytvoří se tak blok o čtyřech vrstvách. Blok je opět kovářsky svařen. Pokud se jedná o *kawagane* pro menší zbraně jako *tanto* nebo *wakizshi*, poslední přeložení neobsahuje tři vrstvy, ale čtyři. [4]

Postup výroby *shingane* polotovaru je velice podobný jako tomu je u *kawagane*. S tím rozdílem, že při fázi *age-gitae* je materiál navrstven desetkrát, namísto čtyřikrát, a poté kovářsky svařen. Množství vrstev je znásobeno, protože materiál užitý na *shingane* nemá takovou čistotu a je složitější u něj dosáhnout dostatečné úrovně homogenity.

2.1.4. Konečný výsledek

Takto vytvořené polotovary jsou již kompletní a můžou být využity pro výrobu meče. Těmito kroky zpracovaný tvrdý materiál s vysokým obsahem uhlíku, *kawagane*, nyní obsahuje kolem 0,7 % uhlíku. Měkký polotovar *shingane* obsahuje asi 0,5 % uhlíku. Materiály jsou teď homogenní a s velmi nízkým podílem nekovových vměstků a jiných nežádoucích prvků. [1]

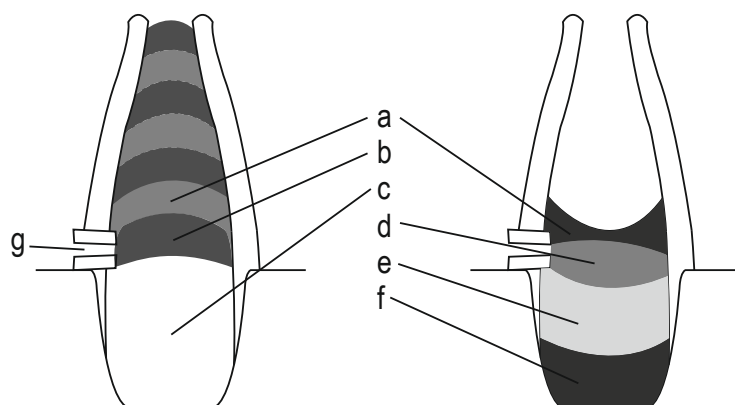
2.2. +ULFBERH+T

Z jakého důvodu byl tento meč, takřka artefakt, „Rolls-n-roys“ mezi meči, vlastně tak výjimečný, proč jeho stvořitelé byli známí po celé Evropě a meč samotný byl jako kus duše bojovníka a svou cenou převyšoval cenu celé menší armády?

2.2.1. Základní železný materiál středověké Evropy

Za éry Vikingů, ve středověku, byl nejběžnější železný materiál dostupný v Evropě znám jako železná houba. Takovýto železný materiál je vytvořeno jednoduchou redukcí železné rudy uhlíkem. Problém je v tom, že tehdejší kováři nebyli schopni dosahovat příliš vysokých teplot. Nebyli schopni dosáhnout teploty tání železa, tedy 1 550°C. Díky takovéto proceduře byla sice ruda redukována na čisté železo, ale nedošlo k jejímu roztavení. Při teplotách mezi 1 100-1 200°C dochází k roztavení nekovových vměstků. [2]

Aby toho nebylo málo, mezi vměstky se také řadila zbytková množství oxidů, jako oxidy vápníku a magnesia původem z minerálu nacházejících se v dané rudě. Mezi další nepatřičné příměsi minerálního původu řadíme mangan a chróm. Nechtěnou součástí se také mohl stát draslík, který zde figuroval prostřednictvím dřevinného popela vzniklý spálením dřevěného uhlí. U některých železných rud může redukční proces vytvořit železo bohaté na fosfor, který by výsledný produkt alespoň trochu vytvrdil. Na **obrázku č. 2** lze vidět jednoduchou pec. [2]



Obr. č. 2 Jednoduchá pec; na začátku a na konci tavicího procesu. Popis: a - železná ruda, b - dřevěné uhlí, c - palivo pro začátek tavy, d - železná houba, e - struska, f - zbytek paliva, g - přívod vzduchu

Zásadní rozdíl, ve srovnání s pozdější výrobou, kdy se kujné druhy železa musely získávat druhotným oduhlčováním surového železa s vysokým obsahem uhlíku, které vyšly z vysokých pecí, tkvěl v tom, že železná houba je díky malému obsahu uhlíku dobře kujná hned po vytavení resp. vyredukování. Tvrdit ale, že železo, ve formě pórovité houby, je hned po vyjmutí z pece okamžitě upotřebitelné, by bylo chybné, musí projít ještě několika fázemi výroby. Kdy byla houba opětovně zahřívána a překovávána, aby se z ní vytěsnily vměstky. [5]

Zpracování takového to železa dá sice použitelnou čepel meče, ale stále bude obsahovat vysoké procent nepatřičných nekovových příměsí. Je pravda, že část této železné

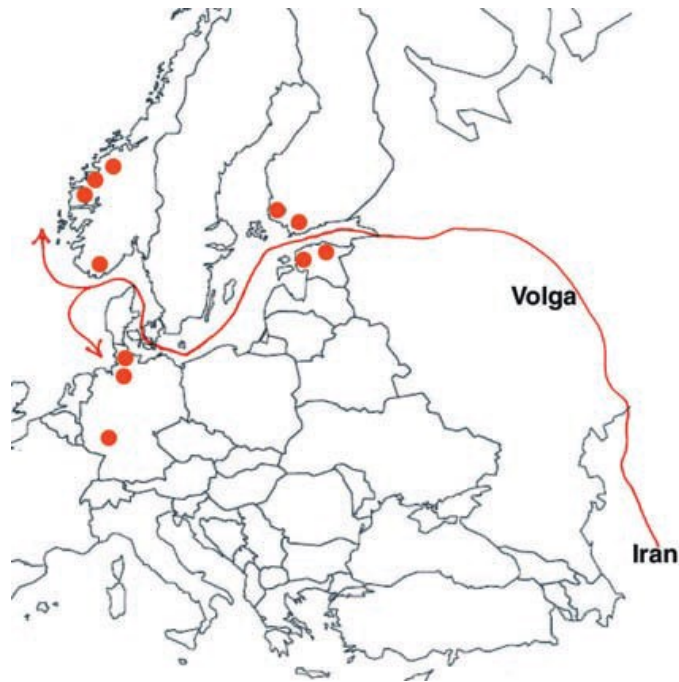
houby je schopná přijmout nějaké to procent uhlíku a tak vytvořit ocel, ale oddělení takovéto oceli, od zbytku železné hroudy, je velice obtížné. [2]

2.2.2. Čínská litina

Pro příklad v Číně se tato problematika železné houby řešila trochu jinak. Kus materiálu byl ponechán ve výhni, dokud se neroztavil. To bylo možné, protože se stoupajícím procentem uhlíku klesá bod tání železa. Nakonec se železo, ve formě litiny, roztaví při 1 150°C když procento uhlíku pohybuje kolem hodnoty 3%. Z vytvořeného materiálu, známého pod pojmem litina, je možné sice odlít nějakou tu zbraň nebo čepel meče, ale nedá se tvářet. Takový materiál, pokud by se z něj měla vytvořit zbraň nebo nástroj, by musel projít sérií oduhličovacích procesů. [2]

2.2.3. Tyglíková ocel

Nyní je nutno se zaměřit na střední východ, přesněji na oblast Indie, Persie a centrální Asie. Meče Ulfberht se vyznačovali nesmírnou čistotou a homogenitou oceli, jež byla použita k jejich vyhotovení. Takováto ocel určitě nebyla vytvořena jako železná houba, případně takového materiálu. Taková to ocel se běžně používala v oblastech dálného východu a centrální Asie. Technologie její výroby byla označena jako kelímková či tyglíková, z toho kelímková ocel. Jestli se takováto ocel do rukou kovářů legendárního meče dostala z dovozu, bylo možné, ale docela nepraktické a finančně náročné. Jedna teze tedy říká, že kováři si přivlastnili jen technologii a kelímkovou ocel si vyráběli sami u sebe v kovárně. Na druhou stranu meče Ulfberht začaly mizet koncem 11. století, tedy v době kdy éra Vikingů dospěla ke svému konci. Je známo, že severští válečníci si vydržovali indickou obchodní cestu po Volze, viditelnou na **obrázku č. 3**, která byla trnem v oku Rusku. Takže ve chvíli kdy moc Vikingů opadla, Rusové toho využili a obchodní cestu si nárokovali pro sebe. Nakonec to tedy vypadá, že technologie výroby byla jen jedna věc a ne ta důležitá, vypadá to, že hlavním důvodem vynikajících vlastností byl původ rudy, která v Evropě byla nedostupná. [11, 12]



Obr. č. 3 Obchodní cesta po Volze, mapa také ukazuje místa nálezů nejkvalitnějších verzí meče Ulfberht. [10]

Ocel se nenazývá kelímková pro nic za nic. Přídomek pochází od samotného způsobu výroby. Tato malá keramická nádoba byla naplněna rozdrčenými kousky železa a byl přidán uhlík ve formě dřevěného uhlí. Jen malé procento, zde totiž uhlí sloužilo pouze jako zdroj uhlíku nikoliv jako palivo. Tyglík byl poté zapečetěn víčkem a zalepen jílovou keramickou směsí, aby se zajistilo, že z okolí pece se do nádoby nedostanou žádné další příměsi. Jako zdroj železa mohla být použita i litina. Takto upravený tyglík byl potom vložen do pece a zahříván na teplotu 1 300 až 1 400°C, dokud obsah nádoby nevstřebal dostatek uhlíku, aby se zcela, nebo z velké části, roztavil. Tyglík, i jeho obsah, se poté nechal pomalu přirozeně zchladit. Vzniklé ingoty byly poté připraveny ke zpracování za nízkých teplot a stávaly se z nich čepele mečů. Tyglíková ocel obsahuje velké procento uhlíku, až 1,2% a v některých případech i 1,6%, a označuje se jako hypereutektoidní ocel. V pozdější době byly ingoty ochlazovány velice pomalu, to mělo za následek výskyt velkých krystalů cementitu v oceli. Díky tomu mohl na povrchu čepele, po patřičném naleptání, vzniknout efekt tzn. „vlhkého hedvábí“ označovaného taky jako *wootz* nebo pravá damascéská ocel. [2]

2.2.4. Problematika tavby v tyglíku

Hlavní problém tyglíku nastával ve chvíli, kdy docházelo k samotnému tání oceli. Ocel s obsahem uhlíku okolo 1 až 2% totiž nemá ostrý a jednotný bod tání, spíše taje někde

v rozmezí 1 200-1 400°C. Vytvořený ingot mohl vykazovat heterogenní strukturu. Samozřejmě, mohlo trvat několik století, než bylo dosaženo homogenního ingotu a než byli mistři schopni vytvořit zbraň, která nesla známky *wootz* na vyleptaném povrchu.

Tak či onak i nedokonalá ocel z tyglíku byla nakonec v té době řádově lepší než jakýkoliv jiný železný materiál.

3. Postup výroby

V této kapitole se budu věnovat postupu výroby obou mečů. Shrnu, jestli jsou si meče v něčem postupem výroby podobné a kde se naopak jejich výrobní postupy velice liší. Oba tyto kusy mají velmi specifický a zdoluhavý postup výroby. V počáteční fázi zmíním základní postupy výroby a poté se zaměřím na odlišnosti, které jsou v literatuře, ze které jsem čerpal.

3.1. Základní postup výroby překládané damaškové oceli

Jako první věc je potřeba zmínit jak vlastně damašková ocel vzniká. Základem je, že ocel je zahřáta na poměrně vysokou teplotu, kolem 1 200 - 1 300°C, kdy dochází k natavení svrchní vrstvy materiálu a to umožní kovářské svaření obou ploch a vytvoří se pevně spojený kus. Postupným překládáním již dříve přeloženého materiálu se vrstvy násobí a jejich počet se exponenciálně zvedá. Vytvořený materiál má velice jemnou mikrostrukturu s protáhlými zrny. Další výhodou je, že dojde k silnému protváření materiálu a k vytlačení případných nežádoucích příměsí, navíc je zajištěna velmi vysoká homogenita materiálu. Překládaná ocel je rozdělena na dva základní typy.

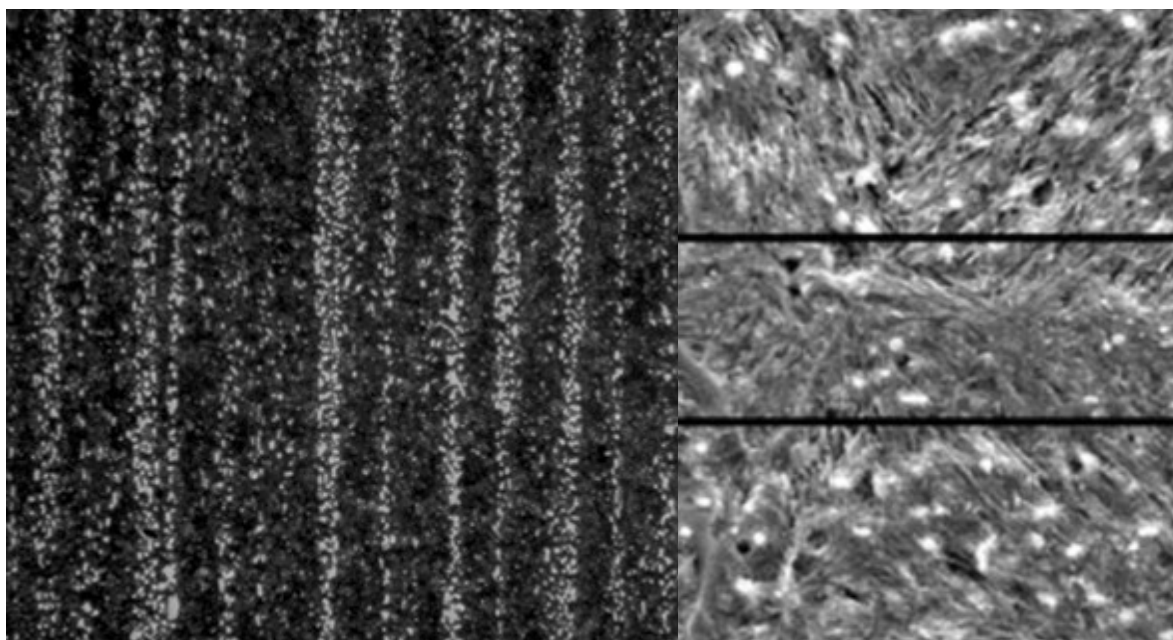
3.1.1. Pravý damašek neboli *wootz*

Damašek vzniklý překládáním a svařováním stejného materiálu, materiálu z jednoho kusu, je označován jako damašek pravý, případně pravá damascénská či svářková ocel. Postupu pro vytvoření pravého damašku je využito povětšinou, když je zapotřebí ocelový polotovar zušlechtit, snížit jeho heterogenitu a zbavit se nežádoucích nekovových vměstků. Využije se tedy pro zušlechtění materiálu, který nedávno opustil tavicí pec a čeká ho ještě dlouhý čas, jež stráví pod kovářskými kladivy. Materiál je vykován do desek a svařen ve výhni, následně je podélně a napříč přeložen a opětovně svařen. Tím dochází k čištění. Proces je opakován tak dlouho, dokud materiál nemá dostatečnou nebo požadovanou čistotu.

Na **obrázku č. 4** je možno vidět *wootz* vzor na povrchu čepele nože stejně jako vzor zvaný „Mohamedův žebřík“, ten představují svislé čáry, a vzor růží což jsou kulaté body mezi jednotlivými svislými čarami. Na **obrázku č. 5** vlevo, je pak patrná mikrostruktura *wootz* s podélnými řadami cementitu, bílé tečky, zodpovědné za povrchový vzor, vpravo můžeme vidět mikrostrukturu 2000 krát zvětšenou, kde jsou viditelné jednotlivé krystaly martenzitu také s bílými tečkami cementitu, dvě černé čáry vyznačují karbidické spojení.



Obr. č. 4 Rekonstrukce nože s wootz čepelí. [18]



Obr. č. 5 Mikrostruktura wootz oceli. [18]

3.1.2. Nepravý damašek

Druhým typem damaškové oceli je tzn. nepravá damascénská ocel. Taková ocel je vyrobena překládáním rozličného typu oceli, většinou se používají dva typy oceli; s nízkým a s vysokým obsahem uhlíku. Zde je také potřeba si uvědomit jestli je potřebný výsledek estetický nebo technologický. Jinými slovy, můžeme překládat dva typy oceli stále dokola jen proto, aby nám vznikla esteticky pěkná kresba na povrchu čepel po jejím naleptání. Pokud kovář požaduje technologické výhody nepravého damašku, pak to znamená, že břit zbraně je z tvrdého materiálu a ten je navařený na měkké vnitřní jádro. Díky tomuto je získána zbraň, která drží ostří velice dobře a zároveň nabyde vlastnosti měkké oceli a pro to je pružná a snadno se nezlomí, což se využívá u zbraní s dlouhou čepelí. Další výhodou, je zajištění kvality drahého materiálu při čemž zbytek zbraně, kde není zapotřebí, je doplněn materiálem levnějším, takový to postup se využívá například u seker nebo u hrotů šípů. [14]

Kresbu na čepeli udává rozdíl v tvrdosti materiálů, ale nemusí se vždy jednat o ocel. Kresba mohla po naleptání vzniknout díky tomu, že byla naleptána struska při špatně vyčištěném a nedokonalém sváru. Takových to výsledků dosahovali méně zruční a méně kvalifikovaní kováři, pro které byl výsledek na povrchu meče přednější než kvalitní zbraň jako taková. Navíc ne všechny kovářské dílny dosahovaly kvalit potřebných pro výrobu překládané oceli. Další metodou byla kombinace čistého železa společně s ocelí, což dalo za výsledek také estetickou kresbu. Navíc ne vždy kresba na povrchu prozrazovala, že čepel zbraně je celá zhotovena z překládané oceli. Lze se setkat s tím, že povrchová vrstva byla pro efekt z překládané oceli, přičemž vnitřní jádro bylo tvořeno ocelí nepřekládanou. Takovéto počínání mělo opět za účel navýšit cenu, že meč svého majitel poté v boji zradil, byla věc druhá. [7]

3.2. Postup výroby japonské katany

Katana byla ve většině případů konstruována z více typů oceli o různém obsahu uhlíku. Byly zde samozřejmě i čepel z jednoho druhu překládané oceli pouze se zakaleným břitem. Dále se vyskytovaly meče z jednoho druhu oceli, která nebyla ani překládaná, to byl případ levných masově vyráběných mečů v době, kdy už nesloužili jako hlavní zbraň bojovníka, ale pouze jako dekorace. Nepřekládané meče, společně s levnější variantou překládaných mečů, se objevovaly i dříve jako levná a relativně jednoduše opatřitelná varianta.

3.2.1. Konstrukce čepelí

Je nutno zmínit, že ne všechny zbraně byly z kompozitu tvrdé a měkké oceli. Kupříkladu kratší verze katany, *wakizashi* nebo *tanto*, byly dost krátké na to, aby vydržely zátěž v boji a proto v mnohých případech nebyly opatřeny jádry z měkkí oceli. V podstatě jakákoli kratší čepel mohla být vyrobena z jednoho druhu oceli, povětšinou *kawagane*, pokud čepel dosahovala délky do cirká 60 cm.

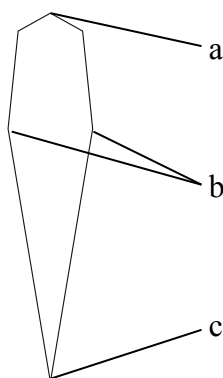
V předešlé kapitole (viz 2. kapitola) byl zmíněn postup výroby polotovarů. Měkký polotovar s názvem *shigane* a tvrdý polotovar označen jako *kawagane*. Oba typy byly upraveny postupnými překládacími procesy, aby vznikl jednotný čistý materiál. I když v Japonsku se toto označení nepoužívá, jednalo se o pravý damašek jinými slovy *wootz*. Jak se zpracování oceli v Japonsku vyvíjelo, byli kováři do svého repertoáru schopni přidat další

typ vysokouhlíkaté oceli, oceli která měl vyšší obsah uhlíku než *kawagane*, taková ocel byla označena jako *hagane*. Tato ocel byla vyráběna stejným procesem jako *kawagane*. Přidáním dalšího typu oceli tak mečířům umožnilo další kombinování tvrdé a měkké oceli. [9]

Konstrukce čepelí začínala vykováním polotovarů do určených tvarů, následně byly složeny dohromady a kovářsky svařeny. Dále jsou uvedeny různé typy kombinací ocelí o různé tvrdosti.

3.2.1.1. Čepele z jednoho typu oceli

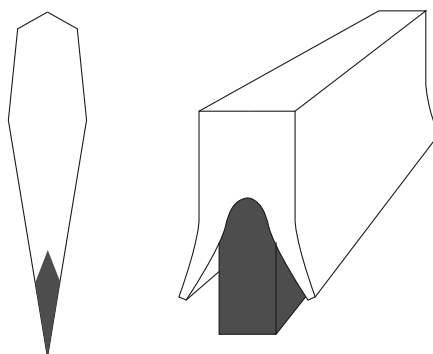
Tento typ konstrukce je nejlevnější, nejjednodušeji vyrobitelný. Vyráběl se masově jako parádní důstojnické meče v nejpozdějších dobách. Také se tento typ používá dnes pro výrobu levných náhražek samurajských mečů. Zde nelze přesně určit, jaký typ oceli je použit, ale lze předpokládat, že je použita měkká ocel *shigane*, meče by se jinak při první příležitosti lehce lámaly. Jedno typová konstrukce se také používá pro výrobu kratších čepelí, kde bylo možné použití tvrdší oceli *kawagane*. Na **obrázku č. 6** je průřez čepelí.



Obr. č. 6 Řez čepelí z jednoho kusu; a – hřbet, b – postranní žebra, c - ostří

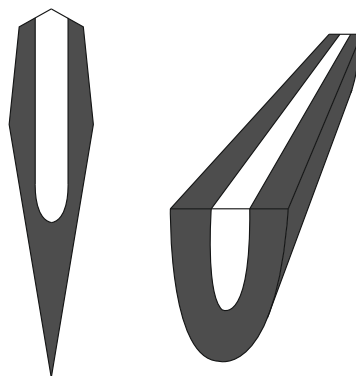
3.2.1.2. Čepele ze dvou druhů oceli

Ze dvou druhů ocelí, tedy z *kawagane* a *shigane* byl vytvořen největší podíl čepelí vůbec, je to ideální kombinace pružnosti a pevnosti. Čepel dobře drží ostří a je relativně jednoduchá na výrobu. I zde se konstrukce lišila. Nejjednodušší bylo vložit kus tvrdé oceli do místa, kde bude mít budoucí meč břít, výsledek je označován jako *Wariha tetsu* a jeho průřez a výchozí polotovar je na **obrázku č. 7**.



Obr. č. 7 Čepel s vloženým břitem *Wariha tetsu*

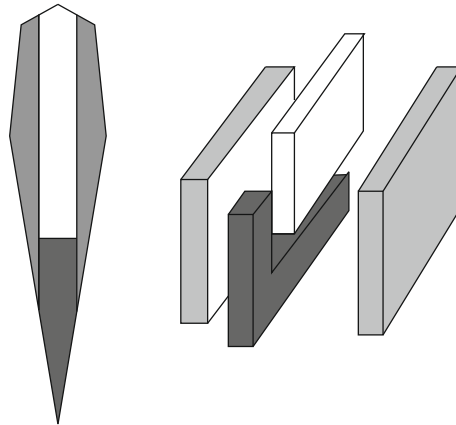
Další možností bylo vložit jádro z měkké *shigane* do tvrdého pláště z *kawagane* jak lze vidět na **obrázku č. 8**. Kombinace se nazývá *kobuse*. [9]



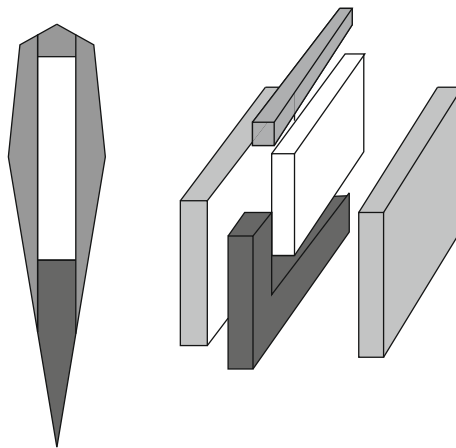
Obr. č. 8 Čepel s vloženým měkkým jádrem

3.2.1.3. Čepele ze tří typů oceli

Vrcholem mezi skládanými čepeli byla kombinace tří druhů ocelí s různým obsahem uhlíku. Bylo dosaženo maximální pružnosti, protože hranice mezi tvrdou a měkkou ocelí nebyla tak výrazná. Ostří je tvořeno vysoce tvrdou ocelí *hagane* vyvinutou právě pro ostří meče, který se neztupí ani opakovaným používáním. Boky meče jsou tvořeny plášťovou ocelí *kawagane* a vnitřní měkké jádro je z *shigane*. Složení a řez takovou čepelí je zobrazen na **obrázku č. 9** a na **obrázku č. 10** je možno vidět přidání plášťové oceli i na hřbet zbraně.



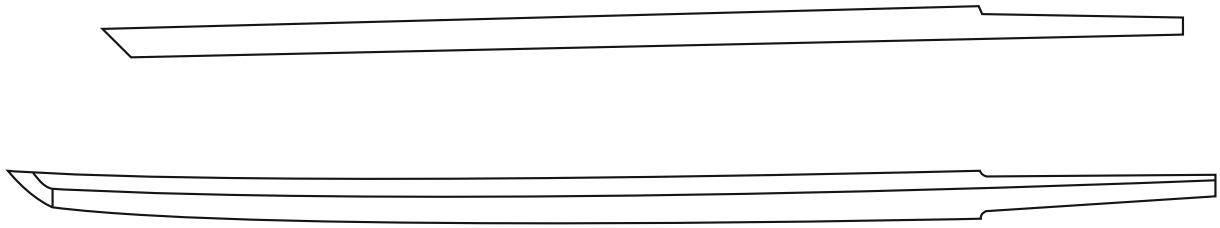
Obr. č. 9 Čepel ze tří druhů oceli



Obr. č. 10 Čepel ze tří druhů ocelí s přidaným tvrdým hřbetem

3.2.2. Vykování a hrubá úprava tvaru i povrchu

Kovářsky svařená kostka materiálu, která se již chovala jako jednotný kus, byla nejdříve pomocí velkých kladiv upravena na kratší tyč s obdélníkovým průřezem. Do této chvíle pracoval kovář za pomoci svých učňů. Mistr kovář následně, již sám, vykoval čepel do polotovaru, který zhruba připomínal čepel meče, ale stále měl obdélníkový průřez. Mistr musel pracovat rychle, jelikož materiál ohřátý na přibližně 1 100°C rychle chladl. Po vykování polotovaru následovalo kování finálního tvaru. Kovář zkosil ostří meče, ale zanechal břit tupý a asi 2 ž 3 mm tlustý, aby se nerozpadl při kalení. Dále vytvaroval hřbet a meč prodloužil na finální délku. Díky kování ostří meč získal lehce zakřivený tvar. Polotovar a finální tvar je znázorněn na **obrázku č. 11**.



Obr. č. 11 Polotovar čepele a finální tvar

Japonští kováři při kování svých mečů používali speciální techniku označovanou jako vlhké kování, při tomto procesu se kovací plocha polila vodou a je na ni položen rozžhavený materiál, který se začal kovat. Údery kladiva způsobují rychlé až explosivní odpaření vody pod kovaným materiálem. Díky tomuto procesu jsou šupiny okují okamžitě odstraňovány a v povrchu materiálu tak nevytvářejí otlaky. Vzniká mnohem hladší povrch, než kdyby tato metoda nebyla použita. Nevýhodou ovšem je, že kovaný polotovar rychleji chladne. Posledním krokem než byla čepel připravena na finální fázi, bylo hrubé přebroušení čepele pomocí nožového nástroje, připomínající pořez na úpravu dřeva, a ocelových pilníků případně hrubých brousících kamenů. Když byl povrch čepel zbaven největších otlaků a vad, byl připraven k poslední fázi a to ke kalení.

3.2.3. Závěrečná tepelná úprava a tvorba linie *hamon*

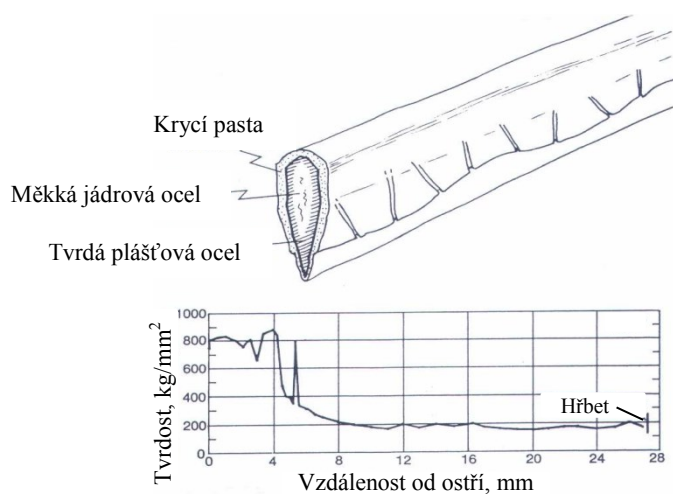
Příprava materiálu, kompozice různě tvrdých materiálů, překládání, kování, to vše jsou velice důležité operace během výroby kvalitní katany, ale to co meči dává jeho hlavní výjimečnost, co mu přidává na ceně, co mu, jak japonští mistři říkají, dává duši je poslední tepelná úprava, kalení. Kalení je nejnáročnější proces z celé výroby, udává základní kvality výrobku a i malá chyba může celý produkt zcela znehodnotit. [4]

Základním rozdílem v kalení, které bylo známo v Evropě, a kalením, jež používali japonští mistři, byla krycí pasta. V Evropě byl klasický postup, meč zahřát na cirká 700 až 900°C, záleželo na typu oceli, a ponořit do vody o pokojové teplotě hrotem napřed svisle dolů. Následkem bylo zaklení na vysokou tvrdost u hrotu, která se pak snižovala směrem k zásti. Takový to postup neumožňoval kalením na vysokou tvrdost, protože by celý meč byl následně příliš křehký. V dřívějších dobách byly takto vyráběny i japonské meče, ale velice brzo se od toho upustilo.

Hlavním cílem japonským kovářů bylo dosáhnout nestejnomyerného zaklení, kdy mělo být ostří velice tvrdé, což by umožnilo vysokou ostrost. Na druhou stranu bylo potřeba,

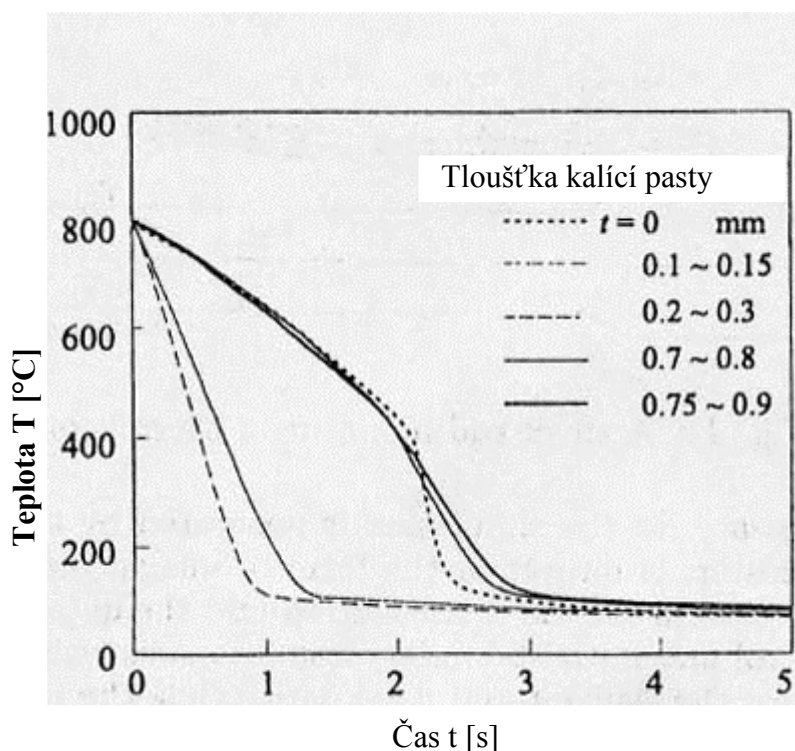
aby žebro meče bylo zakaleno co nejméně a uchovalo si svůj podíl pružnosti a houževnatosti. Proto přišli Japonci s inovací, na povrch čepele začali nanášet speciální pastu, která umožňovala nestejnorodé zakalení. Pasta také chránila čepel meče před nepříznivými vlivy, které panovaly ve výhni, stejně jako ji chránila před bublinkami vodní páry ve chvíli, kdy byl meč ponořen do vody. Tato pasta byla tajemstvím každé školy a tak není žádný přesný recept k dispozici. Základní složky jsou však známy. Jednalo se kombinaci jílu, bentonitu což je hornina vznikající zvětráváním mateční horniny z čediče, je charakteristická vysokým obsahem jílových minerálů, křemičitého písku a dřevěného uhlí. Každá složka byla namleta na co nejjemnější prach a smíchaná s vodou. Poměr složek je sice tajemstvím, ale nejjednodušší poměr 1:1:1 vypadá jako přijatelná možnost. Stejně jako poměr vody, který ovlivňoval to, jakou konzistenci bude mít výsledná pasta. [4]

Mistr meč upevnil do speciálního stojanu, pod ním měl desku, na které si namíchal pastu a nyní mohl pohodlně nanášet. Čepele meče se nesměl dotknout, protože by zhoršil přílnavé vlastnosti povrchu. Nanášení pasty prováděl v několika krocích pomocí dřevěných nebo ocelových špachtlí. Prvním krokem bylo vytvoření tenké vrstvy, cca 0,2 až 0,5 mm, tato vrstva sloužila jako ochrana pro ostří meče, kde mělo být zakalení nejmarkantnější. Po zaschnutí byla nanášena tlustší vrstva, až 1 mm, na boční strany a na hřbet. Mistr poté nanášel další vrstvu, která přecházela přes hranici tlusté a tenké vrstvy. Tuto vrstvu také vytvaroval tak, aby po zakalení způsobila esteticky pěknou linii známou jako *habuchi*, která ohraničovala zakalenou plochu označenou jako *hamon*. Pokud chtěl, mohl ještě pomocí hrany špachtle přidat kolmé čáry napříč přes celou plochu čepele. Ty způsobily ostřejší linie výsledného *hamonu*. Na **obrázku č. 12** lze vidět část čepele pokryté pastou a změny v tvrdosti.



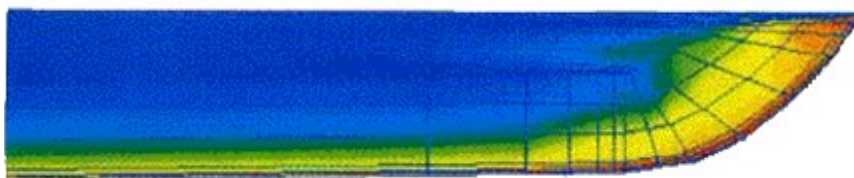
Obr. č. 12 Krycí pasta, nahore, a změny v tvrdosti podle místa a tloušťky vrstvy krycí pasty dole. [19]

Na dalším obrázku, na **obrázku č. 13**, lze vidět rychlost ochlazování, kde jednotlivé křivky odpovídají různé šířce kalící pasty.

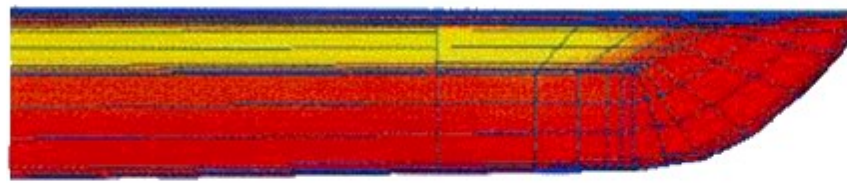


Obr. č. 13 Rozdíl v rychlosti zchlazení [20]

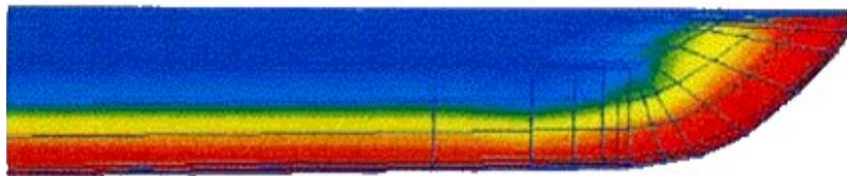
Další informace nám poskytne simulace zakalení za několik odlišných podmínek. Na **obrázku č. 14** lze tedy vidět rozdíl ve vytvořeném napětí v čepeli při kalení. Horní část obrázku (a) je čepel s tlustou vrstvou, kde dochází k malé tvorbě napětí. Na části prostřední (b) lze vidět rozložení napětí při použití tenké vrstvy kalící pasty. Na spodní části obrázku (c) je vidět napětí v zakalené čepeli při kombinaci tenké vrstvy pasty na ostří a tlusté vrstvy na žebra a hřbet.



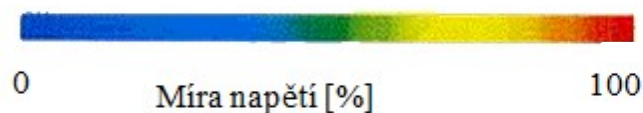
a – tlustá vrstva pasty



b – tenká vrstva pasty

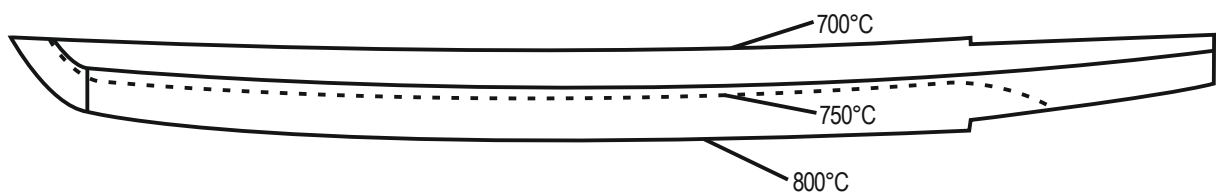


c – tenká vrstva pasty na ostří a tlustá na bočním žeburu a hřbetu



Obr. č. 14 Simulace kalícího procesu [20]

Hamon je tedy část meče, která byla vytvrzena kalením a tedy jedná se o martenzitickou strukturu. Hřbet od bočních žebber je poté tvořen kombinací perlitu a feritu. Ostrost linie *habuchi* určoval obsah uhlíku v daném materiálu, tedy čím vyšší byl, tím byla linie ostřejší a užší. Takováto úprava zajišťovala dobré ostří, ale to mohlo být jako takové náchylné k vylamování zubů. Když ale mistr vylepšil čepel, svislými čarami napříč čepelí, bylo v zakalené části umožněno regionální vznikání perlitu, protože místa zakryté takovými to čarami byla ochlazována pomaleji. Tím se zabránilo vylamování větších zubů při používání, stejně jako se zvýšily šance na dobré zakalení a zmenšila se pravděpodobnost zlomení čepel při samotném kalení. Na **obrázku č. 15** je zamýšlený rozdíl teplot při kalení. [9]

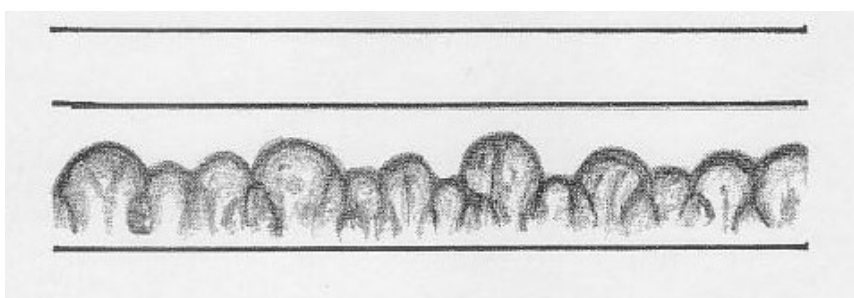


Obr. č. 15 Zamýšlené kalící teploty

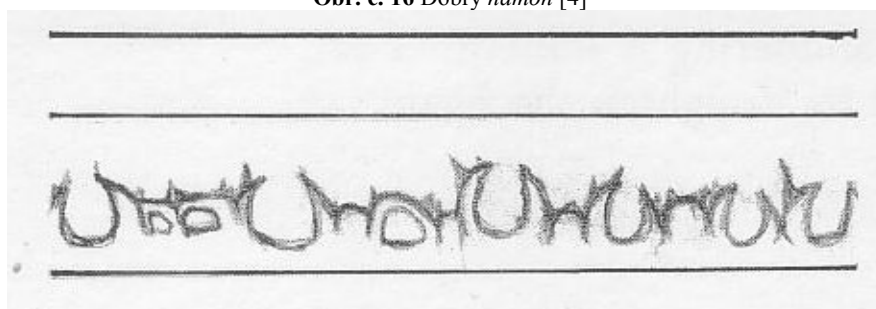
Ve chvíli kdy je čepel pokryta pastou, která se nechá dobře vyschnout, je možno přejít k samotnému zakalení. Mistr pohybuje mečem ve výhni dopředu a dozadu dokud nezajistí rovnoměrné nahřátí celé čepele. Následně čepel vytáhne z výhně a ponoří do vodní lázně. Meč se do vody vkládá podélně s hladinou a ostřím napřed. V tuto chvíli je čepeli dáno její charakteristické zakřivení. Oblast ostří je zchlazena nejrychleji a stáhne se, přičemž ohne čepel ve směru ostří. Pomalu chladnoucí hřbet poté pomalým stahování ohne čepel na správnou stranu. Pokud byla teplotní roztažnost hřbetu meče příliš velká a pružné vlastnosti ostří příliš malé, meč se buď zcela zlomí, nebo dojde k vytvoření malých trhlinek v ostří.

Následná poslední tepelná úprava je popouštění. Kdy mistr nahřeje čepel již na nižší teplotu, mezi 150 až 200°C, a znova ji vloží do lázně. Popouštění zbaví čepel velké části vnitřního pnutí, vzniklého při kalení, ale zanechá meči tvrdost popouštěného martensitu vzniklého při tomto procesu.

Čepel je poté zbavena jílové vrstvy a nahrubo přebroušena, v této fázi se mistr pohledem na čepel přesvědčí, jestli je zakalení v pořádku a *hamon* odpovídající. Pokud ano přejde k další části úpravy, pokud ne je čepel vyžihána a mistr se může pokusit o její zakalení znovu. Dobrý *hamon* je dobře tvarovaný a je ohraničen jednotnou linií naopak špatný *hamon* se vyznačuje nejednotnou linií nebo nerozeznatelným vzorem. Dobrý *hamon* na **obrázku č. 16** a špatný *hamon* je znázorněn na **obrázku č. 17**.



Obr. č. 16 Dobrý *hamon* [4]



Obr. č. 17 Špatný *hamon* [4]

3.2.4. Úprava tvaru a zakřivení

Kalící proces může způsobit změnu zakřivení až o několik centimetrů. Pokud je zakřivení příliš velké, mistr ho může zmenšit pomocí několika metod. Buď je možno za studena roztáhnout plochu mezi hřbetem a bočním žebrem meče a tím srovnat zakřivení nebo může meč nahřát, v oblasti hřbetu, rozžhaveným kusem mědi, čímž se také uvolní trocha napětí a meč se trochu narovná. Zakalení také mohlo způsobit vyhnutí čepele do strany, takováto chyba je srovnána malým kladivem za studena na kovací ploše jednoduchým vyklepáním do opačného směru. [4]

3.2.5. Broušení a leštění

Ve chvíli, kdy je kovář spokojen s výslednou úpravou čepele, předá ji do rukou brusiče. Nyní nastává nejdlejší fáze ve výrobě japonského meče. Brusič začne na kameni s relativně vysokou hrubostí a postupně používá stále jemnější kameny. Kameny se před broušícím procesem nechávají namočené ve vodě, aby část vlhkosti samy nasály. Tento krok se prováděl po celé ploše čepele, tedy nejen na ostří ale také na bočních žebrech stejně jako se vybrousil hřbet zbraně.

Poté co byl meč hrubě obroušen, mohl brusič předat čepel svému učni, aby do ní vyřezal žlábký po bocích vrchní části čepele, tedy nad bočním žebrem. Toto byl dekorativní krok, který navíc ubíral výslednému meči na váze. Výsledek samotné úpravy se označuje jako *hi* a může zabrat až dva dny.

Kromě vyřezání žlábků, mohl být meč ozdoben rytinami. Ty mohly nabírat mnoho tvarů, ale nejčastěji se používaly domácí prvky, tzn. bambus, květy třešní, znak meče anebo draci. Případně se mohly použít znaky připomínající božstva stejně jako znaky ze Sanskritu nebo Buddhistské motivy, které měly vyjevovat náklonost k originálnímu japonskému náboženství. Tato práce, která byla také časově náročná a musel ji provádět zručný a zkušený specialista, vyústila v dekorativní design s názvem *horimino*.

Ještě než je čepel předána k leštění, je její stopka hrubě přebroušena pomocí hrubého pilníku, což vytvoří charakteristické drážky, kovář do stopky navíc vyryje jméno své nebo jméno rodinného podniku.

Leštění je prováděno na kamenech s mnohem menší hrubostí, než byly kameny pro broušení. Kameny se také postupně zjemňují, až dojde na kameny s hrubostí kolem 1 500 grit

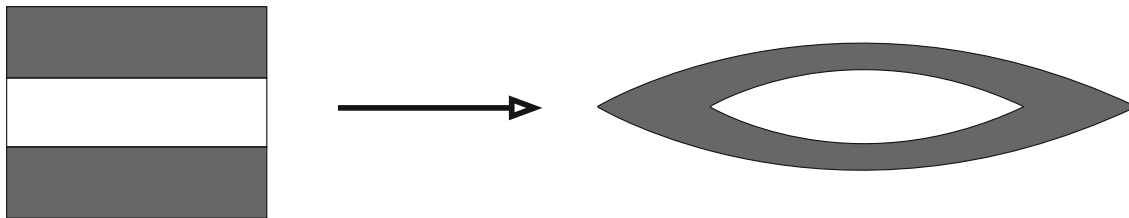
a většinou se jedná o mramor. Při posledním kroku jsou použity malé tenké plátky brusného kamene, kterými pohybuje po čepeli a leští ji.

3.3. Teoretický rozbor výroby meče +ULFBERH+T

Je nutno si uvědomit, že ne všechny meče Ulfberht byly vytvořeny pomocí překládané oceli a pomocí kompozice materiálů o různém procentu uhlíku. Některé zdroje [2, 8, 13, 15, 17] uvádí, že byl vytvořen pouze z části dovozového ingotu z tyglíkové oceli (*wootz*). Další tvrdí, že byl vytvořen pomocí kombinace *wootz* na ostří a běžně dostupné místní oceli na měkké vnitřní jádro. Pro začátek bych tedy shrnul postupy pro výroby kompozitních mečů.

3.3.1. Různorodé konstrukce historických evropských mečů

Zde existovalo mnoho konstrukcí čepelí, od jednoduchých mečů z jednoho kusu homogenní oceli nebo železa. Dalším druhem byly kompozitní meče, kdy se kovář nesnažil o estetický výsledek, v takovou chvíli mohl použít kombinaci oceli na plášť meče a měkkou ocel s nízkým obsahem uhlíku nebo železo na jádro meče, který je znázorněn na **obrázku č. 18**. Posledním používaným typem byl vzorovaný damašek.



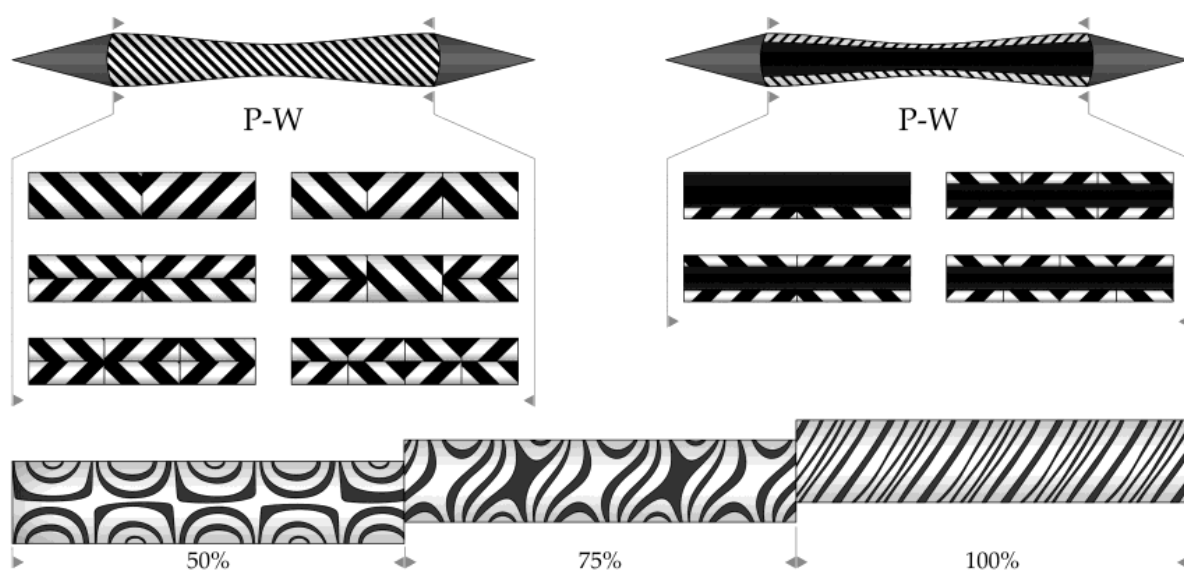
Obr. č. 18 Čepel s tvrdým pláštěm a měkkým jádrem

Kompozity ze vzorovaného damašku se v Evropě vyskytovaly již od doby Laténské, tzn. od 5. století př. n. l. do přelomu letopočtu, kdy označení 'vzorovaná svárková ocel' bylo používáno pro kombinaci fosforečného železa a oceli. Takováto kombinace vytvářela pěknou a ostrou kresbu. Druhá věc je, jestli takováto metoda měla nějaký efekt na praktické použití anebo se jednalo jen o estetický efekt. [7, 6]

Samotný vzorovaný damašek je tedy typ nepravého damašku, kdy se dva materiály navrství a kovářsky svaří. Následně jsou prodlužovány kováním do tyčí s čtvercovým průřezem, které jsou zkrouceny, uloženy na sebe a opět kovářsky svařeny. Tímto postupem mohl kovář docílit několika efektů. Samozřejmě bylo možno použít pouze jednu tyč, která se zkroutila a nakonec se z ní vykovala čepel, takovýto postup se ale používal velice málo a je

hodně oblíbený spíše v dnešní době. Jednu věc měly však všechny dřívější čepel stejnou, jednalo se o to, že na jádro vzorovaného damašku byly navařené homogenní břity.

Jedním možným postupem bylo navařování tyčí přímo na sebe. Kdy se tyče zkroutily a navařily na sebe a tím se vytvořilo vzorované jádro meče. Zde se mohlo použít několik metod navaření zkroucených, nebo případně nezkroucených tyčí, jak je vidět na **obrázku č. 19**, kde se jedná o nejběžnější kombinace kroucených tyčí. Na druhou stranu se mohla použít metoda, kdy se kroucené tyče navařily na měkké vnitřní jádro, které bylo homogenní. V tomto případě hraje damašek roli jako povrchová úprava, případně jako jakési zdobení, než aby mělo praktický účel. Příklady této konstrukce jsou také viditelné na **obrázku č. 19**.



Obr. č. 19 Průřezy čepelí ze vzorovaného damašku; vlevo damašek bez jádra, vpravo damašek s přidaným měkkým jádrem. Pod průřezy výsledný efekt na povrchu čepel při použití zkroucených tyčí. Zcela ve spodní části obrázku výsledné efekty na povrchu čepel. [7]

Je nutno si uvědomit, že většina z těchto mečů nebyla vyrobena z materiálu příliš vysoké kvality a tedy sloužily spíše jako znak moci a prosperity nežli jako nástroj pro boj. Otázkou zůstává, jestli takto vytvořené meče byly efektivní i za podmínek kdy na ně byly použity kvalitní původní materiály. Ukazuje se, že pokud je damašek, tedy postup pro výrobu damašku, použit jen jako estetický prvek má spíše negativní než pozitivní efekty. Je sice pravda, že dojde k většímu protváření a že spojíme kvality dvou typů materiálu, ale pokud původní materiál není dosti kvalitní, je takováto práce zbytečná.

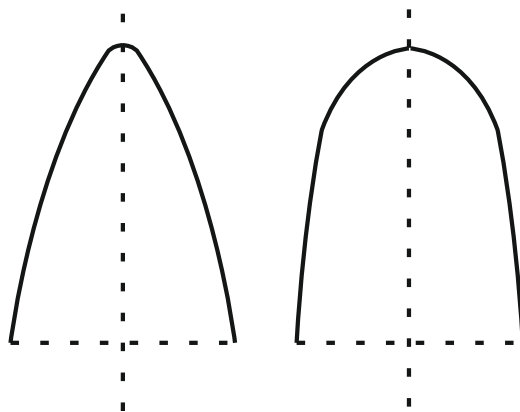
3.3.2. Vikingské meče

Výroba vikingského meče není tak složitá jako je výroba katany. Pokud se podíváme na meče z jednoho typu oceli, stačilo daný již předpřipravený ingot vykovat do pásu oceli. Následně se meč prodloužil a vykoval se hrot. Zajímavostí u těchto mečů je žlábek. Tento známý prvek u pozdějších mečů je zde proto, aby udržoval celistvost meče, i když se někdy v ne odborných literaturách nazývá krevním žlábkem. Meče s vykováním žlábkem mohou být delší a přesto stejně pružné jako meče kratší. Meči bylo dále vykováno ostří po obou stranách. Následovalo kalení. Kalení v těchto případech byla rychlá a relativně jednoduchá záležitost, meč se zahřál na cca 800°C a hrotem napřed, se zanořil do vody. Po kalení tak vznikla čepel, která byla u hrotu velice tvrdá, ale její tvrdost se snižovala směrem k rukojeti. Posledním krokem bylo jednoduché popuštění. [2]

Ulfberht byl mečem vikingským až velkomoravským, vyráběl se v rozmezí 8. až 10. století. Bylo jich nalezeno cca 100 exemplářů, z toho se jen asi 40 vyznačovalo kvalitou, která překračovala tehdejší možnosti. Základem je rozlišit dva základní typy nálezů meče ulfberht. Prvním typem, tím nejrozšířenějším a nejkvalitnějším byl meč psán jako +ULFBERHT+, dále jako typ A. Tento meč se skládal jen z dovozového typu oceli, který na tehdejší poměry neměl obdoby. Druhým nejčastějším typem byla čepel značená +ULFBERHT+, dále jako typ B, takovýto meč byl kvalitní a relativně nadčasový, ale stále postrádal kvalit pravého vikingského ulfberhtu. Meč typu B byl tvořen, ve většině případů, měkkým vnitřním jádrem, na které byla navařena ostří z tvrdé oceli. Materiál na celý meč nebyl tedy dostupný v žádané kvalitě. Materiál nepocházel z tyglíku, ale byl nejspíše důsledkem dlouhého zpracovávání houbovitě oceli, a tak se pořád vyznačoval nízkým procentem uhlíku, právě v množství uhlíku tkví celá výjimečnost meče ulfberht. Čepel takového meče byla na tehdejší poměry neskutečně tvrdá a velice pružná, v boji tedy svého nositele nezklamala. Zbytek nálezů, kdy bylo jméno ulfberht zkomoleno, většinou byly meče velice nízké kvality, kdy materiál, ze kterého byly vyrobeny připomínaly spíše nekvalitní železnou houbu s velkým množstvím vad, vměstků a podobně. Je pravda, že i takovéto meče byly po dobré tepelné úpravě použitelné, ale ani zdaleka nedosahovaly kvalit typu A a B.

Typ A se také lišil jednou základní, ale důležitou technologickou výhodou, to byl špičatější hrot. Klasické vikingské meče měly tradičně oblé hroty, bylo způsobeno nekvalitním materiálem, který jinou možnost nedával. Navíc klasické meče této éry jsou spíše používány k sekání. Tehdejší prošívané kabátce a kroužkové zbroje dobře chránily před

sečnými ranami, ale proti bodání byly pramálo účinné. Meč typu A měl výhodu v tom, že se špičatějším hrotem mohl projít takovým válečným oděním s lehkostí a tak způsobit rozsáhlejší, většinou smrtelné, zranění. Na obrázku č. 20 je znázorněn rozdíl mezi dvěma typy zmíněných hrotů.



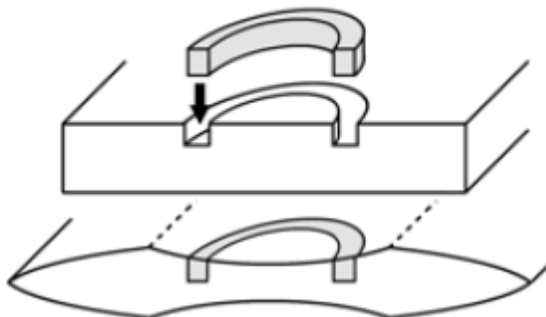
Obr. č. 20 Typy hrotů

Z nálezů tedy vyplývá, že typ A byl zcela vyroben pouze z tyglíkové dovozové oceli. Zde se i nálezy jednotlivých zbraní odlišují. Je zde patrné, že několik jich bylo vykováno přímo z dovezeného ingotu, další naznačují práci s ingotem, jeho několikeré přeložení a až poté vytažení čepele. Dokonce lze vidět i nadměrné zpracování za tepla, které vedlo k oduhlčení a lehkému znehodnocení původního materiálu. Je tedy možné, že ingoty tyglíkové oceli byly do Evropy přiváženy jak přímo z pecí tak i po určitém zpracování v místech kde byly vyrobeny.[11]

Je možné, že meče typu B mohly vznikat i v originálních kovárnách, kde ale nebyl dostatek materiálu na celý meč, tak byl lepší materiál použit jen na břity meče, nebo na vnější plášť, a vnitřní jádro pak bylo tvořeno místním méně kvalitním, ale dostupným, materiálem. A proto kováři takovýto kousek odlišili od své standartní výroby, použili i jiné označení než tomu bylo u originálu.

Samotné značení na těchto mečích je také zajímavý kus práce. Kovář nejdříve pomocí malých dlát, určených pro práci s kovem, vyryl do povrchu meče asi 1 až 1,5 milimetrové zářezy. Poté z vykované železné tyče vytvaroval písmena a vložil je do vytvořených zářezů, čepel byla následně zahřata a pomocí kladiva byl nápis navařen na tělo čepele. Postup pro vkládání písmen je znázorněn na obrázku č. 21. Používalo se železo nebo ocel s velice nízkým obsahem uhlíku, aby byl nápis po naleptání dobře viditelný. Taková úprava mohla narušit integritu čepele, pokud ale nezasahovala příliš hluboko do těla čepele, stejně jako

pokud byl materiál dostatečně pevný, mohlo být i takovéto narušení zanedbatelné. Navíc nebyl nalezen meč typu A, který by se zlomil právě v místě, kde bylo vsazeno písmeno do čepel, jednalo se tedy spíše o povrchovou úpravu.



Obr. č. 21 Vkládání písmene do těla čepel meče [17]

Následně po zakalení a popuštění byl meč broušen. Broušení bylo ze začátku prováděno na velkých brusných kamenech, které byly poháněny vodním kolem. Případně u dražších kusu mohlo být prováděno ručně. Jemnější broušení se poté ve všech případech provádělo ručně, většinou tak že si brusič upevnil meč do držáku a pomocí brusného kamene jej brousil a následně leštil.

3.3.3. Meče Indie a středního východu

Kováři v Indii postupovali jinak. Zde se vůbec nepoužíval damašek nepravý tedy damašek kompozitní. Celá výroba chladných zbraní se zakládala na tyglíkové oceli. Tento kvalitní unifikovaný zdroj byl pro výrobu kvalitních zbraní nezbytný. V Evropě se výrobci snažili napodobit vzhled indické *wootz* oceli pomocí nepravého damašku.

Indičtí kováři používali tyglíkovou ocel, kterou následně překovávali, překládali a vytvářeli tak nezaměnitelně kvalitní materiál. Z toho materiálu poté vznikaly mistrovské kousky chladných zbraní. Kování takovéto oceli bylo prováděno při nižší teplotě, protože obsah uhlíku byl vyšší. Během kování byla narušena cementitické síťoví na hranicích původního austenitického zrna, jež zde byla zanechána licím procesem, tím byla zredukována křehkost materiálu a byl vytvořen vzor patrný na povrchu čepel po naleptání. Takto vykovaná čepel nepotřebovala dále žádné tepelné úpravy, tedy ani kalení, ani popuštění, a její břit neztrácel ostří ani opakovaným používáním. [16]

Nakonec je potřeba zmínit, že *wootz* byl sice speciální a velice kvalitní materiál, ale i tak tvořil jen minimální část produkce kelímkové oceli.

3.4. Porovnání výroby japonského a vikingského meče

Je pravdou, že všeobecnou znalostí a zpracováním je japonský meč lepší. Jedná se o to, že takovéto meče byly vyráběny tradičně po mnoho desítek a stovek generací a kde se zkušenosti předávaly a znalosti rozšiřovaly a vylepšovaly. V Evropě se zbraně všeobecně spíše považovaly za nástroje války a nikoliv za umění, takže se jim nevěnovala taková pozornost, jakou by měly dostávat.

Základním bojovým rozdílem těchto dvou mečů je zakřivení a uložení ostří. Japonské katany byly zbraně zakřivené s jedním ostřím, uzpůsobené na sekání a řezání. Japonský meč po doseknutí způsoboval ještě řezné poranění. Na druhou stranu meče vikingské byly rovné dvousečné nástroje smrti, které při doseknutí spíše lámali kosti a drtily svalovinu než, aby je odsekávaly nebo se do nich zařezávaly. Jelikož byly katany jednosečné umožňovaly větší tloušťku než meče dvousečné, které byly všeobecně docela tenké. Meč menšího průřezu měl tendenci se při bodnutí více ohýbat a tak byl větší část energie spotřebována právě při takovém to prohnutí. Na druhou stranu meč hrubší v průřezu umožňoval přenos síly více a důrazněji jelikož se tolik neohnul. Ohýbání navíc nehrálo roli jen při bodání, ale prakticky u všech bojových úkonů.

Velký rozdíl ve výrobě těchto mečů je kalicí proces. Japonské meče byly pomocí kalicí pasty kaleny na požadované tvrdosti v požadovaných místech. Vzniklé napětí se poté uvolnilo při zakřivení meče. Vikingské meče byly na druhou stranu zakaleny velice jednoduše a tak nebyla vytvořena rozdílná tvrdost na břitu a ve středu meče. *Hamon* je tedy světovou raritou, která patří do vínku japonským kovářům. Teoreticky by se dala použít japonská metoda kalení i na rovné vikingské meče. Záleží, jaký by to mělo efekt. Je pravda, že k vytvoření *hamonu* by takováto procedura vedla, ale je nutno zvážit, jak by se tělo čepele vyrovnalo s rozdílem vzniklého napětí, je možné, že by se meč prohnul do strany nebo by nemusel udělat nic a všechno vzniklé napětí by se dalo odstranit během popuštění. Nejspíše by to fungovalo, protože některé japonské hroty kopí jsou kalena pomocí kalicí pasty, ale ty jsou výrazně kratší, než aktuální čepel meče.

Kombinace různých materiálů o odlišných tvrdostech na výrobu čepele je v podstatě shodná, stejně jako samotný proces výroby určitého kompozitního polotovaru. V Japonsku, se

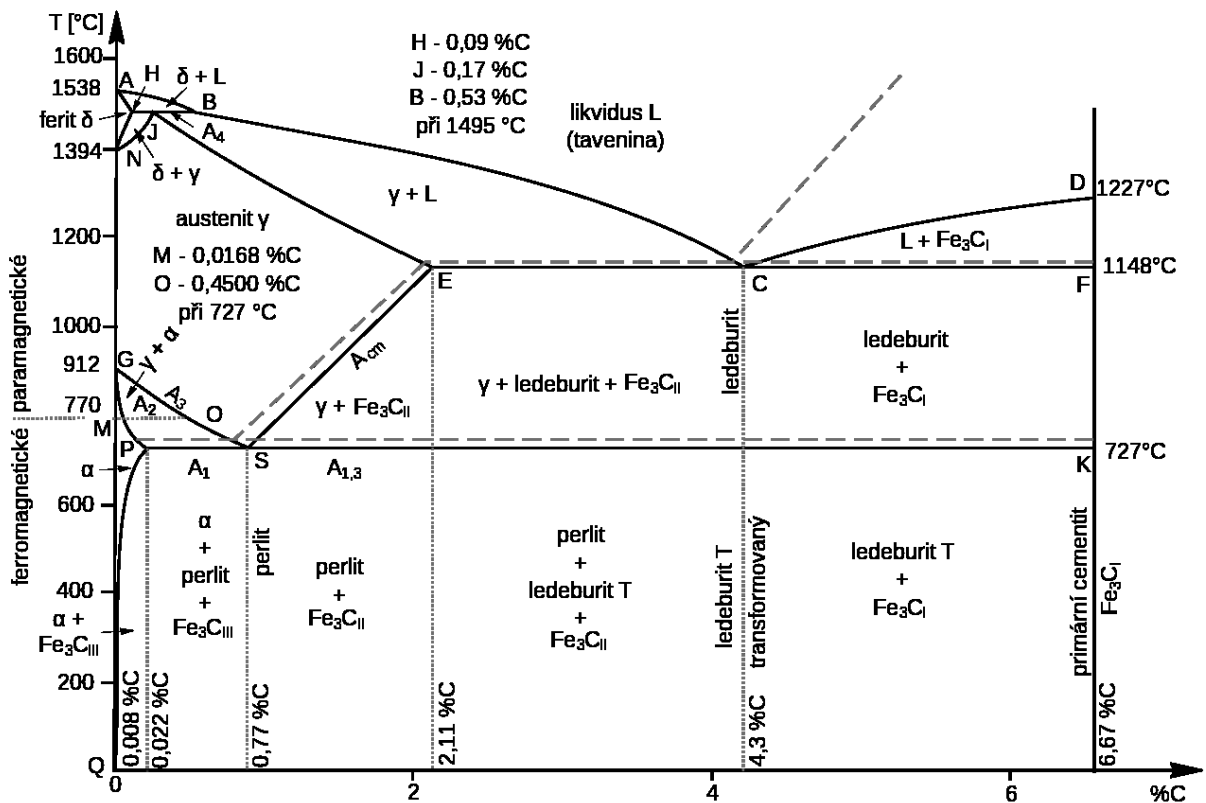
ale mohla klasická výroba kvalitních zbraní rozvíjet hlavně díky relativně jednoduchému přístupu k vysoce kvalitní základní surovině.

4. Metalografie a mechanické zkoušky

V této před poslední kapitole bych těl navázat na pár pojmů a témat, které jsem zmínil již dříve a to je metalografie a mikrostruktury. Je třeba také věnovat notnou dávku pozornosti a informací mechanické stránce problému, jak se tedy meče v boji vlastně chovaly a jakým druhům namáhání vlastně čelily. [3]

4.1. Metalografie

Jak jsem dříve předeslal, ocel má rozdílné vlastnosti podle obsahu uhlíku. Samotné označení ocel lze pouze použít pro roztok železa a uhlíku do obsahu uhlíku 2,11%. Materiál s vyšším obsahem uhlíku než 2,11% se již označuje jako litina. Jednoduše řečeno je ocel tvrdší a křehčí s vyšším obsahem uhlíku a naopak. Ocel s nízkým obsahem uhlíku je naopak odolná a vydrží hodně namáhání. Na **obrázku č. 22** je patrný binární diagram železo-uhlík.

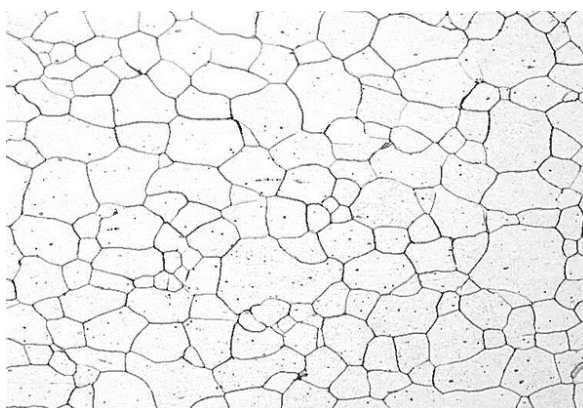


Obr. č. 22 Binární diagram železo-uhlík [22]

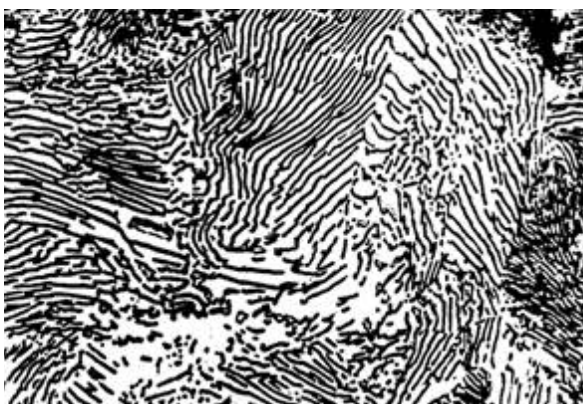
Čisté železo se vyskytuje v několika alotropických modifikacích. Jako železo α označujeme železo se strukturou kubicky prostorově centrovanou, která se vyskytuje do teploty 911 °C a nad teplotu 1 392 °C. Dále rozlišuje železo γ což je modifikace s mřížkou

kubickou plošně centrovanou a vyskytuje se v rozmezí teplot 911°C až 1 392°C. Vysokoteplotní modifikace železa α nad teplotu 1 392°C se často označuje jako železo δ .

Uhlík a železo vytváří intersticiální tuhý roztok, v takovém to případě se atomy uhlíku vtěsňují do prostoru mezi atomy železa. Směs uhlík s železem α , s rozpustností uhlíku do 0,02%, se označuje jako ferit případně jako ferit α . Dále pak existuje tuhý roztok železa a uhlíku s rozpustností uhlíku až 2,11% ten se označuje jako austenit a vyskytuje se v kombinaci s železem γ . Pokud je obsah uhlíku vyšší než daná rozpustnost, vyskytuje se uhlík ve formě karbidu železa Fe_3C , který se označuje jako cementit. Případně se může nadbytečné množství uhlíku vyskytovat samostatně ve formě grafitu. Při chladnutí se austenit přeměňuje na eutektoid, podle svého charakteristického vzhledu nazývaný perlit, pokud je obsah uhlíku přesně 0,765%, pokud je obsah uhlíku nižší tak se přemění na kombinaci feritu a perlitu. Na **obrázku č. 23** je patrná mikrostruktura feritu a na **obrázku č. 24** pak mikrostruktura laminárního perlitu.

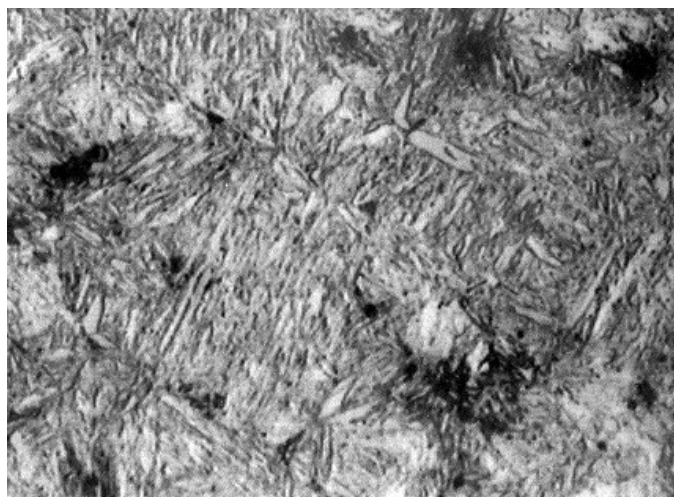


Obr. č. 23 Ferit s karbidy uvnitř zrn. [23]



Obr. č. 24 Laminární perlit, kde bílá barva je cementit, tmavá barva je ferit. [24]

Fáze tedy dělí ocel na několik typů v závislosti na obsahu uhlíku. Mikrostruktura konečného výsledku oceli, se ale také může dále lišit v závislosti na intenzitě tepelného zpracování. Můžeme rozlišit základní struktury: martenzit a bainit, případně se po popuštění může ve struktuře vyskytovat sorbit. Martenzit vzniká při rychlém ochlazení tuhé roztoku, který je přesycen uhlíkem, rychlé ochlazení je dosaženo kalením. Vzniká tak velice tvrdá, ale křehká struktura. Mikrostruktura martenzitu je na **obrázku č. 25**. Pokud je obsah uhlíku příliš nízký martenzit vznikne, ale nebude mít vyšší tvrdost než ferit. Dalším typem mikrostruktury je bainit. Také se vyskytuje u ocelí s vyšším obsahem uhlíku a vzniká zakalením. Kalení však musí být provedeno nižší rychlostí než tomu při kalení na martenzit, ale naopak za vyšší rychlosti než je rychlost vzniku perlitu. Bainit se vyznačuje jehlicovitou strukturou a je velice podobný martenzitu, je však o něco měkčí a trochu pružnější, když se jedná o spodní bainit, horní bainit se vlastnostmi blíží spíše martenzitu. Mikrostruktura bainitu je na **obrázku č. 26**.



Obr. č. 25 Martenzit [25]



Obr. č. 26 Bainit [26]

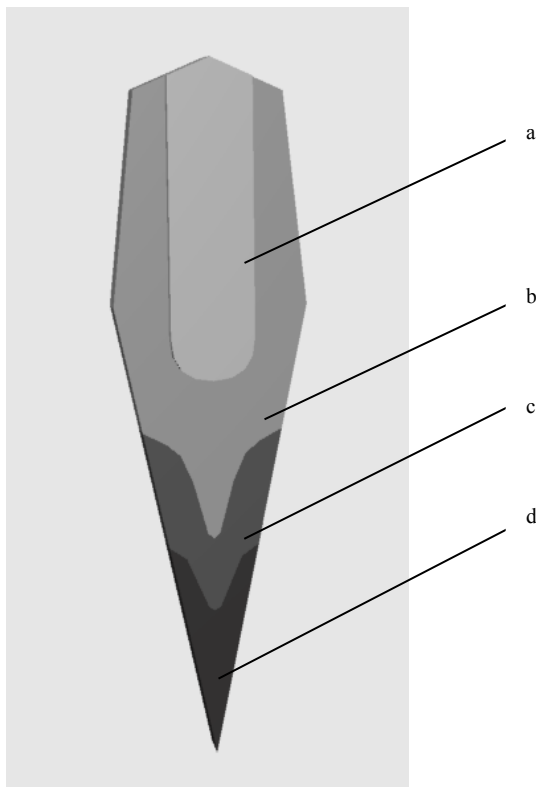
Jako poslední byl zmíněn sorbit, jedná se o jemně zrnitou kombinaci feritu a cementitu. Vyskytuje se u zušlechťených ocelí, kde vzniká popuštěním martenzitu.

4.2. Rozložení mikrostruktur

Díky specifickému postupu kalení, kdy se vymezily ty části čepel, které se mají zakalit, bylo možné u japonských mečů vytvoření různých mikrostruktur v různých místech čepel. Různých mikrostruktur též bylo dosaženo pomocí odlišných materiálů, ze kterých byla čepel sestavena. Díky správnému umístění odlišně tvrdých struktur bylo možno dosáhnout nadčasových výsledků. Podívejme se tedy na různorodosti v mikrostrukturách.

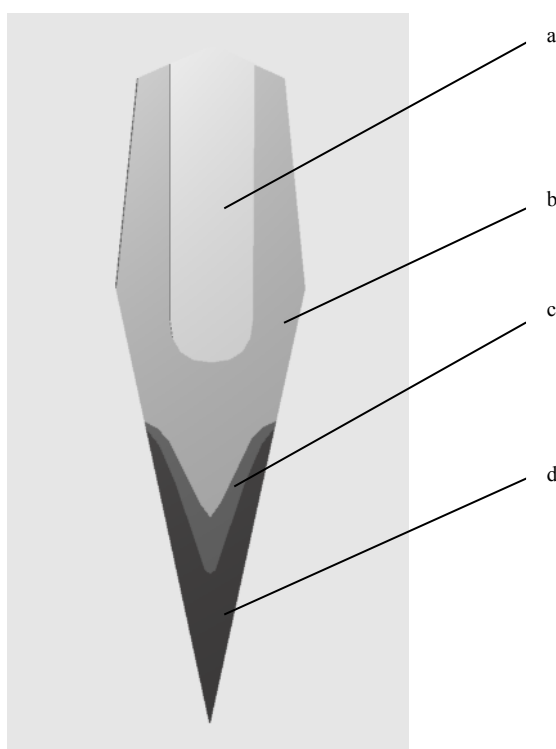
4.2.1. Japonské meče

V předchozí kapitole, kapitole třetí, jsem se notnou dávkou informací věnoval japonské kalící metodě pomocí kalící pasty a vytváření linie *hamon*. Nyní si můžeme názorně ukázat, jaký druh mikrostruktury se nacházel na jakém místě čepel meče. Na **obrázku č. 27** je viditelný přechod zakalené a nezakalené částí, jedná se o čepel se měkkým jádrem *shingane* a tvrdým pláštěm *kawagane*. Jednotlivé body označují struktury následně; a feriticko-perlitická s nízkým obsahem uhlíku, b perlit s vysokým obsahem uhlíku, c přechodová mikrostruktura kalící oblasti tedy bainit a d silně zakalená oblast s martenzitickou strukturou.



Obr. č. 27 Mikrostruktura v řezu čepel

Takto tedy kovář dosáhl optimálního rozložení tvrdosti, čepel je pružná a odolná, ale díky zakalenému martenzitickému břítu také velice ostrá. Přejchodová oblast bainitu se lišila šířkou podle obsahu uhlíku. Pokud by tedy byl plášť čepel byl vytvořen z vysoce uhlíkaté oceli *hagane* byla by linie velice ostrá a bainitická oblast by sahala spíše do jádra čepel a na povrchu by nebyla příliš viditelná. Ostrý přechod je znázorněn na **obrázku č. 28**, zde se tedy jedná o kombinaci oceli s velice vysokým obsahem uhlíku, *hagane*, na plášť a nízko uhlíkatého *shingane* na jádro. Rozložení mikrostruktur je opět; a feriticko-perlitická s nízkým obsahem uhlíku, b perlit s velice vysokým obsahem uhlíku, c přechodová mikrostruktura kalící oblasti tedy bainit a d silně zakalená oblast s martenzitickou strukturou.

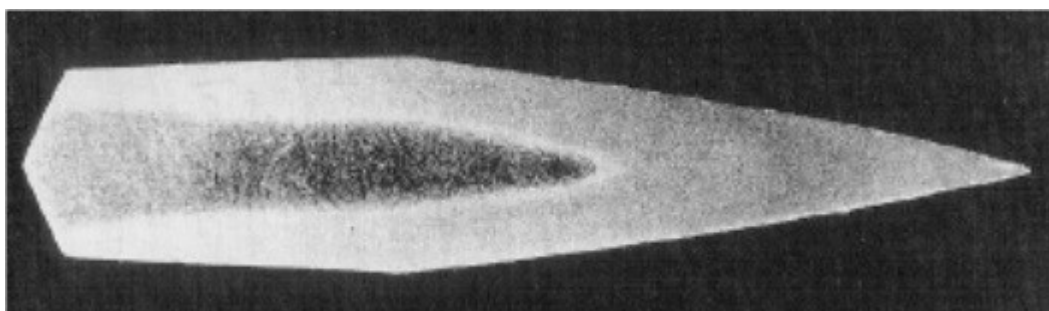


Obr. č. 28 Mikrostruktura průřezu zakalenou čepelí s velmi tenkou přechodovou oblastí

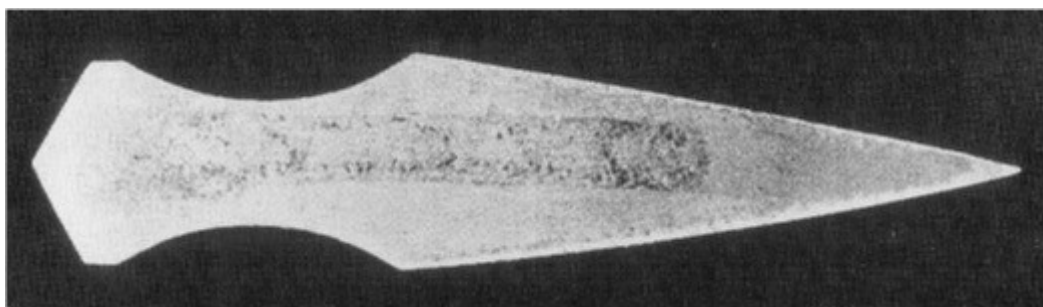
Šířka přechodové oblasti mohla mít vícero využití kromě určení z jakého materiálu je povrchová vrstva čepel. Je možné, že přechodová vrstva bainitu účinkovala jako jakási tlumící vrstva mezi dvěma velice odlišnými strukturami. Díky tomu při zakalení nemusel být břit tolik namáhaný ohýbání, a tudíž se snížila pravděpodobnost tvorby trhlin v samotném ostří. Stejně tak působila i při samotném používání meče kdy širší vrstva mohla usnadňovat pohlcování energie při nárazech a dosecích. Také mohla účinkovat jako dodatečný materiál, díky kterému bylo zakřivení čepel jemnější. Také záleží, jak hluboké zakalení požaduje, čím tvrdší materiál tím by šířka zakalené oblasti měl být tenčí, aby případně docházelo k tvorbě co

nemenších odštěpků. Podle mého názoru je sice ostrý přechod daleko estetičtější, hlavně pokud se jedná o složitější tvary *hamonu*, ale praktická funkce by vždy měla mít přednost.

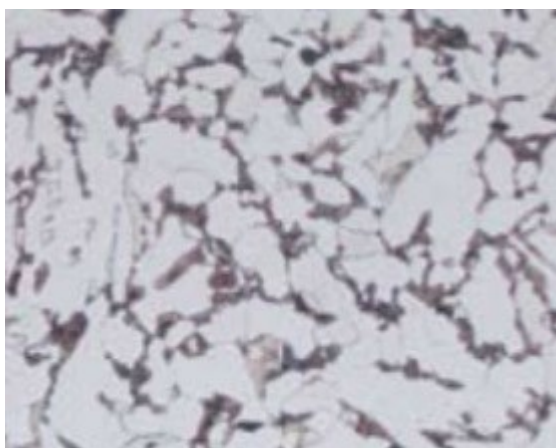
Na **obrázku č. 29** můžeme vidět řez čepelí ze dvou typů oceli, s měkkým jádrem a tvrdou plášťovou ocelí. Na dalším obrázku, **obrázek č. 30**, lze vidět řez čepelí ze tří typů oceli, měkké jádro, středně tvrdý plášť a vysoce tvrdé ostří. V místě ostří je obtížně viditelná světlejší zakalená martenzitická oblast. Na **obrázku č. 31 a 32** jsou poté mikrostruktury z jednotlivých částí čepelí.



Obr. č. 29 Řez čepelí ze dvou typů oceli, tmavá oblast je měkká ocel a světlá oblast pak tvrdá ocel. [4]



Obr. č. 30 Řez čepelí ze tří typů oceli, tmavší oblast je měkká ocel, jako plášť poté slouží středně tvrdá ocel a v místě ostří je vsuta vysoce tvrdá ocel. [4]



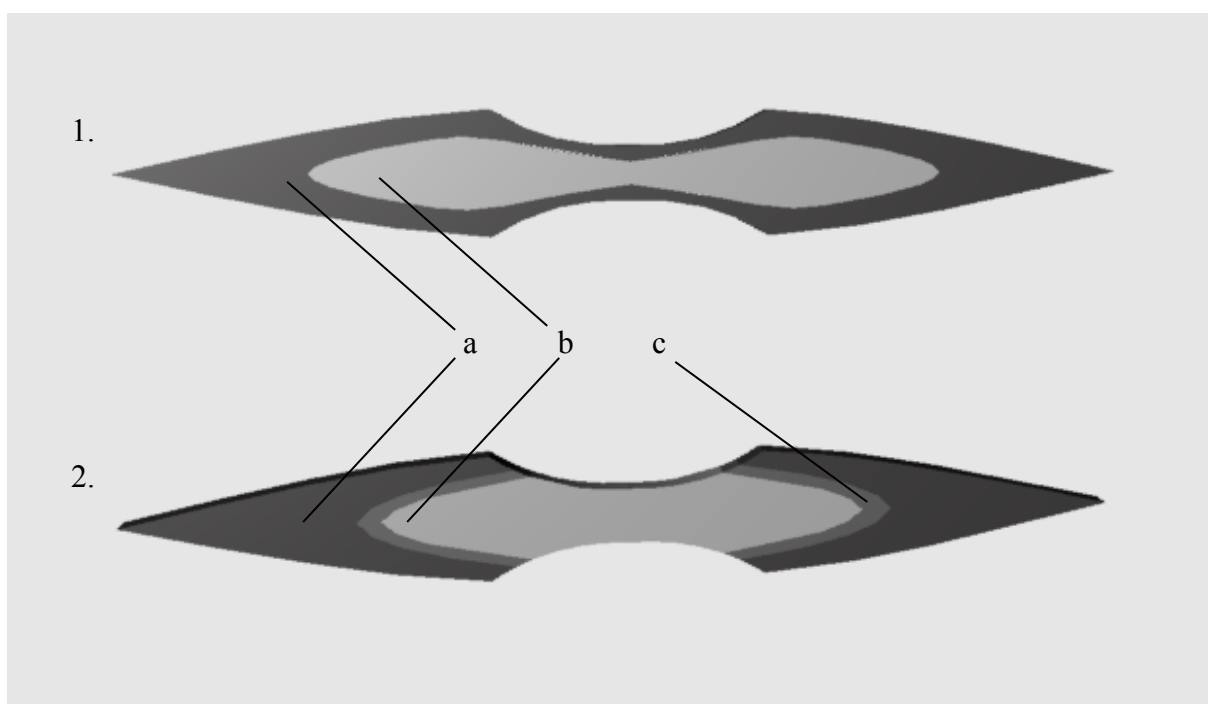
Obr. č. 31 Ostří čepelí. [21]



Obr. č. 32 Jádro čepelí. [21]

4.2.2. Rozložení mikrostruktur v evropských mečích

Používání různorodých tyčí umožňovalo dosáhnout jiných tvrdostí po zakalení a tedy tvorby jiných mikrostruktur v těle čepel. Pokud byl meč pouze z jednoho kusu a byl zakalen, tak se musela kalící teplota, a rychlost, velice dobře hlídat. V takovém případě bylo nežádoucí, aby byla čepel zakalena na celém průřezu, což bylo možné, protože tehdejší meče byly velice tenké, bylo žádoucí, aby vnitřní jádro zůstalo relativně měkké a pružné. Kalení mečů s měkkým jádrem a tvrdým ostřím bylo relativně jednodušší, stačilo dohlédnout na teplotu břitů a o vnitřní žebro se nebylo třeba příliš starat. Na **obrázku č. 33** je možno vidět požadované zakalení čepel jednotného materiálu (1.) a pak ze dvou odlišných materiálů (2.), dále je viditelná martenzitická oblast a, perliticko-feritická oblast b a bainitická oblast c.



Obr. č. 33 Průřezy zakalených čepelí evropského typu. Horní, zakalená čepel z jednoho druhu oceli. Dolní, průřez zakalenou čepelí ze dvou druhů.

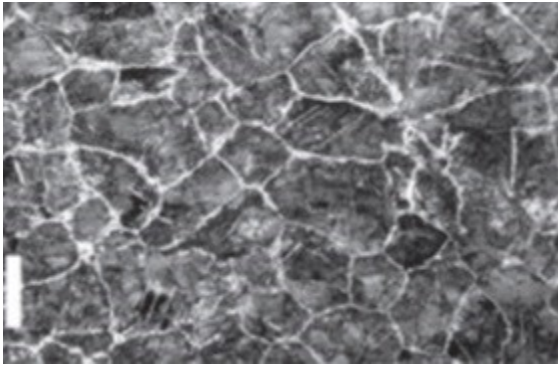
Bainitická oblast se zde vyskytuje díky sváru mezi dvěma typy materiálu. U kalené čepel z jednoho druhu oceli je též možné, že jádrová oblast meče bude také tvořena bainitem, stejně jako mohla být celá čepel kalena na bainit místo martenzitu, aby byl meč odolnější.

4.2.3. Mikrostruktura mečů 'Ulfberht'

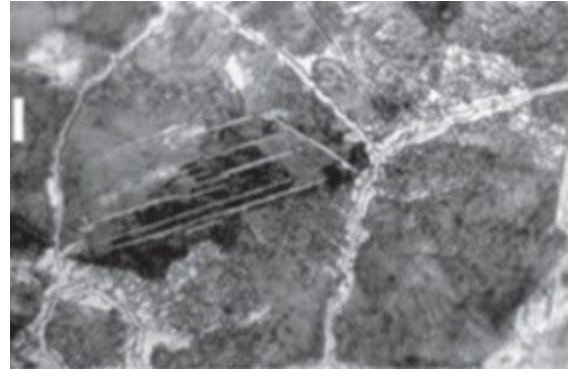
Nálezů mečů s názvem Ulfberht bylo kolem 100 a vykazovali odlišné mikrostrukturní vlastnosti. Na základě metalografické zkoušek a zjištěných odlišností byly tedy vytvořeny čtyři odlišné skupiny Ulfberht mečů. V této části bylo vybráno 44 mečů, které prošly metalografickou analýzou a můžou být tedy porovnány.

4.2.3.1. Skupina A – meče s nápisem +VLFBERH+T

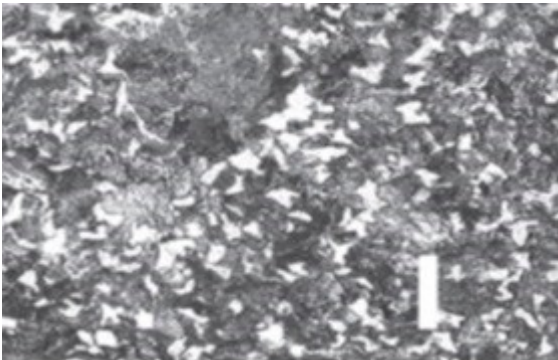
Z celkového množství 44 zkoumaných mečů se do této skupiny řadilo 14 mečů. Z nichž 9 se vyznačovalo vysoce kvalitní hypereutektoidní ocelí a zbylých 6 pak ocelí eutektoidní, což znamená, že byly s velkou pravděpodobností vytvořeny z kelímkové oceli. **Obrázky č. 34 až 37** ukazují mikrostrukturu některých těchto mečů a **obrázek č. 38** pak znázorňuje dokonale zachovalý exemplář meče.



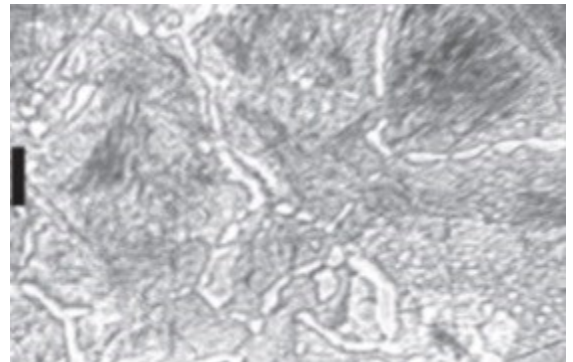
Obr. č. 34 Vzorek A2, perlit a cementit, měřítko 50 μm . [2]



Obr. č. 35 Vzorek A2, perlitická oblast s cementitem na hranici zrn a s cementitem jako jehlicemi uprostřed zrna, měřítko 10 μm . [2]



Obr. č. 36 Vzorek A6 ostří, perlit a ferit, měřítko 50 μm . [2]



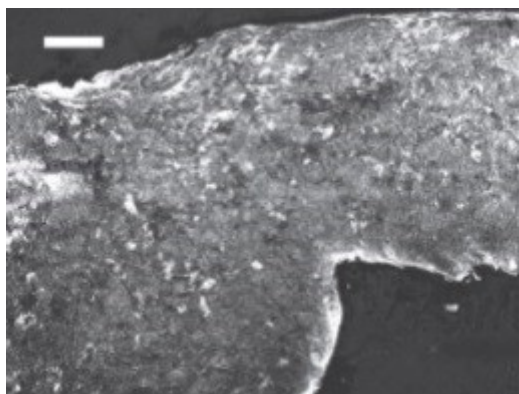
Obr. č. 37 Vzorek A6 jádro, perlit a cementit, měřítko 10 μm . [2]



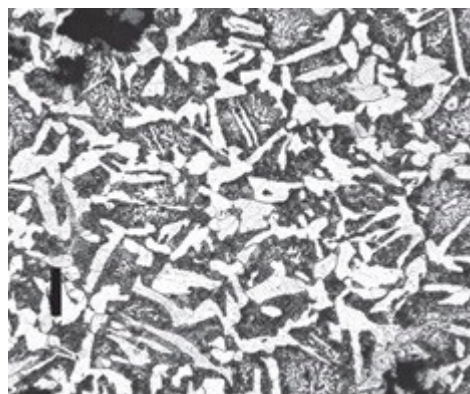
Obr. č. 38 Nález meče ze skupiny A. [2]

4.2.3.2. Skupina B – meče s nápisem +VLFBERHT+

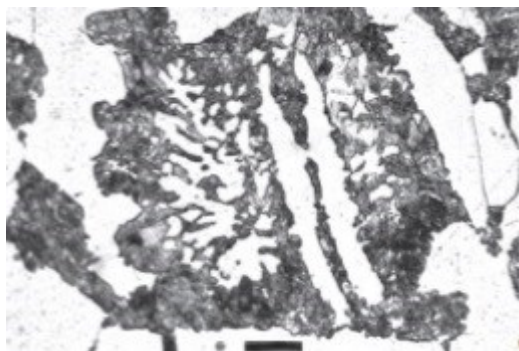
Do této skupiny se řadí 5 zkoumaných mečů. Kde tři z nich byly zcela zakaleny a čtvrtý částečně. Dále tři ze čtyř zakalených mečů měly z oceli vyrobena pouze ostří, a i když je nemožné určit, z čeho bylo jejich jádro vyrobeno, byly všechny nejspíše vyhotoveny stejným způsobem. Na **obrázcích č. 39 až 43** jsou mikrostruktury vybraných jednotlivých vzorků.



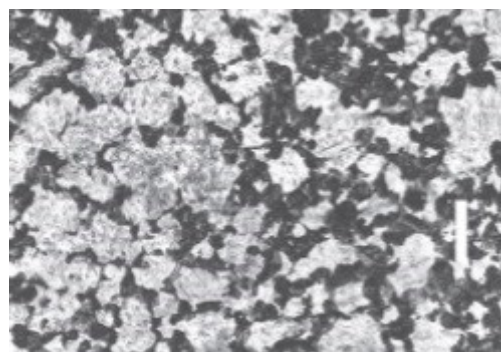
Obr. č. 39 Vzorek B2, popuštěný martenzit, měřítko 50 μm . [2]



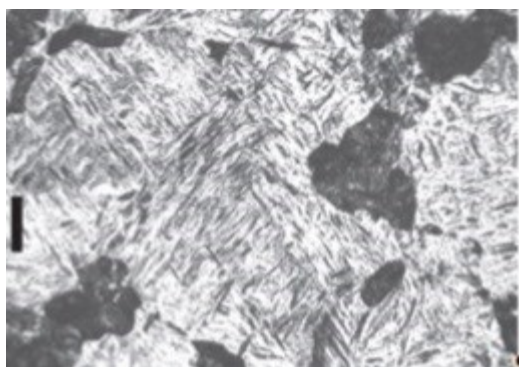
Obr. č. 40 Vzorek B4, ferit a perlit, měřítko 50 μm . [2]



Obr. č. 41 Vzorek B4, rovnoosé feritické zrno a ferit uvnitř perlitických oblastí, měřítko 10 μm . [2]



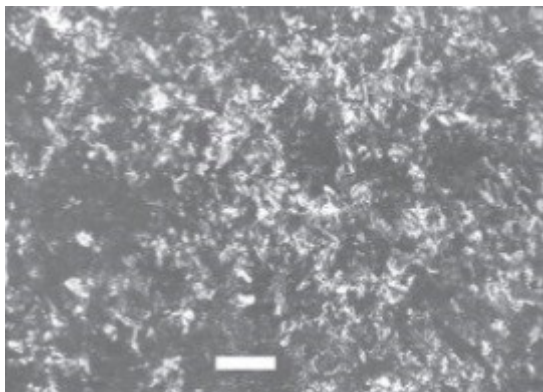
Obr. č. 42 Vzorek B5, popuštěný martenzit a nodulární perlit, měřítko 50 μm . [2]



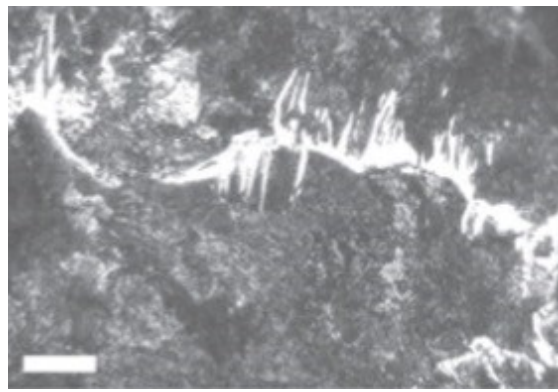
Obr. č. 43 Vzorek B5, popuštěný martenzit a nodulární perlit, měřítko 10 μm . [2]

4.2.3.3. Skupina C – odlišně označené ocelové meče

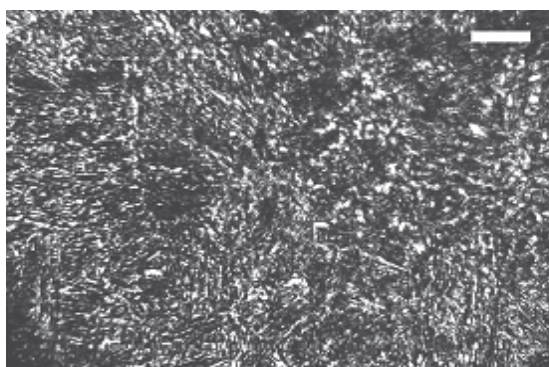
Do této skupiny se řadí napodobeniny mečů, které se hodně lišily značením na čepeli, ale stále ještě značení připomínalo označení Ulfberht. V této skupině se již objevuje větší rozdíl v mikrostrukturách, ale stále se jedná o meče vyrobené z oceli se středním obsahem uhlíku tedy alespoň, co se týče jejich ostří. Jedná se o 14 exponátů, kde 6 z nich bylo zakaleno s tím, že jeden neúspěšně. Na **obrázcích č. 44 až 52** jsou mikrostruktury vybraných nálezů.



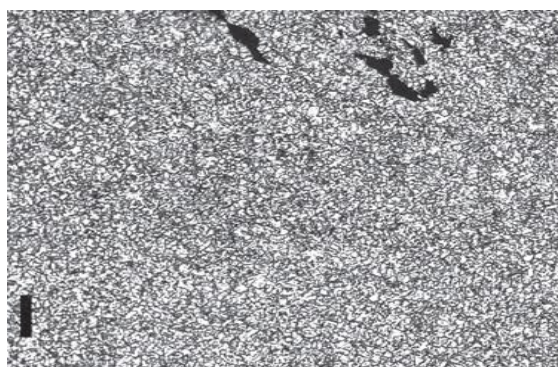
Obr. č. 44 Vzorek C3, perlit a ferit, měřítko 50 μm . [2]



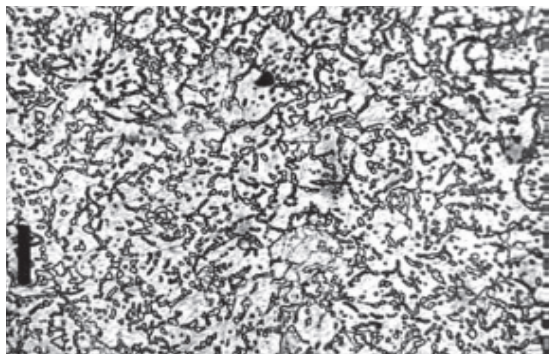
Obr. č. 45 Vzorek C3, perlit v některých místech nerozpustný a jehlicovitý ferit, měřítko 10 μm . [2]



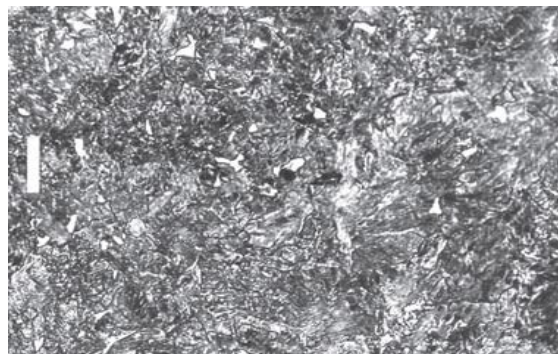
Obr. č. 46 Vzorek C4, popuštěný martenzit a bainit, měřítko 10 μm . [2]



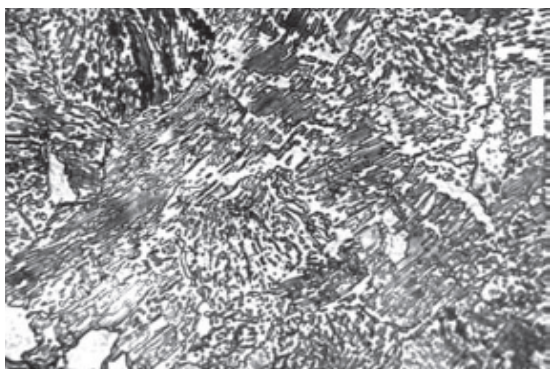
Obr. č. 47 Vzorek C7, hrot meče, perlit rozdělený do malých oblastí, měřítko 50 μm . [2]



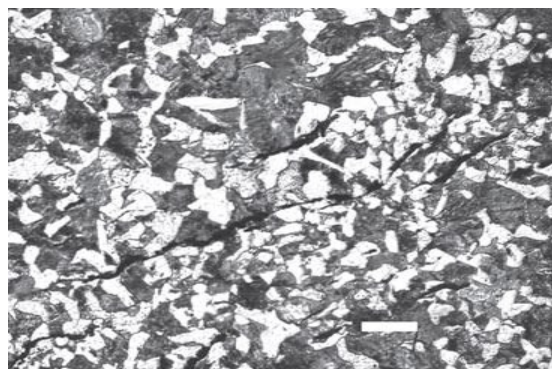
Obr. č. 48 Vzorek C7, hrot meče, měřítko 10 μm . [2]



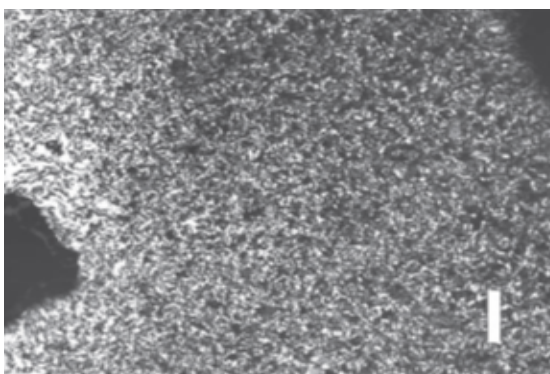
Obr. č. 49 Vzorek C7, ostří meče, lehce rozdělený jemnozrný perlit s několika izolovanými zrnky feritu, měřítko 50 μm . [2]



Obr. č. 50 Vzorek C7, ostří meče, měřítko 10 μm . [2]



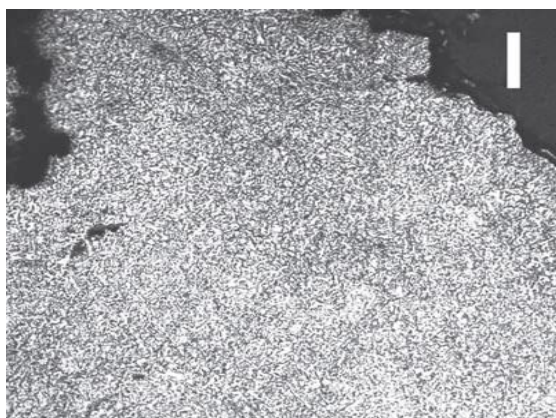
Obr. č. 51 Vzorek C7, jádro meče, ferit a perlit s vměstky protáhlého charakteru, měřítko 50 μm . [2]



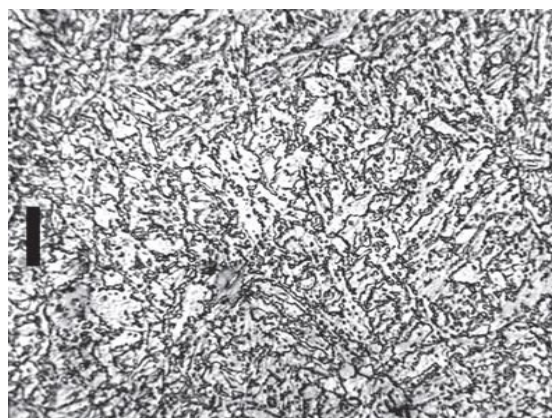
Obr. č. 52 Vzorek C8, perlit a ferit s nízkým obsahem vměstků, měřítko 50 μm . [2]

4.2.3.4. Skupina D – Odlišně označené železné meče

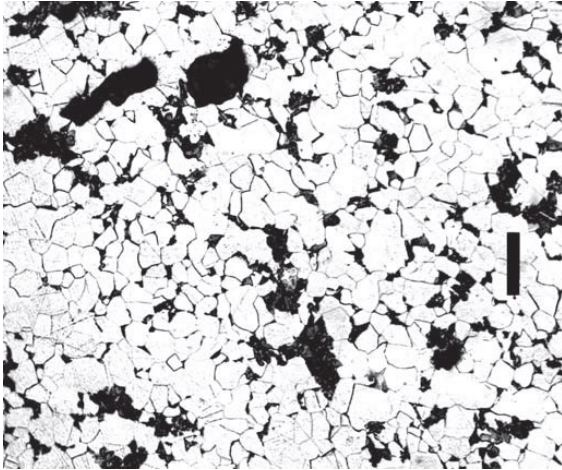
Do této skupiny se řadí meče, které jsou označením stále řazeny mezi meče napodobující Ulfberht, ale jsou vyrobeny z železa nebo z nízko-uhlíkové oceli. Těchto dohromady 11 mečů se vyznačovalo nejhoršími metalurgickými vlastnostmi, a také nejrozmanitějšími označeními. Na **obrázcích č. 53 až 55** jsou viditelné mikrostruktury několika vybraných čepelí.



Obr. č. 53 Vzorek D2, nízkouhlíkový martenzit, měřítko 50 μm . [2]



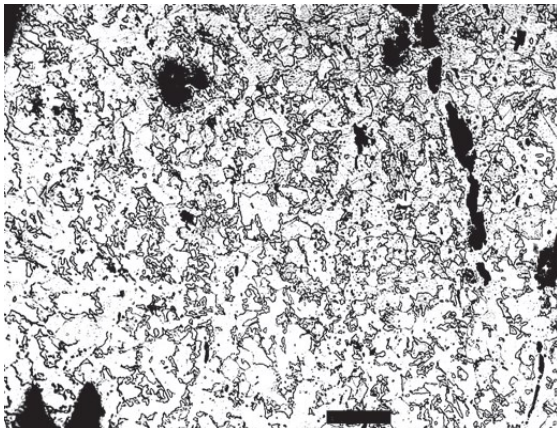
Obr. č. 54 Vzorek D2, měřítko 10 μm . [2]



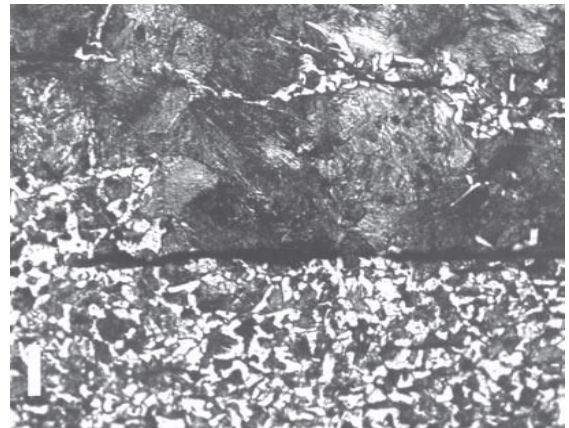
Obr. č. 55 Vzorek D10, ferit, vměstky a trocha perlitu, měřítko 50 μm . [2]

4.2.3.5. Skupina E – Další meče s označením

Do této poslední skupiny jsou řazeny další meče, které byly označeny na čepeli, ale již se neřadí mezi napodobeniny meče Ulfberht, buď železné, nebo ze vzorovaného damašku. Na **obrázku č. 56 a 57** jsou ukázky jejich mikrostruktur.



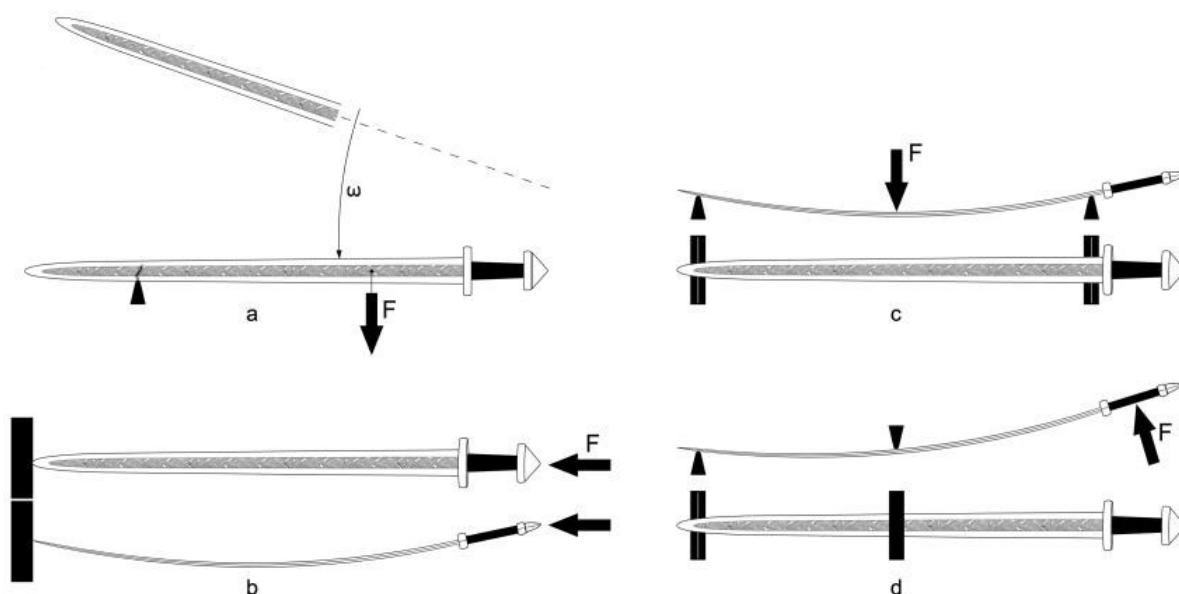
Obr. č. 56 Vzorek E3, perlit a nepravidelné vměstky, měřítko 50 μm . [2]



Obr. č. 57 Vzorek meče z E skupiny, spojení mezi ocelí s vyšším a nižším obsahem uhlíku, měřítko 50 μm . [2]

4.3. Mechanické zkoušky

Meč v boji procházel několika typy zatížení. Za prvé musel být schopný vydržet prohnutí při bodání, případně při vytáhnutí zaseklého meče ve štítu. Dále meč musel vydržet nárazy při sekutí, kdy dopadal na tvrdé předměty, ne vždy se podařilo zasáhnout nepřítele do těla. Za třetí byl meč vystaven ohybu, kdy síla působila ve směru plochy meče. Všechny typy namáhání jsou znázorněny na **obrázku č. 58**.



Obr. č. 58 Způsoby namáhání meče; a náraz při doseknutí, b prohnutí při bodnutí, c, d namáhání v ohybu. [7]

4.3.1. Zkouška tvrdosti

Zkoušky tvrdosti se nejčastěji provádějí podle Vickerse, kdy je do vzorku vtlačován čtyřboký jehlan. Jedná se o statickou zkoušku tvrdosti. Výhodou této zkoušky je to, že u ní nezáleží na vtláčovací síle, musí být samozřejmě známá, a tvrdost se odvozuje z délky uhlopříček vytlačeného čtvercového tvaru, a také fakt že se takto dá zkoušet jak tvrdý tak i měkký materiál. Jiné druhy zkoušek tvrdosti jsou například; podle Brinella kdy je do materiálu vtlačována kulička, tato metoda se používá pro měkké materiály, nebo podle Rockwella kdy indentor, těleso vnikající do materiálu, musí do materiálu vnikat pod přesně daným zatížením a následně se měří hloubka vpichu.

Zkouška nálezu meče se pak provádí následovně: Jsou odebrány většinou dva vzorky, od hrotu meče a pak v blízkosti záštity. A aby meč zůstal více méně neporušen, vzorky jsou odebírány jen do poloviny šířky čepele. Tak to předpřipravené vzorky jsou poté podrobeny zkoušce tvrdosti. Právě díky takovým to zkouškám může určit, zda byla zbraň zakalena, jaký materiál se kde nacházel a také který materiál měl nejlepší vlastnosti. Pokud byl meč zlomen, postup zkoušení je stejný, nálezy pro svou hodnotu musí být zanechány co v nejlepším stavu, vzorky se také odebírají pouze z nálezů, které nemají příliš velkou historickou hodnotu nebo pokud by se jednalo o velký přínos věci.

4.3.2. Zkouška tahem

Tahová zkouška se provádí za pomoci stroje s čelistmi, do kterých se umístí vzorek a ten je poté namáhán tahem do jeho přetržení, neboli do porušení soudržnosti. Vzorek je podélný a rozšířený na koncích aby se dal dobře uchytit do stroje, a také proto, aby se jasněji určilo místo kde dojde k přetržení. Vzorek může být kruhového nebo čtvercového průřezu. Ve chvíli kdy dojde k přetržení materiálu, může nastat několik situací; křehký lom, vzorek se přetrhne v jedné linii, houževnatý lom, vzorek vytvoří tzv. krček a začne se protahovat a poté se přetrhne. Díky této zkoušce lze určit pevnost materiálu, která se odvíjí od mnoha faktorů. Pokud dojde ke křehkému lomu, víme, že se jedná o velice pevný a odolný materiál, ideální na břity meče. Pokud se bude materiál prodlužovat je zase měkký a odolný a bude tak vhodný na jádro meče. Když materiál není homogenní a obsahuje mnoho nečistot, může dojít i k jeho úplnému rozpadnutí.

4.3.3. Zkouška ohybem

Další možností jak zkoušet vlastnosti materiálu je zkouška ohybem, neboli zkouška rázem v ohybu. Vzorek materiálu se vytvaruje do malého podélného kvádrů o čtvercovém nebo obdélníkovém průřezu a ve středu se vytvoří zářez. Zářez může mít tvar písmene U nebo V, případně se tato zkouška může provádět bez zářezu. Vzorek se poté umístí do stojanu a na střed, na opačné straně než je zářez, je udeřeno kladivem s ostrou hranou s přesně vymezenou hmotností, které je zpuštěno z určitého úhlu. Z úhlu a váhy kladiva se poté určí pevnost, ta se s teplotou materiálu mění, takže je nutné samotnou teplotu přesně určit. Pro většinu mečů byl úder na plochu meče smrt, díky této zkoušce si lze uvědomit, že použitím správných materiálů je možno vytvořit zbraň odolnou i vůči takovémuto nevhodnému namáhání.

4.3.4. Zkouška prokalitelnosti

Zakalitelností se rozumí schopnost materiálu při ochlazování nad kritickou rychlost přejít a zůstat v metastabilním stavu, tedy u ocelí získat martenzitickou strukturu. Obvykle se bere tvrdost jako měřítko kaleného stavu, je zakalitelnost dána maximální tvrdostí povrchu kaleného výrobku. Prokalitelnost je pak schopnost oceli dosáhnout při kalení tvrdosti, martenzitické struktury, do určité hloubky pod povrchem výrobku. Za prokalenou se poté považuje vrstva, která má tvrdost odpovídající struktuře o minimálně 50 % martenzitu.

Jominiho zkouška prokalitelnosti spočívá v ochlazování přímo z kalící teploty. Ohřátý vzorek je uchycen v přípravku, tak aby na čelo vzorku mohla ze spodní části stále proudit voda. Do doby než je vzorek na svém místě v přípravku, proud vody brání clona, která se poté odstraní. Tím dochází k prudkému ochlazení čela a postupnému chladnutí vzorku od čela až k hlavě, za kterou je vzorek uchycen. Po zakalení se na vzorkách provede vybroušení v podélné ose do hloubky 0,5 mm, pro vytvoření plošky na měření tvrdosti.

Jelikož by došlo k degradaci a zničení výrobku, tedy v tomto případě meče, mohla by samotná zkouška být provedena na polotovaru čepele, tedy na polotovaru připomínajícím tvarem čepel, ale který má stále v řezu tvar obdélníku. Díky této zkoušce by bylo možné zjistit, jestli byla tyglíková ocel zakalitelná, případně jak postupovat při kalení čepelí mečů.

4.3.5. Hledané kvality pro kvalitní zbraň

Meč musí být lehký pružný a musí dobře držet ostří. Lehký meč vytvoříme pomocí kvalitního materiálu s dostatečnou pevností a odolností, železné meče by musely být řádově tlustší, aby měly alespoň podobné vlastnosti jako meče ocelové. Pružnost získáme kombinací několika materiálu, případně použitím vhodné kalící a popouštěcí metody, a také přidáním technologické úpravy, tedy pomocí žlábků. Ostří pak bude dostatečně odolné, pokud bude jeho břít buď z kvalitní oceli s vysokým obsahem uhlíku, nebo pokud bude dobře zakalené, případně kombinací obojího. Evropské meče musely být z pružnějšího a odolnějšího materiálu protože byly řádově tenčí, než tomu bylo u mečů japonských. Někteří samurajové si dokonce úmyslně pořizovali meče, které byly spíše ohebné nežli pružné, v boji se tedy spíše stalo, že se jim zbraň sice mohla ohnout, ale nezlomila se, a mohli ji pohotově narovnat a pokračovat v boji. Také je potřeba si uvědomit, že meče se nepoužívali ke kontaktnímu boji meče na meč, kde hrozilo poškození meče. Evropané toto řešili buď pomocí štítů, nebo tak že si jednoduše vybírali soupeře, který meč neměl, což nebylo složité. Samurajové na druhou stranu používali k vykrývání nepřátelských ran hřbet meče a měli tak jistotu, že se jim zbraň nerozpadne v ruku.

5. Závěr

Úkolem této bakalářské práce byl rozbor a porovnání nejlepších mečů historie. Porovnání bylo provedeno v několika krocích, kdy se nejdříve porovnaly původní materiály, ze kterých byly meče vyrobeny. Následně byly zjištěny a porovnány postupy výroby těchto nezaměnitelných mečů. Nejdůležitější částí byla pak metalografie, která ukázala rozdíl ve strukturách. Mechanické zkoušky pak sloužily jako porovnání.

Jasný výsledek se, podle očekávání, nedá získat příliš jednoduše. Metalografie ukázala, že pokud chceme kvalitní zbraň, potřebujeme dosáhnout co nejjemnějšího zrna a hlavně co nejčistšího homogenního materiálu. Důležitým krokem pak byla tepelná úprava, tedy kalení. Postupy se značně rozcházejí, ale mají stejně dobrého výsledku. Tyglíková ocel má výhodu v tom, že uzavřená oblast, kde vzniká samotný tuhý roztok železa a uhlíku, je chráněná před nepříznivými podmínkami v tavící peci, zde vzniká homogenní a čistý polotovar, díky němuž, pokud je ochlazován velice pomalu, vzniká nadčasový a zcela nepopíratelně jedinečný materiál. Na druhou stranu zdoluhavý a pečlivý proces překládání u japonského meče též umožňuje takřka dokonalé vyčištění a homogenizaci materiálu. Za hlavní přednost japonských mečů, ale lze považovat zakalení, zakalení pomocí kalící pasty kdy vznikají místa s různou mikrostrukturou a vlastnostmi. Pokud tedy vezmu v potaz poznatky, které jsem srovnal, dovolil bych si říct, že oba tyto meče jsou absolutní špičkou. Jeden díky vlastnostem tyglíkové oceli a druhý díky dokonalému a přesnému zakalení.

Přínosem této bakalářské práce je porovnání z hlediska metalurgie a materiálových vlastností. Vyvarování se omylů, jež jsou spojeny s neznalostí základní problematiky, nikoliv z archeologického či historického pohledu, ale z pohledu metalurgie.

Použitá literatura

- [1] MORIMOTO, M. *The Forging of a Japanese Katana*. Colorado School of Mines, [online]. 2004, [cit. 2015-04-09]. Dostupné z:
https://www.forging.org/system/files/field_document/JapaneseSword.pdf
- [2] WILLIAMS, A. A Metallurgical Study of some Viking Swords. *Gladius*, XXIX (2009), pp. 121-184. ISSN: 0436-029X
- [3] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering : An Interactive E-text*. Wayne Anderson. 5th edition. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2001, 952 s., CD. ISBN 0-471-39551-X.
- [4] KAPP, L. KAPP, H. YOSHIHARA, Y. *The craft of the Japanese sword*, [online]. 1987, [cit. 2015-03-10]. Dostupné z:
<http://buhoz.net/public/libros/metallurgia/The.Craft.of.the.Japanese.Sword.pdf>
- [5] PLEINER, Radomír. *Dějiny hutnictví železa v Československu*. 1. vyd. Praha: Academia, 1984, 295 s., [8] s. barev. obr., příl.
- [6] WILLIAMS, A. Methods of Manufacture of Swords in Medieval Europe, Illustrated by the Metallography of some Examples; *Gladius*, XIII (1977), pp. 75-101. ISSN: 0435-029X
- [7] THIELE, A. *The role of pattern-welding in historical swords – mechanical testing of materials used in their manufacture*, [online]. 2014 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z:
http://www.adithiel.com/wp-content/uploads/2014/04/3F10_A1013_Pattern-welding-manuscript.pdf
- [8] HLOŽEK, M. Konzervace železného meče ULFBERHT; *Archeologia technica*, 13 [online]. (2000) [cit. 2015-03-07] pp 28 – 33. Dostupné z:
http://www.starahut.com/AT/at13/at_13_05.pdf
- [9] HURNÍK, Z. *Samurajský meč*. Vyd. 1. Praha: Naše vojsko, 1995, 155 s., barev. fot. na příl. Mozaika (Naše vojsko). ISBN 80-206-0510-x.
- [10] *Metallurgical sleuthing sheds light on Viking trade routes, swordsmithing & counterfeiters*, [online]. 2009 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z:
<http://www.asminternational.org/documents/10192/1896685/amp16704p04.pdf/d1246e94-9f02-4fdf-b025-cf2b618b6bc1/AMP16704P04>
- [11] WILLIAMS, A. *Crucible steel in medieval swords*, (2007), pp 233-241. ISBN 978-1-904982-19-7
- [12] VERHOEVEN, J. *The Mystery of the Damascus Sword in Muse*, [online]. (April 1998), pp. 35-43, cit. 2015-02-06] dostupné na: [<http://houtmannotje.nl/muse.pdf>]
- [13] STALSBERG, A. *The Vlfberht sword blades reevaluated*, [online]. [cit. 2015-02-08]. Dostupné z: <http://www.jenny-rita.org/Annestamanus.pdf>

- [14] SCOTT, D. A. *Metallography and microstructure of ancient and historic metal*, (1991). ISBN 0-89236-195-6
- [15] ASTRUP, E. E. Studies of Viking age swords: Metalography and archaeology. *Gladius*, XXXI (2011), pp. 203-206. ISSN: 0436-029X
- [16] ALEXANDER, D. Swords and sabers during the early Islamic period. *Gladius*, XXI [online]. (2001), pp. 193-220. [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: <http://gladius.revistas.csic.es/index.php/gladius/article/viewFile/86/86>
- [17] HOŠEK, J. The metallographic examination of sword no. 438 as part of a systematic survey of swords from the early medieval. *Gladius*, XXXII (2012), pp. 87-102. ISSN: 0436-029X
- [18] *Techno wootz steel™ Damascus steel* [online]. 2001 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: http://www.angelsword.com/techno_wootz_steel.php
- [19] SMITH, C. S. (1981). *A Search for Structure: Selected Essays on Science, Art and History*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. ISBN 0-262-19191-1.
- [20] INOUE, T. *The Material, Manufacturing and Computer Simulation of the Quenching Process of a Japanese Blade*, [online]. [cit. 2015-4-21]. Dostupné z: <http://www.shibuiswords.com/tatsuoinoue.htm>
- [21] Metallography of some katana samples. [online], pp. 71-80. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: [http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/hokoku_pdf_2007/09.pdf]
- [22] *Binnární diagram Fe-C - Wikipedia the free encyclopedia, Wikipedia the free encyclopedia*. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fe-C-cs.svg>
- [23] *Arcelor Mittal – ferrite-microstructure*. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/images/large/Microstructure%20180%20BH.jpg>
- [24] *Phase transformation in steel*. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.metallpass.com/metaldoc/paper.aspx?docID=271>
- [25] *Martenzit, Wikipedia the free encyclopedia, Wikipedia the free encyclopedia*. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Martenzit#/media/File:Steel_035_water_quenched.png
- [26] *Bainit, Wikipedia the free encyclopedia, Wikipedia the free encyclopedia*. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bainit#/media/File:Dqsk-steel-bainitic-weld-tem-image.png>