

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PERSPEKTIVNÍ MATERIÁLY PRO SVAROVÉ A NÁVAROVÉ SPOJE
ODOLNÉ ABRAZIVNÍMU OPOTŘEBENÍ

ADVANCED MATERIALS FOR WELD JOINTS AND HARD
SURFACING RESISTANT TO ABRASIVE WEAR

AUTOR: Jakub Křivánek

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. Dr. Ing. Libor Beneš

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Křivánek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **420237**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Perspektivní materiály pro svarové a návarové spoje odolné abrazivnímu opotřebení

Název bakalářské práce anglicky:

Advanced materials for weld joints and hard surfacing resistant to abrasive wear

Pokyny pro vypracování:

- 1) Úvod do řešení problematiky, literární rešerše.
- 2) Charakteristika a přínosy návarových vrstev (princip, možnosti, aplikace).
- 3) Materiálová a pevnostní hlediska; technická řešení navařených spojů.
- 4) Experimentální část - materiálové analýzy provedených návarů.
- 5) Závěrečné vyhodnocení získaných výsledků.

Seznam doporučené literatury:

- [1] JANOVEC, J., CEJP, J., STEIDL, J. Perspektivní materiály. Učební texty, ČVUT v Praze, 2008, 143 s.
- [2] JANOUŠEK, M. Zařízení pro testování abrazivního opotřebení. [online]. [cit. 2017-2-24]. <
<http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5519.pdf> >
- [3] LANCASTER, J.F. Metallurgy of welding. 6th ed. Abington, Cambridge: Abington Pub, 1999, 356 s.
- [4] SUCHÁNEK, J., KUKLÍK, V., ZDRAVECKÁ, E. Abrazivní opotřebení materiálů. ČVUT v Praze, 2007, 162 s.
- [5] KAŠPAROVÁ, M., ZAHÁLKA, F., HOUDKOVÁ, Š. Hodnocení abrazivní a adhezivní odolnosti materiálů. Sborník konference Metal 2009. Tanger. 2009, s. 1-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

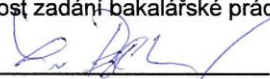
prof. Dr. Ing. Libor Beneš, ústav materiálového inženýrství FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27. 04. 2017

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: 31. 7. 2017


.....
Podpis

Anotace

První část práce se zabývá perspektivními materiály používanými v oblasti navařování, zejména pak ve vazbě na mechanismy a projevy abrazivního opotřebení. V experimentální části jsou pak vybrány a zkoumány návary na bázi oceli typu maraging z pohledu průběhů jejich tvrdosti a výsledných typů mikrostruktury.

Klíčová slova

Navařování, navařovací slitiny, opotřebení, abraze

Annotation

The first part of the thesis deals with advanced materials used in the field of hardfacing, especially in relation with the mechanisms and the signs of abrasive wear. In the experimental part, maraging steel based hardfacings are selected and examined in terms of their hardness and the resulting types of microstructure.

Keywords

hardfacing, hardfacing alloys, wear, abrasion

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Liboru Benešovi za odbornou spolupráci a vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat všem z Ústavu materiálového inženýrství, kteří mi pomohli s experimentální částí, zejména pak Ing. Janu Krčilovi a Ing. Vladimíru Márovi. V neposlední řadě děkuji zaměstnancům společnosti Castolin Eutectic, hlavně pak Ing. Tomáši Urbančíkovi.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

1. Úvod.....	8
2. Navařování.....	9
3. Technologie navařování.....	12
4. Návarové slitiny.....	15
4.1 Slitiny Fe-Cr-C.....	17
4.2 Slitiny na bázi kobaltu.....	18
4.3 Maraging oceli.....	20
5. Opotřebenění.....	21
6. Experimentální část.....	24
6.1 Popis experimentu.....	24
6.2 Metodika zpracování a příprava vzorků.....	25
6.3 Získané výsledky.....	28
6.4 Diskuse získaných výsledků a dílčí závěry.....	49
7. Závěr.....	52
8. Zdroje.....	54
Příloha.....	56

1. Úvod

Technologie navařování vychází ze svařování, na rozdíl od svařování však není jejím hlavním cílem nerozebíratelné spojení materiálů, ale úprava povrchu strojních součástí za účelem vylepšení odolnosti vůči opotřebení a mechanických vlastností, renovace poškozených součástí a prodloužení životnosti komponent strojů. Navařování je možné využít i ve výrobě, kdy se požadovaných vlastností dosáhne návarovým kovem a samotný dílec pak lze vyrobit z levnějších materiálů. Navařování představuje pro podniky potenciální úsporu nákladů, jelikož místo výměny celého stroje, nebo jeho větší části umožňuje opravení pouze opotřebené součásti a výměna tak není nutná. Návarové vrstvy lze nanést téměř všemi svařovacími metodami, od plamenného svařování, obloukové svařování až po svařování zdroji vysoké energie jako je laser nebo plazma.

Opotřebení materiálů představuje závažný problém, jelikož způsobuje selhávání součástí, které může vést k odstávkám ve výrobě a tím k znatelným finančním ztrátám. V průmyslu se vyskytuje několik mechanismů opotřebení, které mohou působit samostatně, ale ve většině případů působí v kombinaci s jinými druhy opotřebení. Na základě zjištěného druhu opotřebení je pak vybrána návarová slitina s požadovanými vlastnostmi, která bude navařena na opotřebovanou součást.

Cílem této práce je charakterizovat technologii navařování, popsat návarové slitiny používané zejména z důvodů ochrany vůči abrazivnímu opotřebení a vystihnout opotřebení materiálů se zaměřením na abrazi. V experimentální části jsou porovnány návary maraging ocelí firmy Castolin Eutectic zhotovené dvěma rozdílnými metodami – technologií obloukového svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X a technologií ručního obloukového svařování obalenou elektrodou Eutectrode®XHD6860.

2. Navařování

Navařování je metalurgický proces, při kterém se návarová slitina nanese na základní materiál, čímž vznikne nehomogenní struktura, která se v jednotlivých fázích liší a plynule přechází z nezměněné struktury základního materiálu, přes strukturu tepelně ovlivněné oblasti až do struktury svarového kovu. Od výsledné struktury materiálu se odvíjejí mechanické vlastnosti, ale také například odolnost vůči opotřebením. Díky velkým teplotním výkyvům navařovacího procesu vznikají v součásti pnutí, která mohou vést k vytvoření trhlin nebo také lomu. [1]

Navařováním se nanášejí speciální slitiny svařovacími procesy k vylepšení odolnosti vůči abrazi, korozi, vysoké teplotě nebo rázům. Návarové slitiny se nanášejí na celý povrch, hranu, nebo pouhý bod na opotřebované části. Návary mohou převzít funkce povrchu, obnovit povrch opotřebované součásti nebo také prodloužit jejich životnost. Navařování je všestranný proces k prodloužení životnosti opotřebované součásti, snižuje náklady na výměnu součástí, prostoje a odstávky strojů z důvodu výměny součástí. [2]

Navařená část může být považovaná za kompozit, se základním materiálem vybraným pro pevnost a ekonomičnost, a návarovým materiálem zvoleným podle podmínek opotřebením. Návar může být aplikován ve výrobě na novou součást, nebo může být použit k obnovení opotřebovaného povrchu součásti. Různé komponenty jako drtiče jsou vystaveny silnému opotřebením a vyžadují účinná opatření na ochranu povrchu, aby se zabránilo nákladným prostojům, a aby se snížily náklady na drahé náhradní díly. Navařovací proces byl přijat napříč mnoha odvětvími průmyslu jako jsou betonářství, hornictví, ocelářství, petrochemie, elektrárenský průmysl a další. [2]

Navařování je založeno na těchto principech – přidání uhlíku, přidání legujících prvků a/nebo rozptýlení tvrdých částic v měkké matici navařeného materiálu. Použití navařování k opravě opotřebovaných částí je cenově výhodnou alternativou výměny součástí, v mnoha případech bude návar odolnější vůči opotřebením než původní součást. Úspěšnost tohoto řešení závisí na správném

určení typu opotřebení, optimální volbě návarového materiálu k dané aplikaci a zároveň také na správném navaření součásti. Příklady navařování jsou na Obr. 1 a 2. [3]

Jedním z běžných přístupů hodnocení svařitelnosti materiálu je uhlíkový ekvivalent (CE), od kterého se odvíjejí případná opatření jako předeřev (příklad v Tab. 1) nebo kontrola teploty interpass. Například při opravě austenitických manganových odlitků je maximální teplota interpass 260°C. Preventivní opatření by měly být přijaty u aplikací, které jsou náchylné k praskání, a u součástí, které již byly navařeny, a také u vysoce namáhaných součástí. [3]

$$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$



Obr. 1: Vlevo – opotřebovaný vnitřní povrch řetězu; vpravo – opravený řetěz [3]

K dosažení kvalitního návaru je třeba kontrolovat zředění, které je geometrické a chemické. Geometrické ředění je funkcí výšky a hloubky návaru,

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

zatímco chemické ředění se vztahuje k obohacení prvky difundujícími ze základního materiálu směrem k návaru. Zejména u návarových slitin s vysokým obsahem legujících prvků je kontrola chemického zředění velmi důležitá tak, aby se dosáhlo dobrých tribologických vlastností. Je-li pro zajištění dobrého metalurgického spoje mezi návarem a základním materiálem nezbytné minimální zředění, nadměrné zředění neumožní uchování optimálního chemického složení a homogenních vlastností návaru. [4]

Uhlíkový ekvivalent CE	Doporučená teplota přehřevu [°C]
do 0,45	Volitelné
0,45 až 0,6	95 až 210
nad 0,6	210 až 370

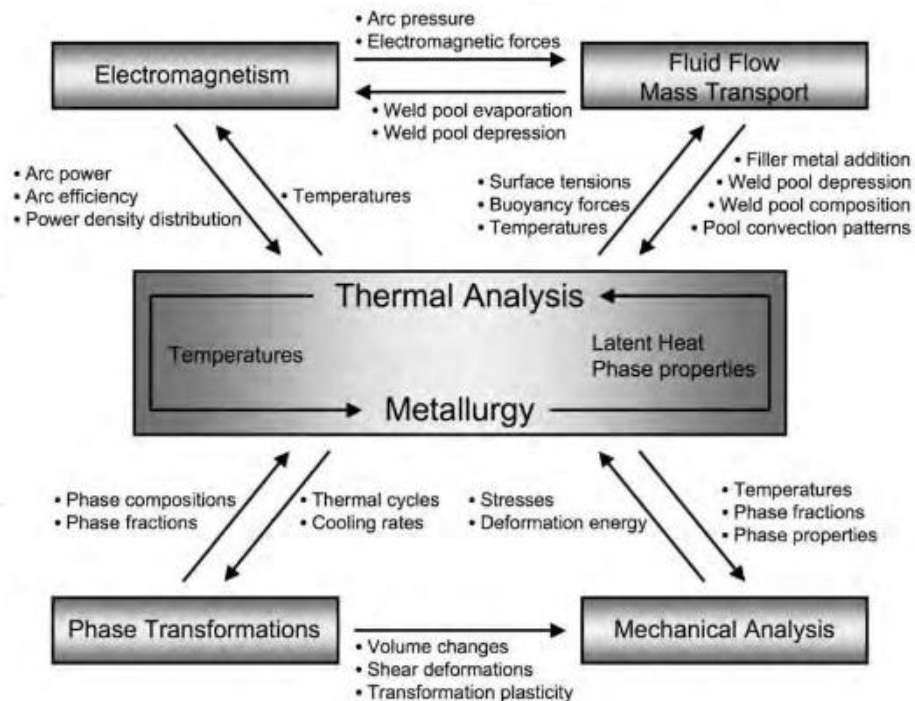
Tab. 1: Doporučené teploty přehřevu v závislosti na uhlíkovém ekvivalentu [3]



Obr. 2: Navařené boky lopaty rypadla [3]

Navařování představuje běžně používanou metodu k vylepšení vlastností povrchu zemědělských strojů, součástí důlních provozů, zařízení k obdělávání půdy a dalších těžkých strojů. Návarová slitina je svařovacími metodami rovnoměrně nanášena na povrch měkkého materiálu (většinou nízkouhlíkové oceli) za účelem zvýšení tvrdosti a odolnosti vůči opotřebení bez výrazné ztráty

tažnosti a houževnatosti základního materiálu. Návarové slitiny se používají v podmínkách extrémního abrasivního a erozivního opotřebení, jejich odolnost vůči opotřebení pramení zejména z vysokého objemového podílu karbidů, ačkoli houževnatost matrice k odolnosti také přispívá. Obr. 3 zobrazuje oblasti navařovacího procesu a jejich souvislost. [5], [6]



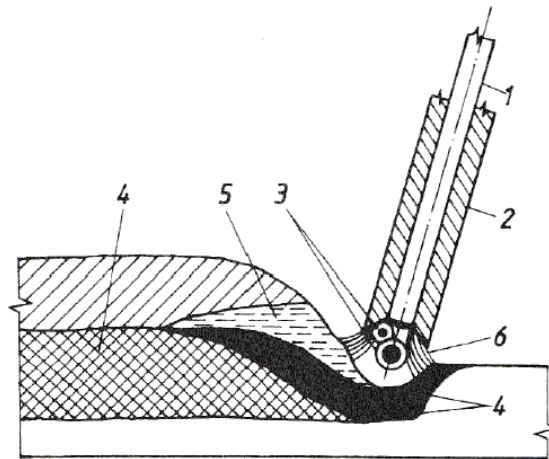
Obr. 3: Návaznost jednotlivých oblastí navařovacího procesu [1]

3. Technologie navařování

Návary mohou být nanесeny několika svařovacími metodami. Volba té nevhodnější závisí na mnoha faktorech jako: funkce komponentu, složení základního materiálu, velikost a tvar součásti, přístupnost svařovacího zařízení, stav opravovaného materiálu, počet stejných nebo podobných dílů, které budou navařovány a další. Nejvýznamnějšími rozdíly mezi svařovacími technikami jsou účinnost svařování, zředění návaru a výrobní náklady přídavných materiálů. [2], [7]

Mezi nejběžněji používané technologie navařování patří svařování kyslíko-acetylenovým plamenem (OAW), obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG), svařování pod tavidlem (SAW), svařování plazmou (PTA), obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním nebo inertním plynu (MAG, MIG) a ruční svařování obalenou elektrodou (MMA). [5]

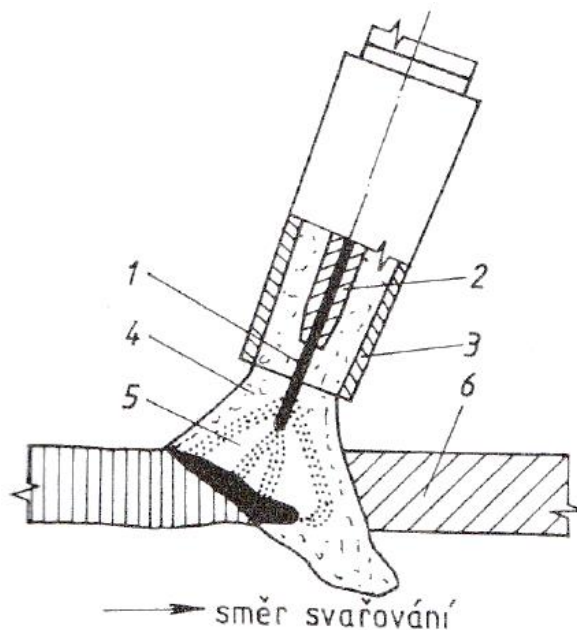
Při navařování ruční obalenou elektrodou určuje kvalitu návaru správná volba svařovacích parametrů jako velikost svařovacího proudu, délka oblouku, rychlost svařování a průměr elektrody. Elektrický oblouk, který vzniká mezi jádrem elektrody a základním materiálem, dodává teplo potřebné k natavení základního a přídavného materiálu. Teplota elektrického oblouku se pohybuje v rozmezí 5 100 až 5 700°C a závisí na druhu obalu elektrody a proudovém zatížení. Schéma svařování obalenou elektrodou je na Obr. 4. [8]



Obr. 4: Schéma svařování obalenou elektrodou; 1 - jádro, 2 – obal, 3 – roztavený přídavný materiál, 4 – svarový kov, 5 – struska, 6 – ochranná atmosféra [9]

Elektroda se skládá z jádra – kovové tyčky – a obalové hmoty, jejíž funkcí je usnadnit formování svarové housenky, zlepšit metalurgickou kvalitu svaru a zvýšit produktivitu svařování. Obal elektrody mimo jiné obsahuje struskotvorné a rafinační látky, plynotvorné a ionizační přísady a legury. Průměrný výkon roztavení u oceli je přibližně 2 kg/hod, proto navařování metodou obalené elektrody není vhodné tam, kde je nutné nanášet velké množství kovu. Produktivitu této metody lze zvýšit používáním elektrod větších průměrů, vysokovýkonných elektrod nebo optimalizací polohy využitím polohovadel. [9]

U metody obloukového svařování v ochranných atmosférách je svařovací drát ve funkci elektrody a zároveň přídavného materiálu automaticky přiváděn do svaru. Výhodou této metody je vysoká proudová hustota, která umožňuje dosáhnout hlubokého závaru při vysokých svařovacích rychlostech. Plyny chránící svarový kov před okolní atmosférou také podporují hoření oblouku. Nejčastěji používanými plyny u metody MIG jsou argon a helium. Jedná se o inertní plyny, to znamená, že nereagují se svarovou lázní. Vzhledem k vysoké ceně helia se využívá spíše aktivních plynů (metoda MAG) jako CO_2 a směsné plyny. Obr. 5 zobrazuje schéma MIG/MAG svařování. [9]

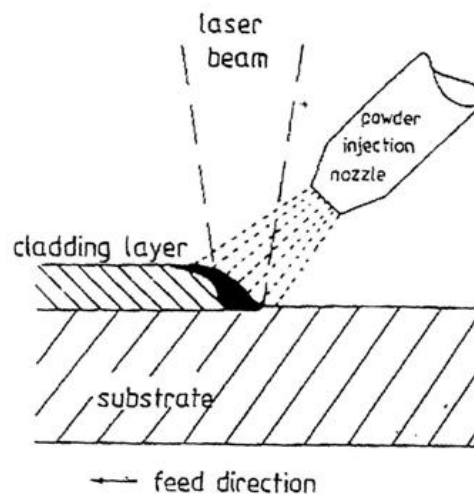


Obr. 5: Schéma svařování metodou MIG/MAG; 1 – přídavný materiál, 2 – přívod proudu, 3 – tryska ochranného plynu, 4 – ochranný plyn, 5 – oblouk, 6 – základní materiál [9]

Proces plazmového navařování vykazuje veliký potenciál, jelikož PTA návary mají nižší výrobní náklady a vyšší produktivitu ve srovnání s žárovými nástřiky, a není zde potřeba žádných speciálních úprav povrchu. Navíc technologie PTA umožňuje produkci vysoce kvalitních povlaků s dobrou metalurgickou vazbou a nízkou úrovní pórovitosti, skládajících se z kovové matrice a tvrdých karbidových fází. [10]

Laserové navařování (schéma na Obr. 6) bylo vyvinuto kvůli docílení tvrdých částic ve struktuře jako například WC, TiC, Cr_3C_2 nebo SiC, tyto částice

mají velmi vysokou tvrdost a dobrou odolnost vůči opotřebení. Během procesu laserového navařování je laserovým paprskem o vysoké energii roztaven návarový materiál a tenká vrstva základního materiálu, čímž dojde k vytvoření návaru specifické kvality s nízkým promíšením. Návarový materiál může být buď ve formě předem umístěného povlaku, nebo ve formě prášku, který je přiváděn do místa, kam směřuje laserový paprsek. [11], [12]



Obr. 6: Schéma laserového navařování s přidávaným materiálem ve formě prášku [12]

4. Návarové slitiny

Je dostupných mnoho různých navařovacích slitin a lze je rozdělit se do čtyř základních kategorií:

- Nízkolegované slitiny na bázi železa – obsahují až 12% legujících prvků, obvykle chrom, molybden a mangan.
- Vysokolegované slitiny na bázi železa – obsahují 12 až 50% legujících prvků. Kromě chromu, který je obsažen ve všech vysokolegovaných železitých slitinách, obsahují některé slitiny nikl nebo kobalt.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

- Slitiny na bázi kobaltu a na bázi niklu – obsahují relativně malé množství železa (1,3 až 12,5%). Z těchto slitin je nejvšestrannější a zároveň nejdražší slitina Co-Cr-W. Všechny slitiny na bázi kobaltu a na bázi niklu mají vysokou odolnost vůči korozi a oxidaci, mají nízký koeficient tření, a proto jsou obzvláště vhodné pro aplikace zahrnující opotřebení kov na kov, a jsou téměř vždy využívány při teplotách 550° nebo více.
- Materiály s karbidy wolframu – karbid wolframu je jedním z nejtvrdějších materiálů dostupných v průmyslu, zároveň je ale křehký. [2]

Výběr návarové slitiny je závislý na několika podmínkách, mezi něž patří:

- mechanismus opotřebení působící na součásti
- tribologické podmínky – zatížení, teplota a rázy
- srovnání s předchozími zkušenostmi
- kompatibilita se základním materiálem
- požadavky na tepelné zpracování a obrábění po navařování
- dostupnost materiálů, vybavení a kvalifikovaných osob
- náklady [3]

Materiál	Tvrдость dle Vickerse HV
Ferit	70 – 200
Perlit nelegovaný	250 – 320
Perlit legovaný	300 – 460
Austenit Cr-legovaný	300 – 600
Austenit nízkolegovaný	250 – 350
Nikl	560
Bainit	250 – 450
Martenzit	500 – 1010
Cementit	840 – 1100
Karbid chromu	1330 – 1700
Nitrid titanu	1800
Karbid wolframu	1900 – 2000
Karbid vanadu	2300
Karbid titanu	2500
Karbid boru	2800

Tab. 2: Tvrđosti nejběžněji používaných návarových materiálů [3]

Komerčně dostupných návarových slitin k ochraně proti opotřebení je široká škála, tvrdosti některých z nich udává Tab. 2. Návary s mikrostrukturou složenou z disperzních karbidů v matrici austenitu jsou značně používané pro aplikace s abrazivním opotřebením. Abrazivní odolnost návarových slitin závisí na mnoha faktorech jako je typ, tvar a rozložení tvrdých fází, ale i houževnatost matrice. Vzhledem k nízké ceně a dostupnosti jsou značně využívány elektrody bohaté na chrom, avšak dražší slitiny bohaté na wolfram nebo vanad nabízejí lepší výkon. Používají se i elektrody komplexních karbidů, zejména když je abraze doprovázena dalšími mechanizmy opotřebení. [5]

Nízkouhlíkové návarové slitiny na bázi železa jsou většinou vybírány do aplikací zahrnujících mírné abrazivní opotřebení a rázové zatížení, zatímco nadeutektické návarové slitiny s vyšším obsahem uhlíku jsou využívány v podmínkách těžkého abrazivního opotřebení a omezených rázů kvůli nižší lomové houževnatosti. [4]

Cermety jsou charakteristické kombinací tvrdosti keramiky a lomové houževnatosti kovu. Cermety na bázi karbidu wolframu (WC) mají vysokou jak tvrdost, tak i lomovou houževnatost, díky tomu jsou vhodné do podmínek těžkého opotřebení například jako řezné nástroje, avšak při teplotách nad 500°C degradují. Potenciálně vhodnou keramickou fází jsou karbidy chromu a to díky výborné odolnosti proti oxidaci, často jsou využívány ve vysokoteplotních aplikacích vyžadujících vysokou odolnost vůči opotřebení, korozi a oxidaci. [10]

4.1 Slitiny Fe-Cr-C

Slitiny Fe-Cr-C jsou známé vysokou tvrdostí a výbornou odolností vůči opotřebení a korozi, mají podeutektickou, eutektickou nebo nadeutektickou strukturu. Nadeutektická slitina se považuje za odolnější vůči opotřebení než podeutektická, a to proto, že se její mikrostruktura skládá z primárních M_7C_3 karbidů a eutektické ($\gamma + M_7C_3$). Silné karbidotvorné prvky vanad, niob a titan přispívají k jemnější mikrostruktuře a vylepšují odolnost vůči opotřebení slitin Fe-Cr-C. [13]

Fe-12~35Cr-C bíle litiny jsou využívány jako návarové slitiny, mají vysokou hodnotu tvrdosti díky vysokému obsahu M_7C_3 , který je obklopen relativně měkkým austenitem. To je důvod šíření trhlin podél rozhraní austenitu a M_7C_3 , což představuje závažný problém. Návarové slitiny Fe-28Cr-C jsou používány pro součásti, které jsou vystaveny tvrdým podmínkám abrazivního opotřebení, v mikrostruktuře této návarové slitiny je přítomné velké množství karbidů typu $M_{23}C_6$. Matricí těchto slitin je Cr-Fe s kubickou prostorově středěnou mřížkou (bcc). [6]

Legováním návarových slitin Fe-Cr-C dalšími karbidotvornými prvky, jako například niobem, vanadem, molybdenem nebo wolframem, výrazně ovlivňuje chemické složení a rozložení karbidových fází a tedy i mechanické vlastnosti a pevnost matrice. Aby byla dosažena dobrá odolnost proti opotřebení, je nutné optimalizovat legující prvky a získat dobrou kombinaci tvrdých karbidů a houževnaté matrice. O tvrdosti Fe-Cr-C návarových slitin rozhodují především mikrostruktura matrice a objemový podíl tvrdých karbidových částic. Tvorbu austenitu a objemový podíl karbidů nejvíce ovlivňuje obsah uhlíku. [14]

Přidáním přibližně 6% niobu do návarového kovu se zvýší tvrdost a zvýší se i odolnost proti opotřebení. S mírným přidáním wolframu a vanadu do návarového kovu se tvrdost a odolnost proti opotřebení zvyšuje. S dalším mírným přídatkem wolframu a vanadu se tvrdost dále zvyšuje, ale již není tak výrazný rozdíl v odolnosti proti opotřebení. Niob v návarovém kovu zvyšuje tvrdost karbidů tvorbou primárního karbidu, zatímco vanad a wolfram zpevňují jak matrici, tak karbidy, a také tvoří primární karbidy. [14]

4.2 Slitiny na bázi kobaltu

Existují dvě alotropické fáze kobaltu: šesterečná těsně uspořádaná mřížka (hcp, ϵ), která je stabilní při teplotách do 417°C , a kubická plošně středěná mřížka (fcc, α), která je stabilní za vyšších teplot až do teploty tavení 1495°C . Transformace mezi těmito fázemi je pomalá. Důvodem tohoto faktu je velmi nízká změna volné energie spojená s transformací. Kobalt a jeho slitiny se za pokojové

teploty typicky vyskytují v metastabilní fcc mřížce a to právě díky pomalosti transformace. Výskyt transformace mezi hpc a fcc v kobaltových slitinách je potenciálním zdrojem vylepšení vlastností opotřebení, například hcp fáze, ať už samotná nebo v kombinaci s fcc fází, může poskytnout více odolný materiál. [15]

Slitina Stellite 6 (ERCoCr-A) obvykle vykazuje dendritickou strukturu bohatou na kobalt s okolní složkou tvořenou eutektickými karbidy typu M_7C_3 bohatými na chrom s pravděpodobným složením $(Cr\ 0,85, Co\ 0,14, W\ 0,01)_7C_3$ s hexagonální krystalickou strukturou. [15]

Slitiny s vysokým obsahem uhlíku jsou nadeutektické a obsahují primární karbidy M_7C_3 , které mají hexagonální tvar a jsou značně větší než eutektické karbidy. Slitiny s vysokým obsahem uhlíku také obsahují karbidy typu M_6C , jejichž pravděpodobné složení se může lišit od $(Co,W)_6C$ do $(Co_{0,66},W_{0,34})_6C$. [15]

Součásti navařené slitinami Stellite běžně pracují při vysoké teplotě a za cyklického provozu. Aby se minimalizovaly nepříznivé koncentrace napětí vznikající v důsledku odlišné tepelné roztažnosti na rozhraní návaru a základního materiálu, může být návar oddělen od základního materiálu vyrovnávací (přechodovou) vrstvou. Tím se dosáhne funkčně odstupňovaného materiálu, ve kterém má vyrovnávací vrstva střední průběh tepelné roztažnosti vzhledem k základnímu materiálu a návarové vrstvě. V některých elektrárnách jsou pro návarové slitiny Stellite 6 používány vyrovnávací vrstvy ze slitiny Stellite 21, avšak v průběhu provozu začaly vykazovat známky poškození a praskání. [16]

Slitiny na bázi kobaltu značky Stoodite jsou odolné vůči opotřebení za tepla i v korozním prostředí. Slitina Stoodite 1 má díky vyššímu obsahu uhlíku relativně vysoký objemový podíl karbidů, je tak odolná vůči abrazivnímu opotřebení, ale má menší pevnost. Nejběžněji se používá slitina Stoodite 6, která má výbornou odolnost vůči opotřebení v širokém pásu teplot. Slitina Stoodite 12 má podobné složení jako Stoodite 6, liší se pouze obsahem karbidů, který je u slitiny Stoodite 12 vyšší. Stoodite 21 je slitina kobaltu, chromu a molybdenu s nízkým obsahem uhlíku. Stoodite 21 je odolná vůči oděru, kavitačnímu opotřebení, vysokým teplotám a korozi. [1]

Kobalt, materiál matrice Stellite slitin, je těžký emitör γ -záření, proto se součást navařená slitinami Stellite po provozu v radioaktivním prostředí stává zdrojem radioaktivního záření a její oprava a další manipulace může pracovníkům způsobit nadbytečnou dávku ozáření. Ve skutečnosti je Co^{60} největším přispěvatelem ozáření obsluhy jaderných elektráren. Z těchto důvodů se v jaderném průmyslu nedoporučuje používat návarové slitiny na bázi kobaltu. Také kvůli vysokým cenám kobaltu je i v jiných odvětvích průmyslu snaha o využití návarových slitin na bázi méně nákladných materiálů, například železa a niklu. [12]

4.3 Maraging oceli

Maraging oceli, odvozené ze slitiny Fe-18%Ni dolegováním kobaltem, molybdenem, titanem a hliníkem, získávají svou vysokou tvrdost vytvrzováním nízkouhlíkového niklového martenzitu intermetalickými fázemi Ni_3Ti . Obsah uhlíku těchto ocelí je velmi nízký, mezi 0,01 a 0,03%. Maraging oceli jsou kaleny z rozpouštěcích teplot 800 až 840°C nejčastěji do oleje, tím vznikne měkký niklový martenzit. Takto zakalené maraging oceli dosahují nejlepších technologických vlastností jako například obrobiteľnosť nebo svařitelnost. Následuje vytvrzování při teplotách mezi 450 a 550°C, v důsledku prudkého zpevnění roste mez kluzu přibližně 2,5krát. [17]

Pro dosažení optimální pevnosti a houževnatosti je maximální množství některých prvků omezeno – uhlík 0,03%, křemík 0,1%, mangan 0,1%, síra 0,01% a fosfor 0,01%. Název maraging ocelí je odvozen od tepelného zpracování, které zahrnuje stárnutí (age hardening) nízkouhlíkového martenzitu. [18]

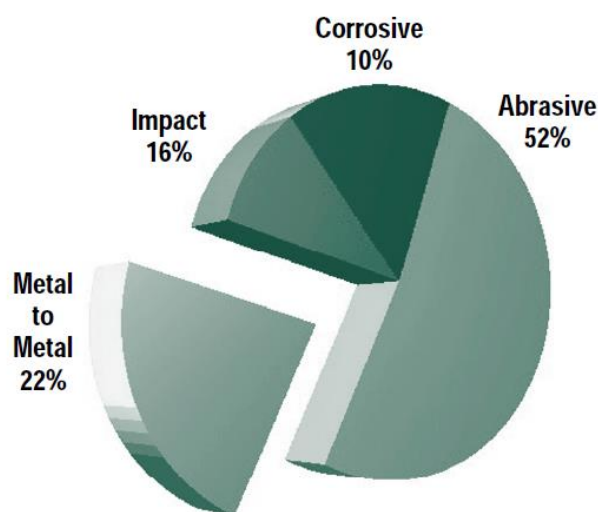
Maraging oceli mají široké možnosti využití, vhodné jsou zejména v jaderné a letecké oblasti díky kombinaci vysoké meze kluzu a houževnatosti. Třída 18Ni maraging oceli byla vyvinuta v 60. letech 20. století společností International Nickel Co., obsahovala 18,9% Ni, 7% Co, 3,8% Mo a Fe. U maraging ocelí nedochází po stárnutí k rozměrovým změnám, díky nízkému

obsahu uhlíku jsou také rozměrově stabilní během transformace austenitu na martenzit. [19]

5. Opotřebení

Navařování ochranné vrstvy svařovacími metodami se využívá zejména k opravám opotřebovaných součástí, ale také ve výrobě nových komponent, kde by celá konstrukce ze slitin odolných vůči opotřebení byla nepraktická nebo příliš nákladná. Návary jsou obecně nanášeny na ta místa, která jsou vystavena největšímu opotřebení. Je velmi důležité zjistit povahu opotřebení v daných podmínkách, jelikož výběr materiálu a případná opatření ke zvýšení odolnosti vůči opotřebení budou kriticky záviset na povaze procesu opotřebení. [15]

Definice opotřebení podle OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) zní následovně: „Postupná ztráta materiálu z funkční plochy tělesa, ke které dochází v důsledku relativního pohybu na povrchu tělesa“. Ve většině případů působí vzájemně hned několik mechanismů opotřebení. Nejčastěji vyskytovaným opotřebováním v průmyslu je abrazivní opotřebení, které tvoří přibližně 52% veškerého opotřebení. Druhým v pořadí je adheze, neboli opotřebení kov-kov, představující pouhých 22%, další druhy jsou vyobrazeny na Obr. 7. [3]



Obr. 7: Poměr druhů opotřebení [3]

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

Rabinowicz v roce 1965 identifikoval čtyři hlavní druhy opotřebení: adhezi, abrazi, korozi a povrchovou únavu. V roce 1980 uvedli Davies a Bolton šest druhů opotřebení: adhezi, abrazi, erozi, kontaktní únavu, kavitační a korozní opotřebení. A roce 1985 výzkumní pracovníci z International Research and Development identifikovali tyto hlavní typy opotřebení: adhezivní, abrazivní, únavové a kombinované typy opotřebení. [15]

K opotřebení materiálů dochází vzájemným působením funkčních povrchů. Opotřebením dochází k úbytku materiálu, změně jakosti povrchu nebo i tvaru povrchu součástí. V důsledku opotřebení je zhoršována funkce součástí, což může vyústit v její selhání. Z tohoto důvodu způsobuje opotřebení velké hospodářské ztráty. [20]

K opotřebení kov na kov dochází, když dva kovové povrchy po sobě kloužou za působení tlaku. Abrazivní opotřebení je způsobováno nekovovými částicemi, které kloužou nebo se valí po kovovém povrchu za působení tlaku. Tento typ opotřebení je ovlivňován vlastnostmi opotřebovávaného i abrazivního materiálu a povahou interakce mezi nimi. [3]

Rabinowicz stanovil, že k abrazivnímu opotřebení dochází, když drsný tvrdý povrch, nebo měkký povrch s obsahem tvrdých částí, klouže po měkčím povrchu a vytváří v něm rýhy. Vědci z International Research and Development popsali abrazivní opotřebení jako odstraňování materiálu z povrchu tvrdším materiálem, který se dotýká, nebo se pohybuje po povrchu pod zatížením. Tvrdší materiál se vtiskne do povrchu a v závislosti na vlastnostech materiálu, typu pohybu a zatížení může odebrat materiál. Dochází i k abrazivnímu opotřebení materiálů podobné tvrdosti. Abrazivní opotřebení je znázorněno na Obr. 8. [15]

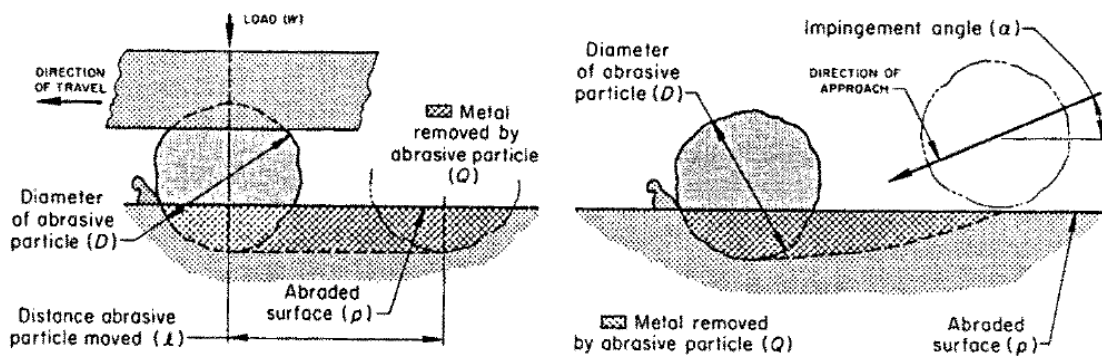
Pokud se abrazivní materiál pohybuje po povrchu bez významných nárazů, pak se opotřebením způsobené zařezávání nebo zadírání nazývá nízkonapěťová abraze. Lze ji také definovat jako opotřebení, které vede k zařezávání posouvajících se abrazivních částic při napětích nižších než pevnost v tlaku. Výsledný vzorek opotřebení obvykle vykazuje škrábance a množství podpovrchové deformace je minimální. [15]

Podle zjednodušené teorie abrazivního opotřebení je objemová ztráta Q přímo úměrná použitému zatížení N a nepřímo úměrná tvrdosti opotřebovaného materiálu H . [3]

$$Q = \frac{N}{H}$$

Hlavním důsledkem abrazivního opotřebení je rýhování a odřezávání částic na povrchu zasaženého materiálu. Mikrořezání je odebrání malých třísek z povrchu tělesa tvrdými částicemi. Většina abrazivních částic vytváří na povrchu rýhy. Je odhadováno, že pouze 10% částic způsobuje mikrořezání. [20]

Odolnost materiálů vůči abrazivnímu opotřebení se zjišťuje zkouškou s volným abrazivem, nebo zkouškou s vázaným abrazivem. Zkouška volným abrazivem probíhá na rotujícím pryžovém kotouči, na který se nasypají abrazivní částice, nebo se abrazivní částice naplní do bubnu. Zkouška s vázaným abrazivem využívá brusiva spojeného pojivem k brusnému povrchu, který koná pohyb a tím dochází k opotřebení. [20]



Obr. 8: Idealizované znázornění abrazivního opotřebení vznikajícího z mechanického (vlevo) a kinetického (vpravo) působení sil na abrazivní částici [3]

6. Experimentální část

6.1 Popis experimentu

Cílem práce je zhodnotit strukturu a tvrdost vzorků (Obr. 9), které byly ve spolupráci s firmou Castolin Eutectic navařeny návary z maraging oceli na základní materiál S235JRG1 (ČSN 42 0002 11 373). První vzorek byl navařen technologií obloukového svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu (MAG) trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X. Druhý vzorek byl navařen technologií ručního obloukového svařování obalenou elektrodou (MMA) elektrodou EutecTrode®XHD6860. Svařovacím zdrojem byl v obou případech TotalArc² 5000. Každý vzorek byl navařen jednou, dvěma a třemi svarovými housenkami.



Obr. 9: Navařené vzorky; nahoře návar EnDOtec® DO*360X metodou MAG, dole návar EutecTrode®XHD6860 metodou MMA; zleva jednovrstevný, dvouvrstevný a třívrstevný.

6.2 Metodika zpracování a příprava vzorků

Pro navaření metodou MAG byla použita trubičková elektroda EnDOtec® DO*360X (na Obr. 10) o průměru 1,6mm. Jako ochranná atmosféra byl využit směsný plyn 2,5% CO₂ v Ar, průtok plynu byl nastaven na 16 l/min. Parametry navařování byly nastaveny na: velikost svařovacího proudu 160 A, napětí 19 V a přísuv drátu na 4,8 m/min. Chemické složení EnDOtec® DO*360X není výrobcem specifikováno.



Obr. 10: Cívka, na které je navinut trubičkový drát EnDOtec® DO*360X

U metody ručního svařování obalenou elektrodou byla použita elektroda EutecTrode®XHD6860 (Obr. 11) o průměru 3,2 mm. Svařovací proud byl nastaven na 90 A, napětí na 100 V. Chemické složení elektrody udává Tab. 3.

C	Si	Mn	Co	Mo	Ni	Ti	Fe
<0.03%	0.29%	0.10%	14.9%	14%	10.7%	0.06%	Balance

Tab. 3: Chemické složení elektrody EutecTrode®XHD6860 dané v materiálových prospektech

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství



Obr. 11: Elektroda EutecTrode®XHD6860

Po navaření a hrubém vybroušení návaru byly naměřeny hodnoty tvrdosti přenosným tvrdoměrem DHT-100, poté byly vzorky ještě jednou vybroušeny a znovu byla naměřena tvrdost. Následovalo tepelné zpracování - stárnutí při 555°C po dobu 3 hod. Po tepelném zpracování byla změřena tvrdost tepelně zpracovaných vzorků. Tvrdosti jsou zaznamenány v Tab. 6, 7 a 8.

V laboratoři Ústavu materiálového inženýrství na Karlově náměstí v Praze byly vzorky nařezány na metalografické pile Leco MSX255 kotouči Buehler 95-B-2202 250x1,8x32 mm a Buehler 10251OP 254x1,5x32 mm. Vzorky od sebe byly nejprve odděleny podélnými řezy, poté byly příčnými řezy nařezány přibližně 10 mm silné výřezy. Ty byly následně zality do vaniček akrylátovou pryskyřicí Varidur 200 s činidlem Varidur (Obr. 12).



Obr. 12: Vzorky zalité akrylátovou pryskyřicí

Následovalo broušení vzorků nejprve na brusce/leštičce Leco GPX300 brusnými kotouči o zrnitosti 60, 120 a 320 při 250 ot/min. Poté pokračovalo broušení na brusce MTH Kompact 1031 brusnými kotouči o zrnitosti 600, 1000

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

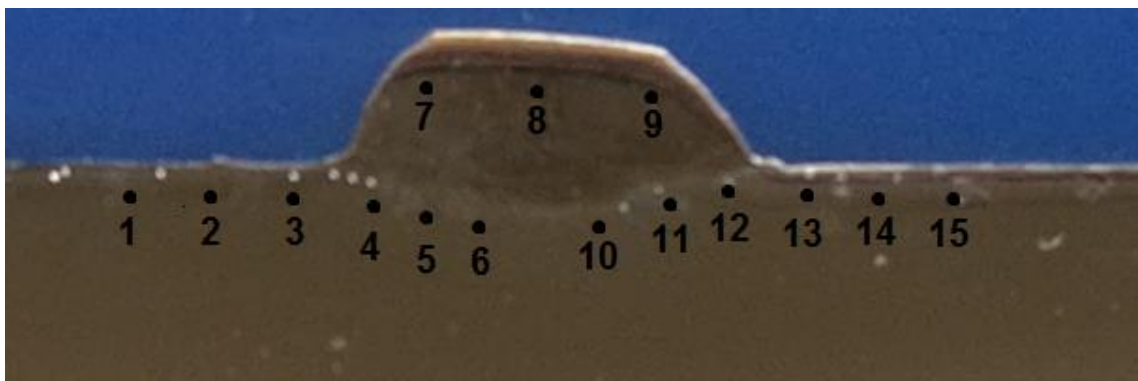
Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

a 2500 při 200 ot/min. Po každém jemném broušení byly vzorky omyty vodou a lihem a následně byly vysušeny fénem.

Po broušení byly vzorky naleštěny na brusce/leštičce Leco GPX300 nejprve diamantovou suspenzí o velikosti zrna 3 μm se smáčedlem na bázi alkoholu přibližně 30 min při 150 ot/min, poté byly vzorky leštěny suspenzí Silica 6 až 10 min při 180 ot/min. Silica vzorky lehce naleptala.

Následně byly vzorky naleptány Nitalem, 2% HNO_3 v etanolu, každý vzorek přibližně 3 sekundy a poté byla pozorována mikrostruktura návarů na metalografickém mikroskopu Zeiss Neophot 32 vybaveného CCD kamerou.

Nakonec byly naměřeny průběhy mikrotvrdosti v návaru, tepelně ovlivněné oblasti a základním materiálu. Měření bylo provedeno na mikrotvrdoměru LECO M-400-G1 při zatížení 0,5 kp (4,905 N) s dobou zatížení 5 sekund. Na Obr. 13 jsou vyznačena místa vtisku diamantového indentoru typu Vickers na jednovrstvém návaru EnDOtec® DO*360X, průběh mikrotvrdostí ostatních vzorků byl měřen v přibližně stejných místech.



Obr. 13: Vyznačení míst vtisku diamantového indentoru Vickers

Ručním spektrometrem BAS DELTA byl ověřen základní materiál, jedná se o běžnou nízkouhlíkovou ocel, pravděpodobně S235JR. Přístroj ocel vyhodnotil jako S275JR, nicméně ruční spektrometr neměří obsah uhlíku a není dostatečně přesný, aby dokonale rozeznal oceli s podobným složením. Dále bylo zjištěno přibližné chemické složení návarů EnDOtec® DO*360X (Tab. 4) a EutecTrode®XHD6860 (Tab. 5).

6.3 Získané výsledky

Tab. 4 a 5 uvádí přibližné chemické složení návarů EnDOtec® DO*360X a EutecTrode®XHD6860 naměřené ručním spektrometrem BAS DELTA.

Prvek	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo
Obsah %	0,34	0,051	0,11	65,23	14,15	9,3	10,82
Odchylka	±0,02	±0,01	±0,01	±0,1	±0,07	±0,08	±0,04

Tab. 4: Přibližné chemické složení návaru EnDOtec® DO*360X

Prvek	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Mo	Ti
Obsah %	0,64	0,12	0,26	61,03	14,24	9,96	13,54	0,22
Odchylka	±0,02	±0,01	±0,02	±0,1	±0,07	±0,08	±0,04	±0,04

Tab. 5: Přibližné chemické složení návaru EutecTrode®XHD6860

V následujících tabulkách jsou tvrdosti naměřené na vrchu návaru přenosným tvrdoměrem DHT-100. Toto zařízení není nejpřesnější, a proto se jedná spíše o orientační hodnoty. Průměrné tvrdosti byly vypočítány po vyškrtnutí nejvyšší a nejnižší hodnoty.

Tvrdosti v HRC		Číslo měření					Ø
		1	2	3	4	5	
DO360	jednovrstevný	32,7	30,7	25,4	26,6	28,5	28,6
	dvouvrstevný	25	24,7	29,7	20	25,7	25,1
	třívrstevný	25,4	25,7	25	29,1	25,5	25,5
6860	jednovrstevný	27,3	31,3	30,4	24,1	34,5	29,6
	dvouvrstevný	28,5	31,6	30,4	31,6	24,1	30,2
	třívrstevný	23,4	26,3	34,5	28,5	26,6	27,1

Tab. 6: Tvrdosti naměřené tvrdoměrem DHT-100 po prvním hrubém broušení

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

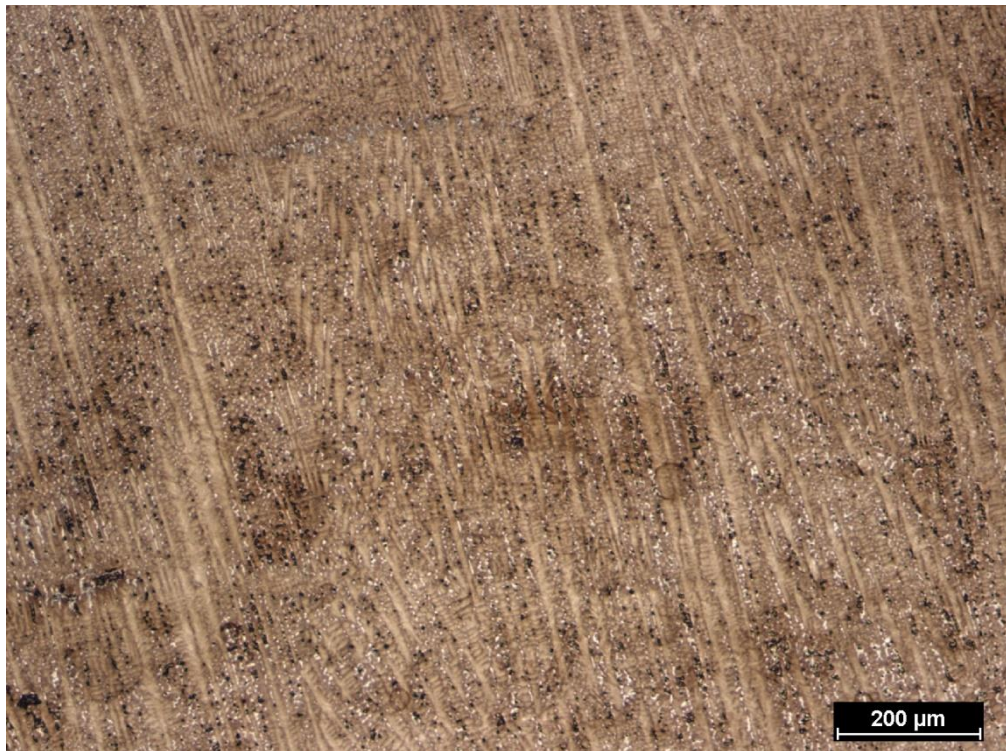
Tvrlosti v HRC		Číslo měření					Ø
		1	2	3	4	5	
DO360	jednovrstevný	31,9	32,7	31,6	33,6	33,3	32,6
	dvouvrstevný	30,4	30,7	33,9	32,1	29,7	31,1
	třívrstevný	29,7	29,4	28,5	27,3	27,9	28,6
6860	jednovrstevný	36,2	34,2	35,1	37,6	34,2	35,2
	dvouvrstevný	34,8	36,7	34,8	36,5	34,2	35,4
	třívrstevný	33,3	34,8	35,9	32,7	35,3	34,5

Tab. 7: Tvrlosti naměřené tvrdoměrem DHT-100 po druhém vybroušení

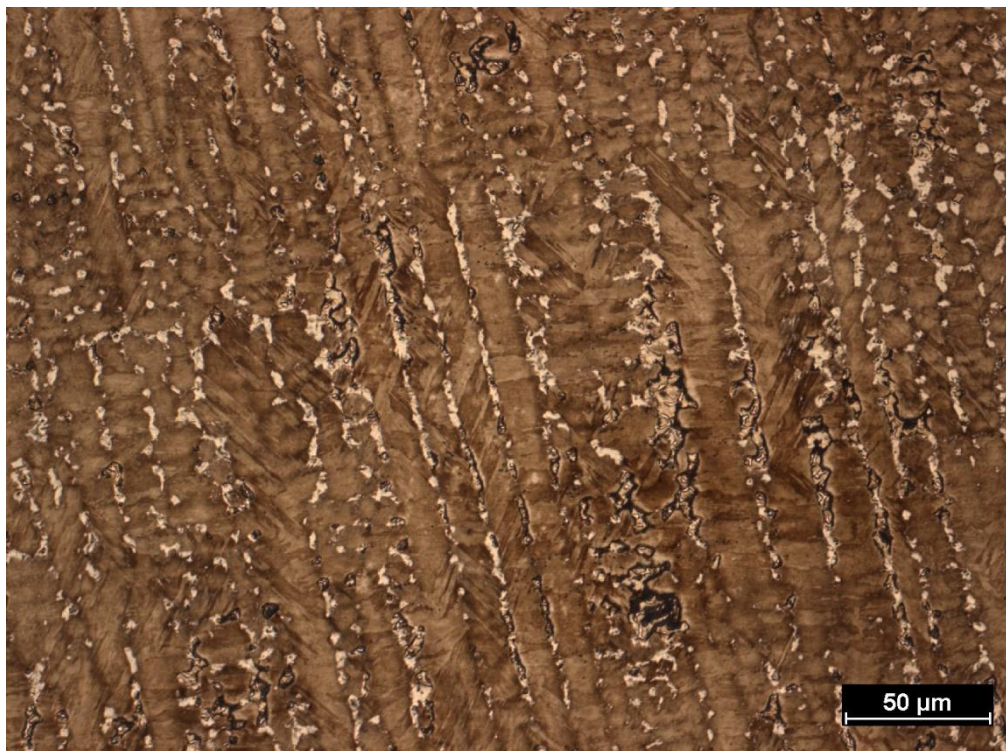
Tvrlosti v HRC		Číslo měření					Ø
		1	2	3	4	5	
DO360	jednovrstevný	51,7	51,9	49,4	49,1	43,4	50,1
	dvouvrstevný	42,9	47,4	46,9	45,2	48,6	46,5
	třívrstevný	43,4	42,1	41,6	41,6	42,9	42,2
6860	jednovrstevný	55,8	54,7	54,2	56,7	55,1	55,2
	dvouvrstevný	54,2	53,1	54,9	51,9	55,1	54,1
	třívrstevný	54	52,2	51,5	54,7	50,3	52,8

Tab. 8: Tvrlosti naměřené tvrdoměrem DHT-100 po tepelném zpracování

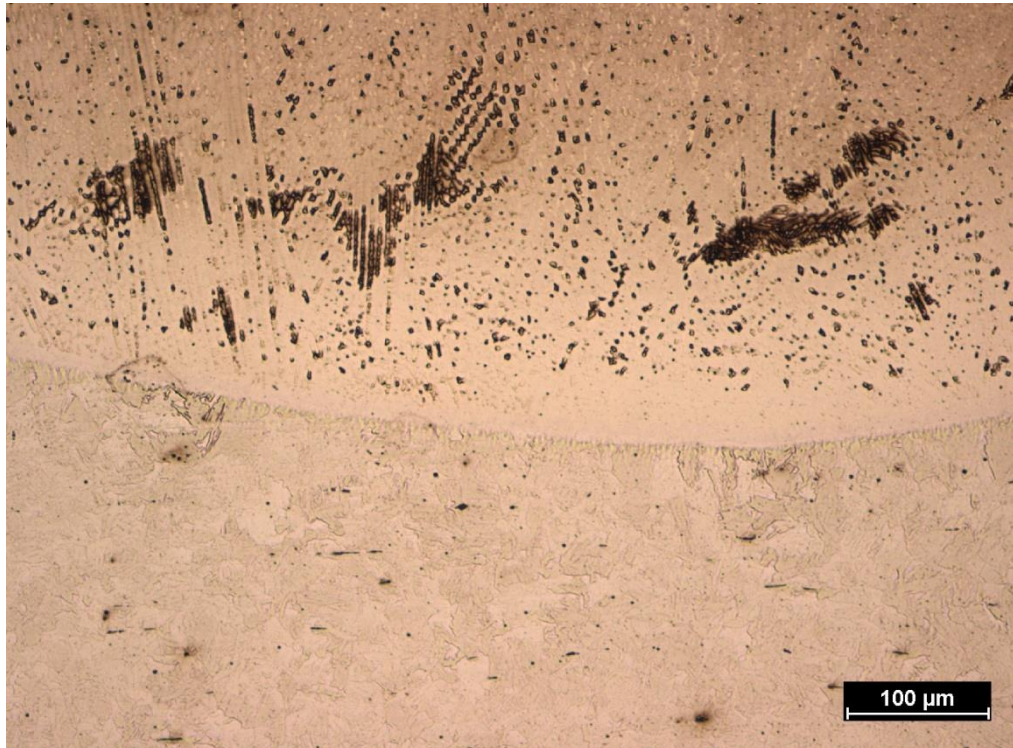
Mikrostruktura jednovrstvého návaru trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu je na Obr. 14 až 17.



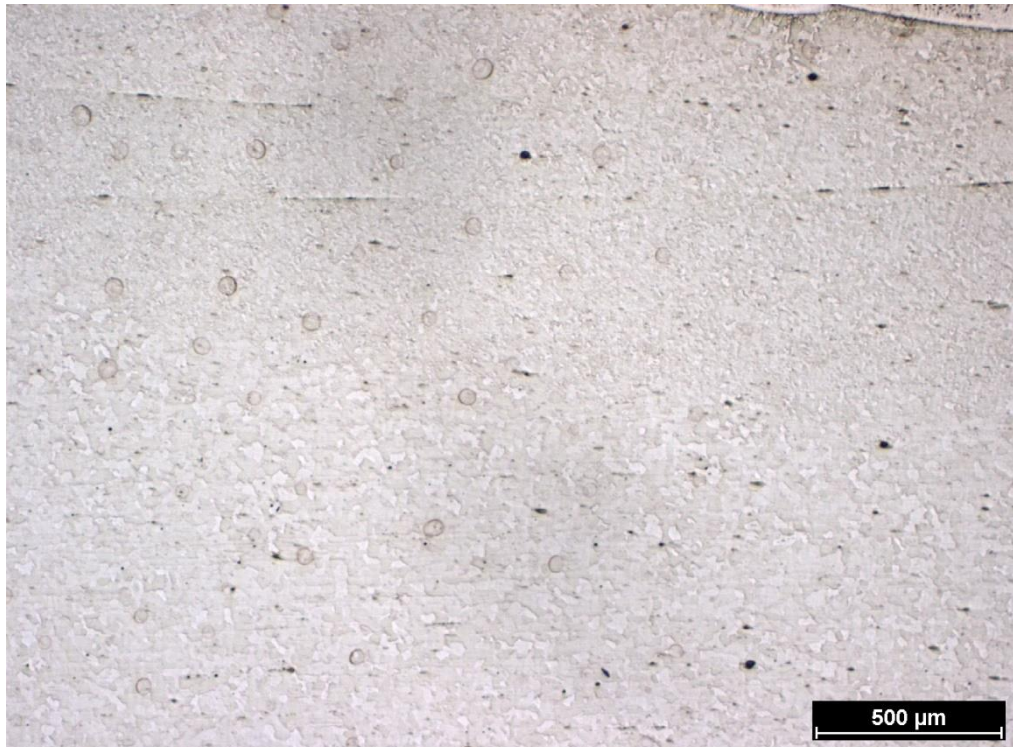
Obr. 14: Mikrostruktura jednovrstvého návaru EnDOtec® DO*360X, zvětšení 50x



Obr. 15: Mikrostruktura jednovrstvého návaru EnDOtec® DO*360X, zvětšení 200x

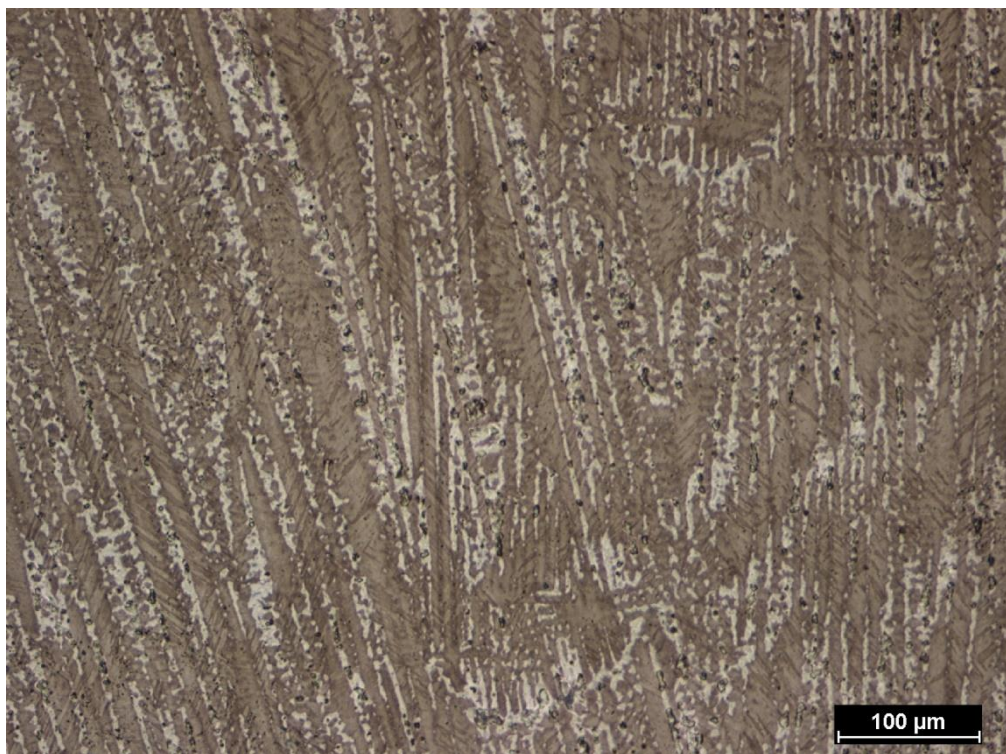


Obr. 16: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 100x

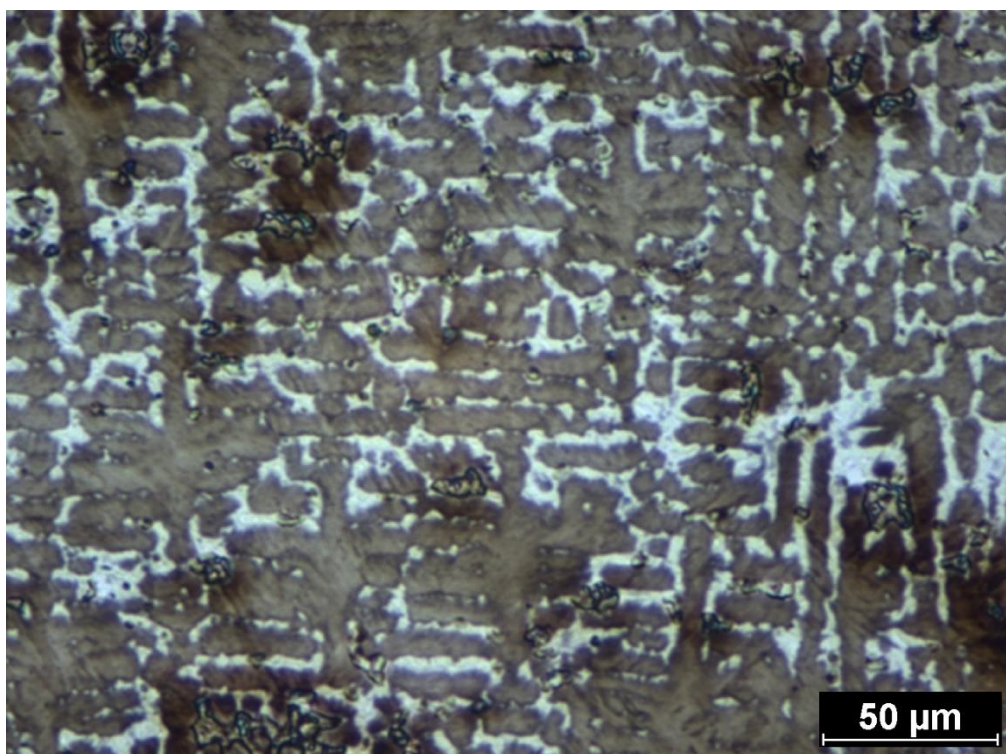


Obr. 17: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 25x

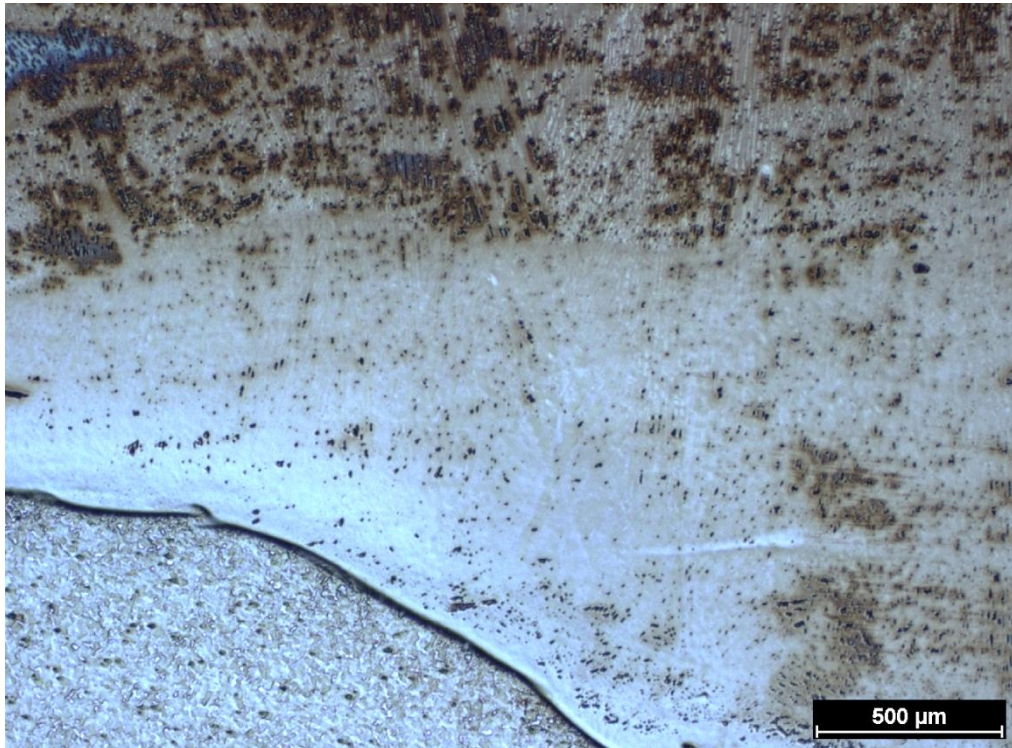
Mikrostruktura dvouvrstvého návaru trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu je na Obr. 18 až 21.



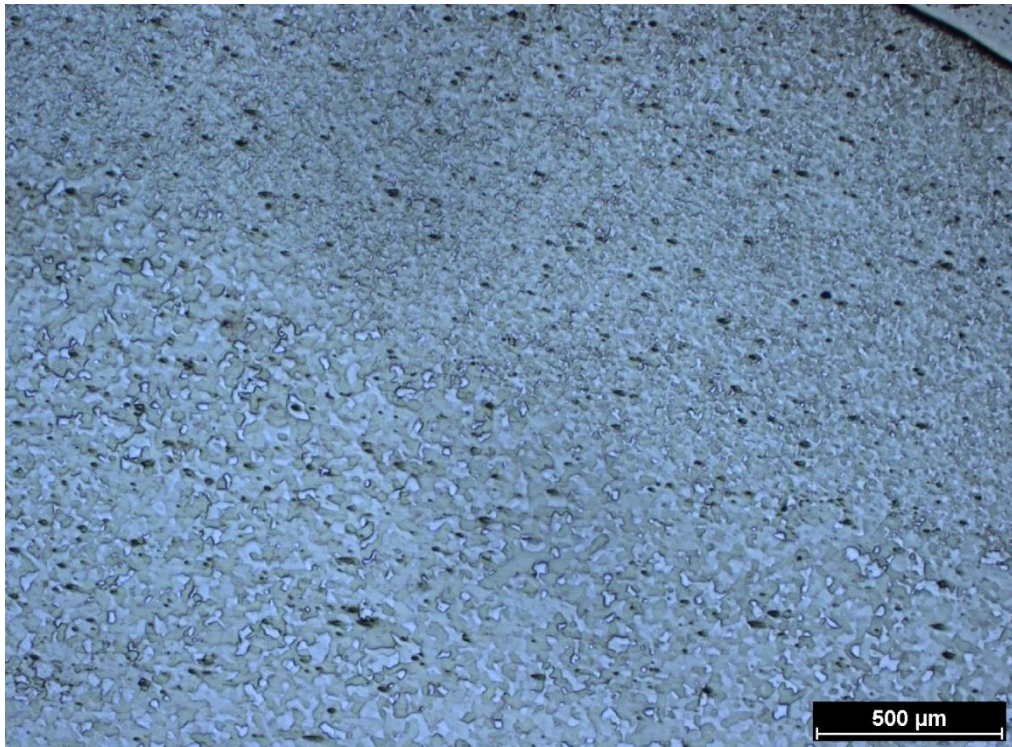
Obr. 18: Mikrostruktura dvouvrstvého návaru EnDOtec® DO*360X, zvětšení 100x



Obr. 19: Mikrostruktura dvouvrstvého návaru EnDOtec® DO*360X, zvětšení 250x

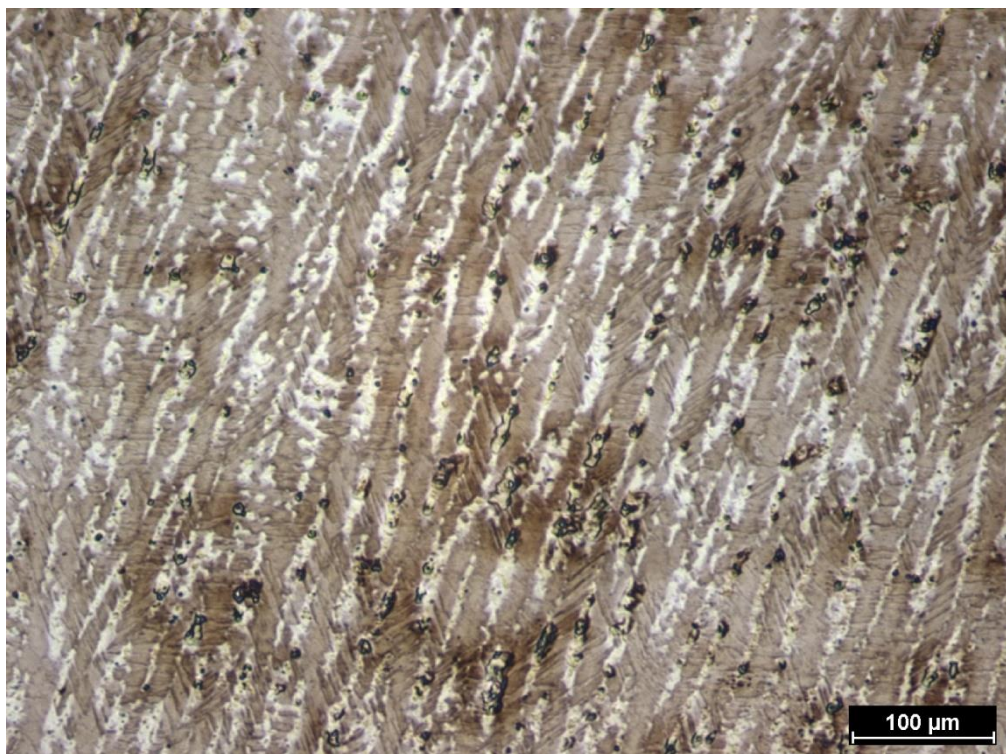


Obr. 20: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 25x

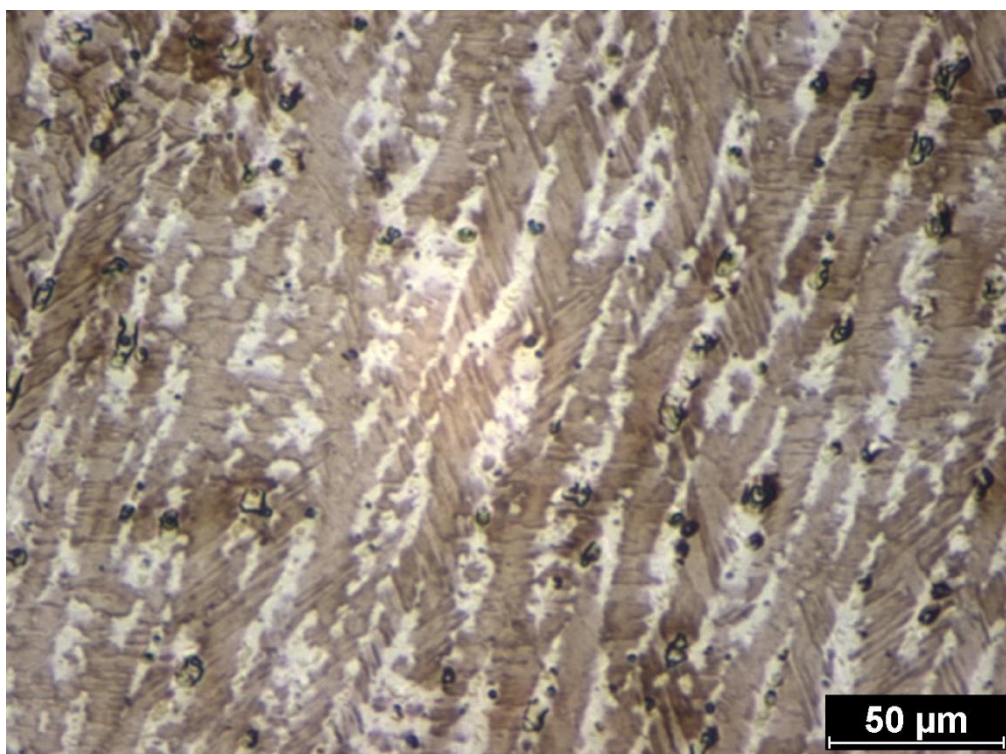


Obr. 21: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 25x

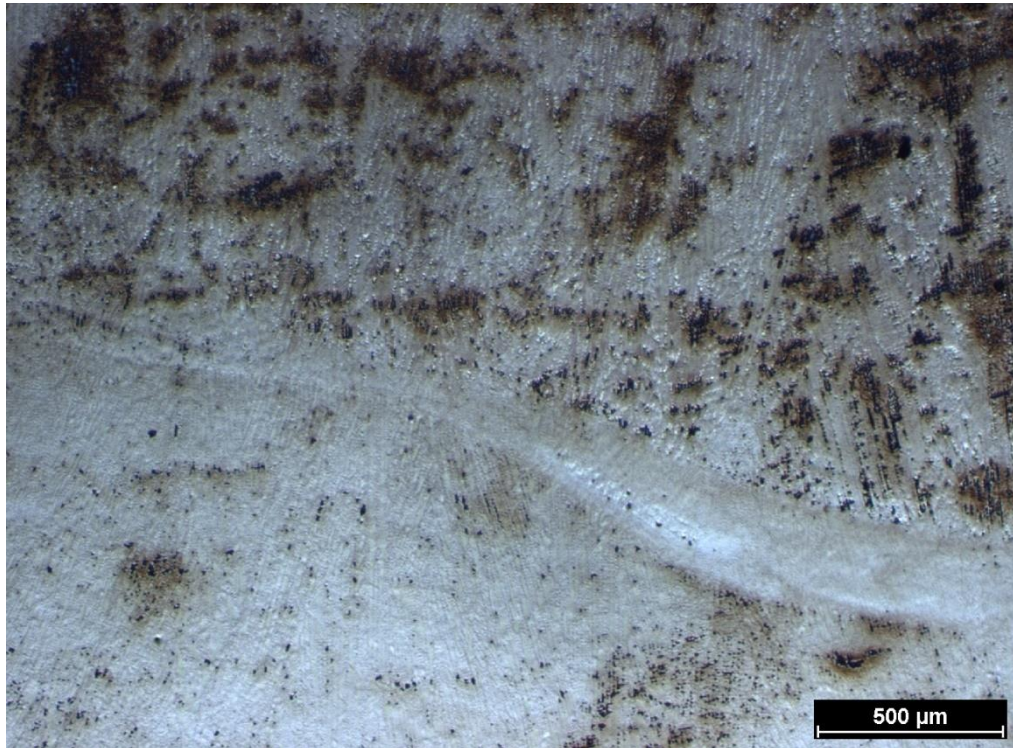
Mikrostruktura třívrstvého návaru trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu je na Obr. 22 až 27.



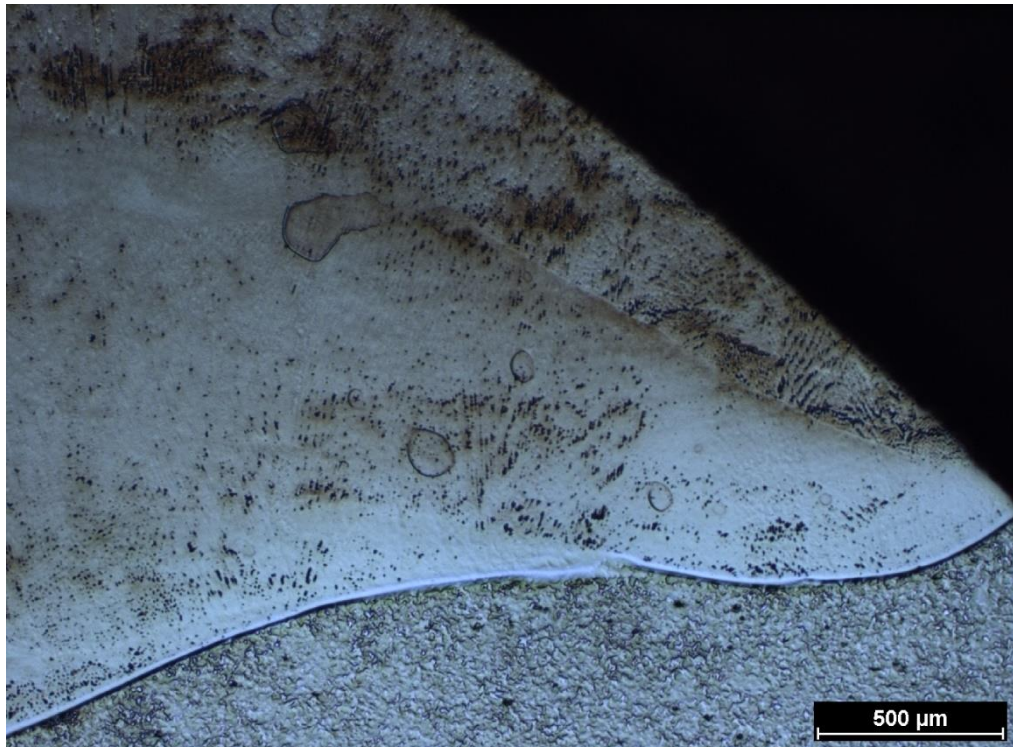
Obr. 22: Mikrostruktura třívrstvého návaru EnDOtec® DO*360X, zvětšení 100x



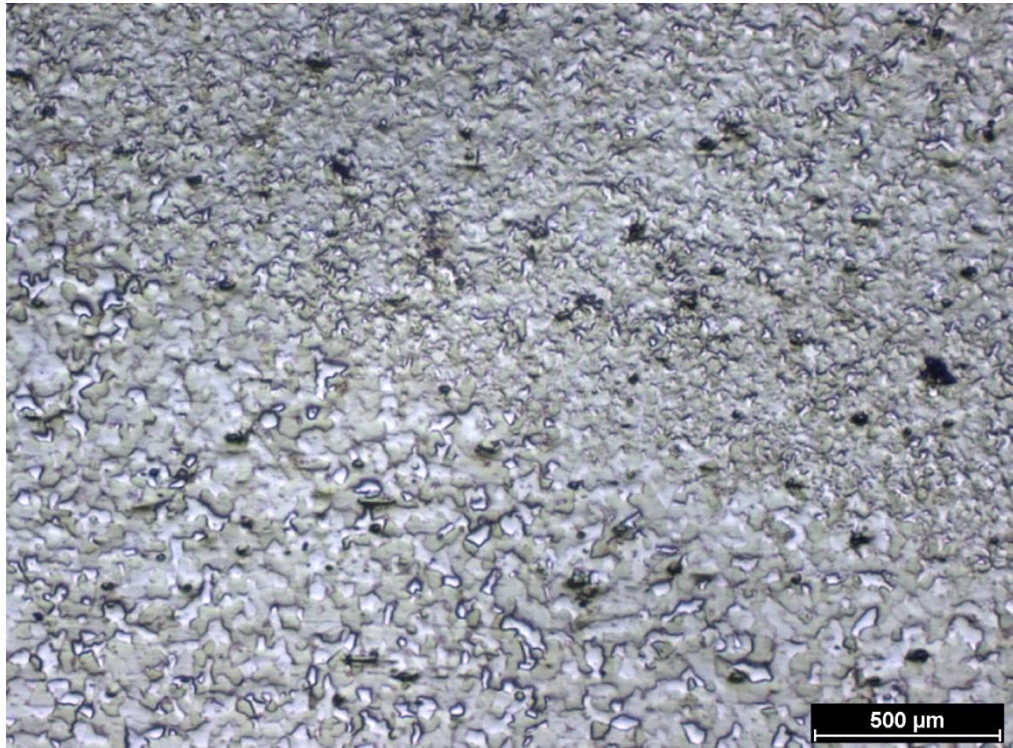
Obr. 23: Mikrostruktura třívrstvého návaru EnDOtec® DO*360X, zvětšení 250x



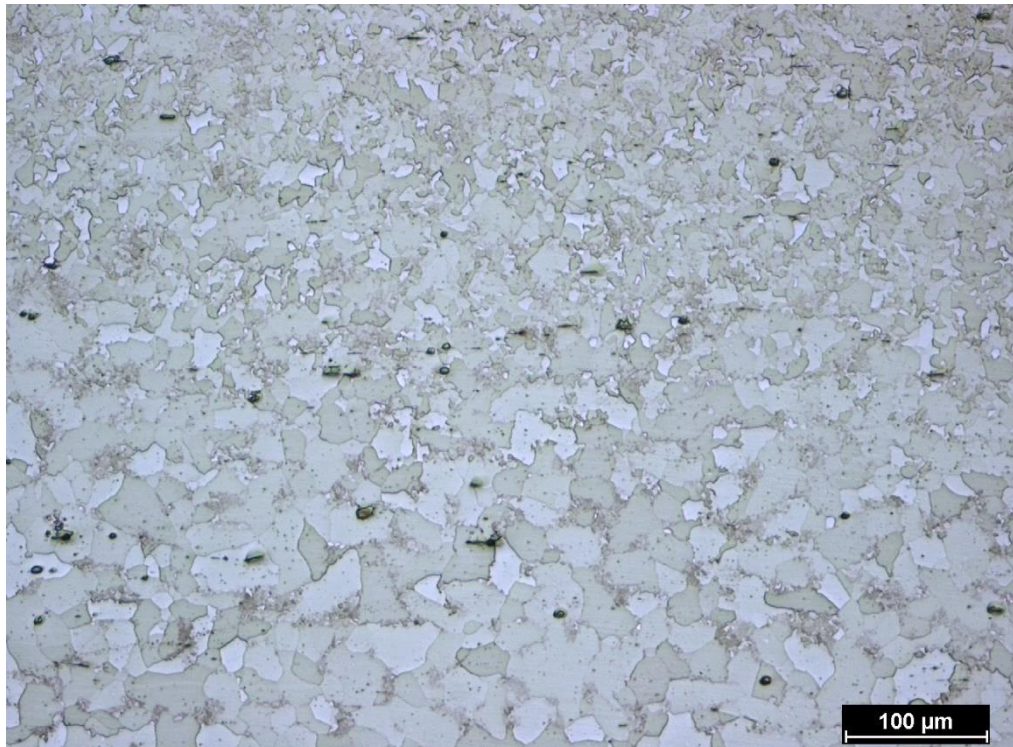
Obr. 24: Rozhraní promíšení základního materiálu s návarem a návarem, zvětšení 25x



Obr. 25: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 25x

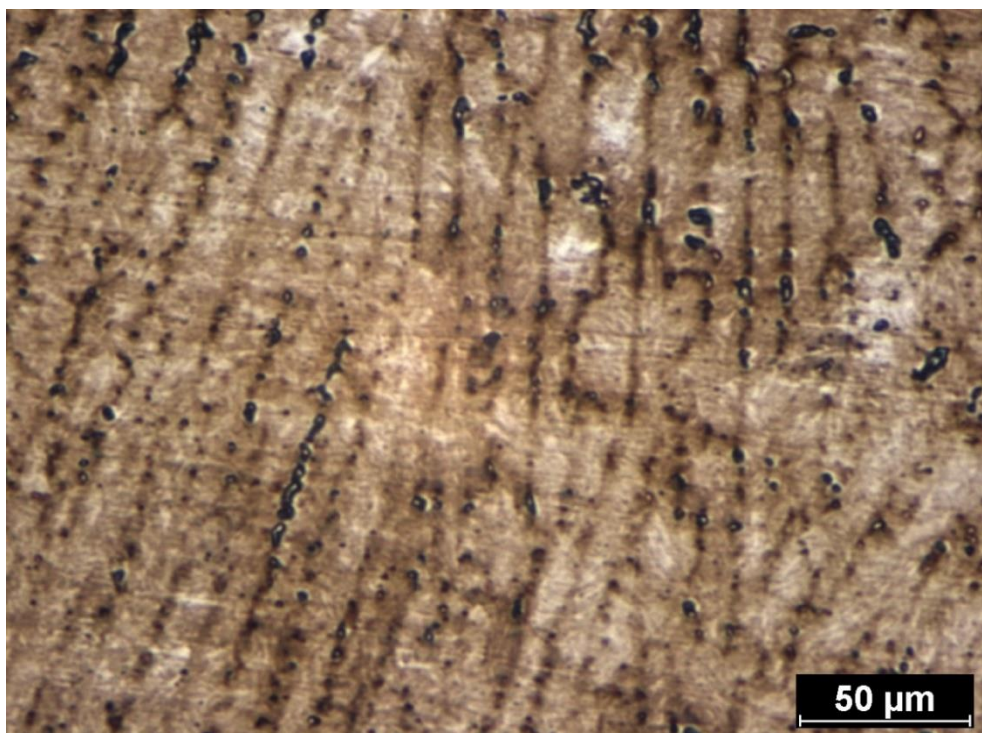


Obr. 26: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 25x

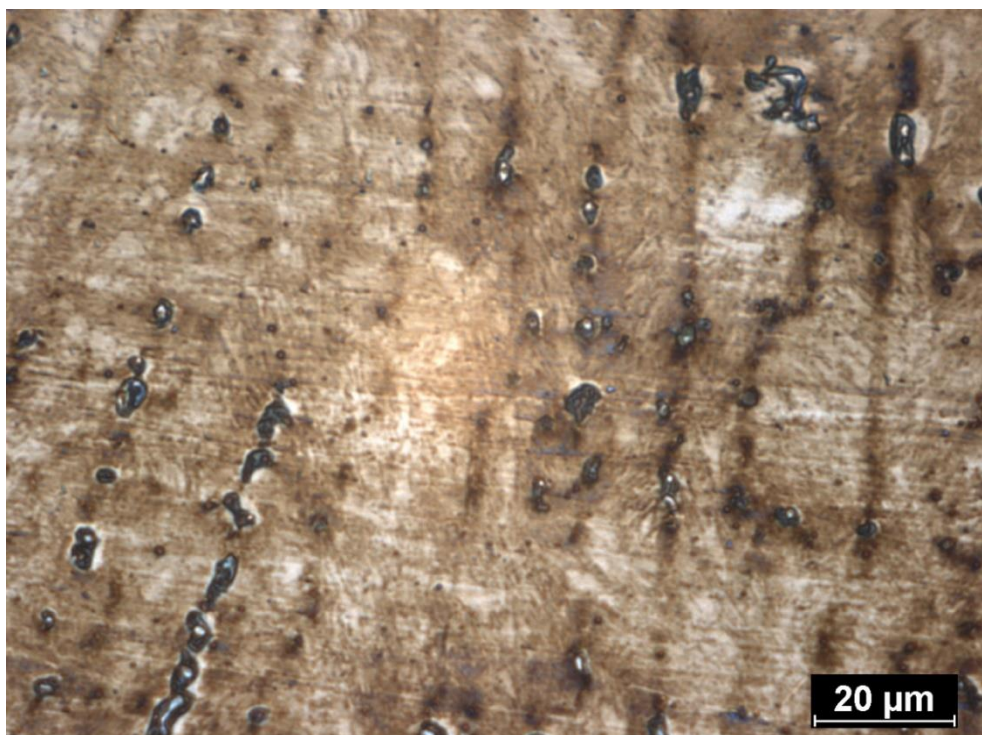


Obr. 27: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 100x

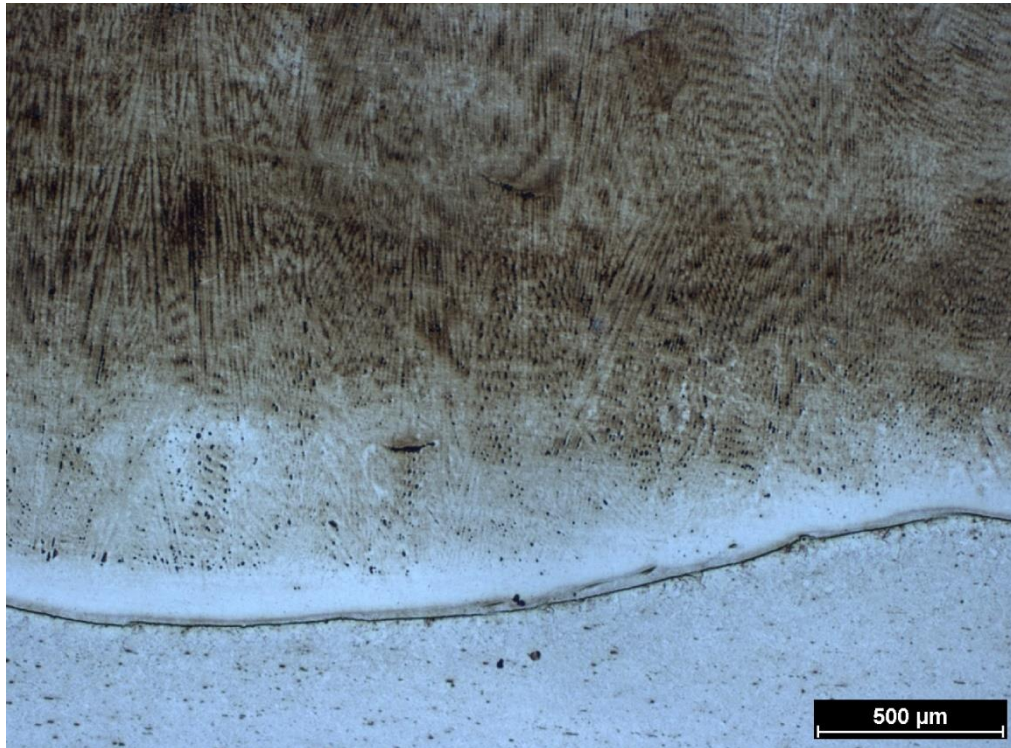
Mikrostruktura jednovrstvého návaru obalenou elektrodou EutecTrode®XHD6860, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu je na Obr. 28 až 33.



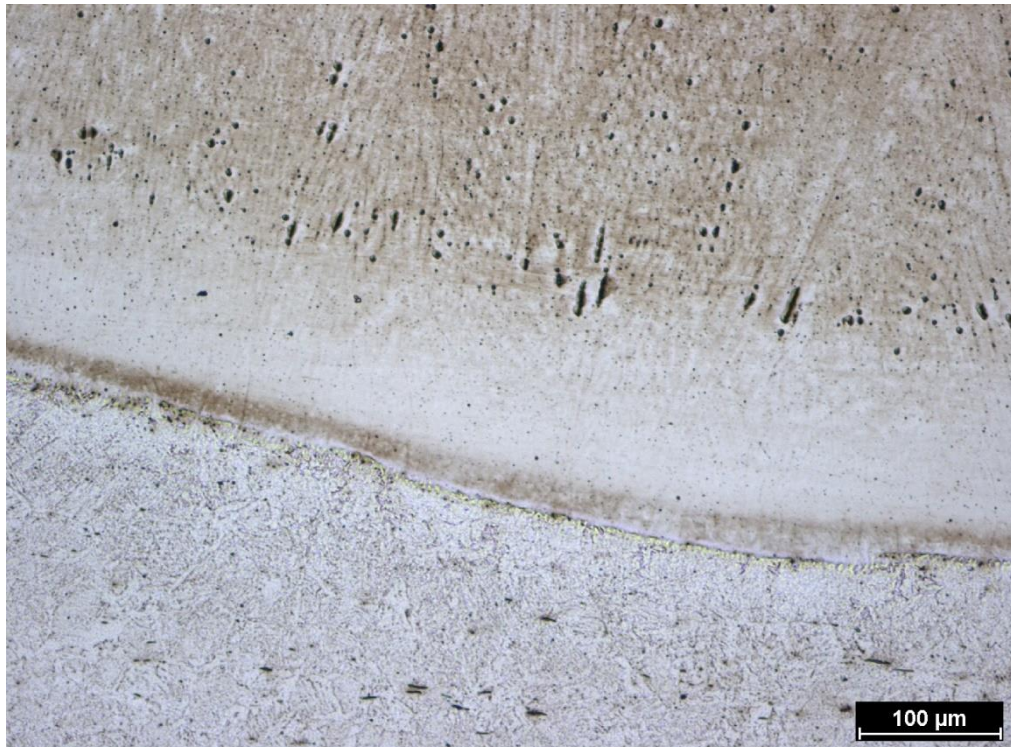
Obr. 28: Mikrostruktura jednovrstvého návaru EutecTrode®XHD6860, zvětšení 250x



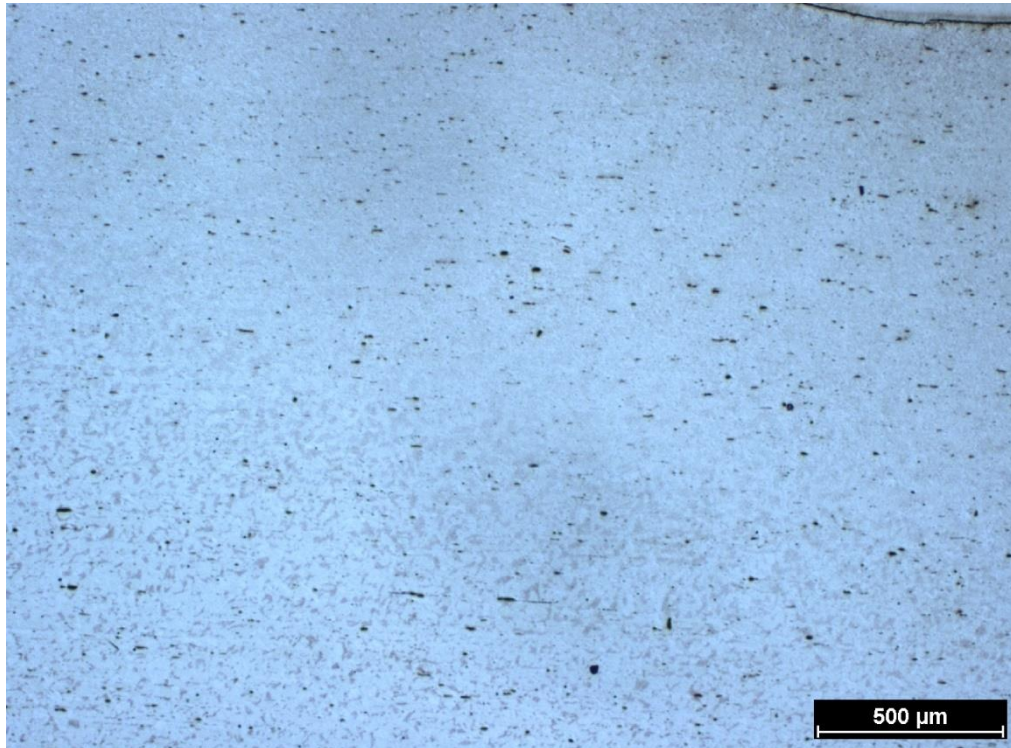
Obr. 29: Mikrostruktura jednovrstvého návaru EutecTrode®XHD6860, zvětšení 500x



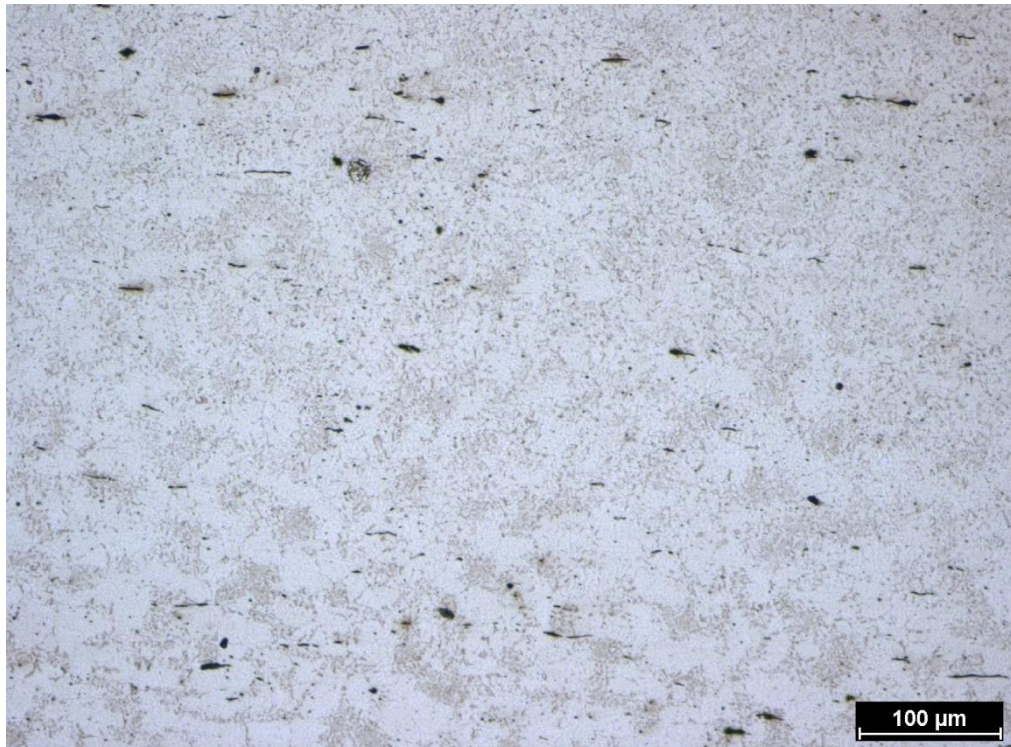
Obr. 30: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 25x



Obr. 31: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 100x

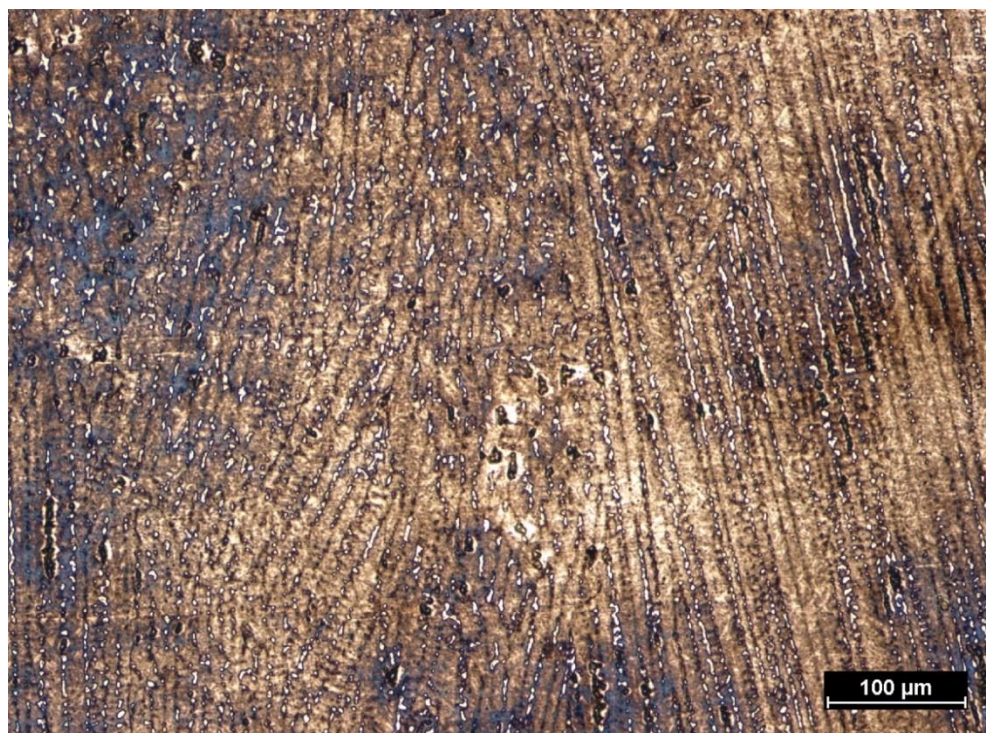


Obr. 32: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 25x

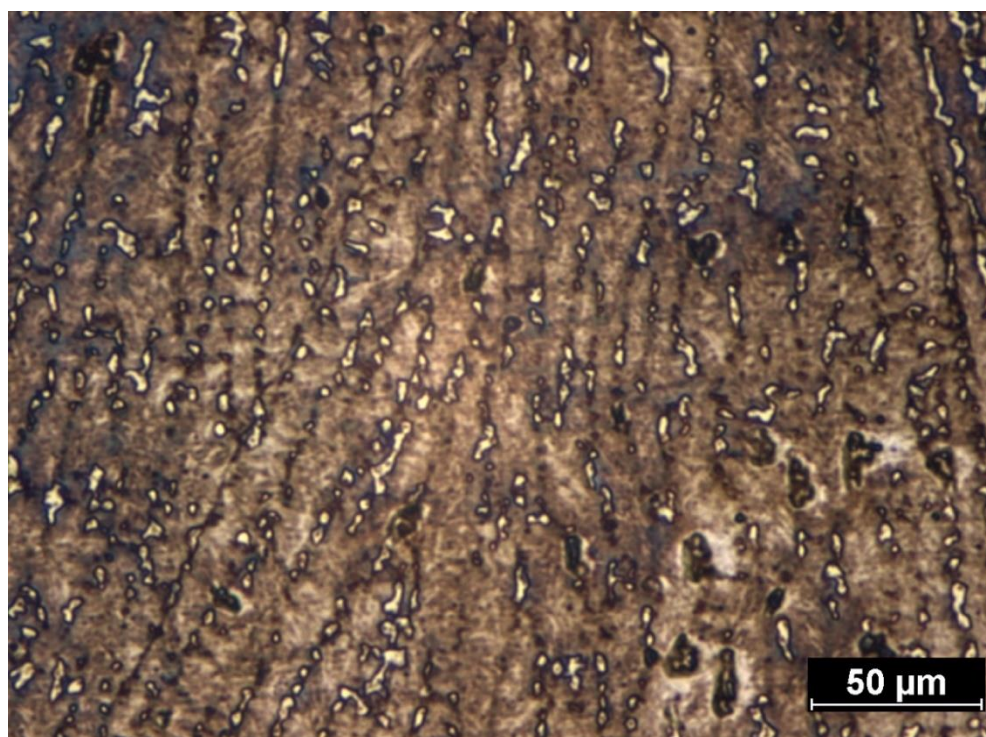


Obr. 33: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 100x

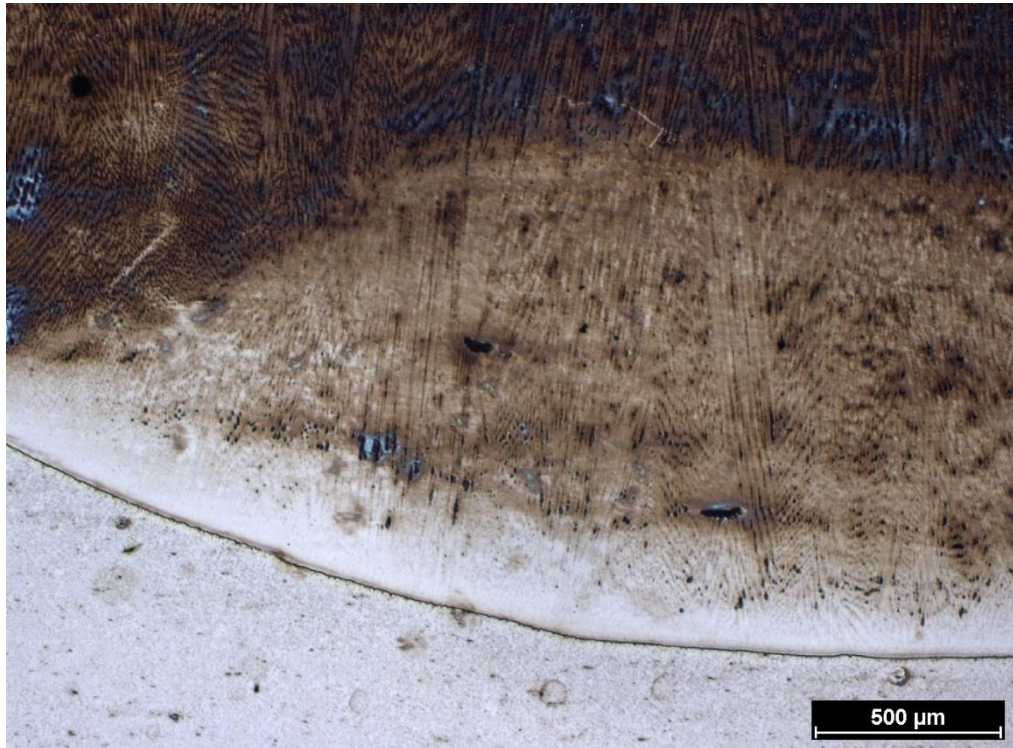
Mikrostruktura dvouvrstvého návaru obalenou elektrodou EutecTrode®XHD6860, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu je na Obr. 34 až 39.



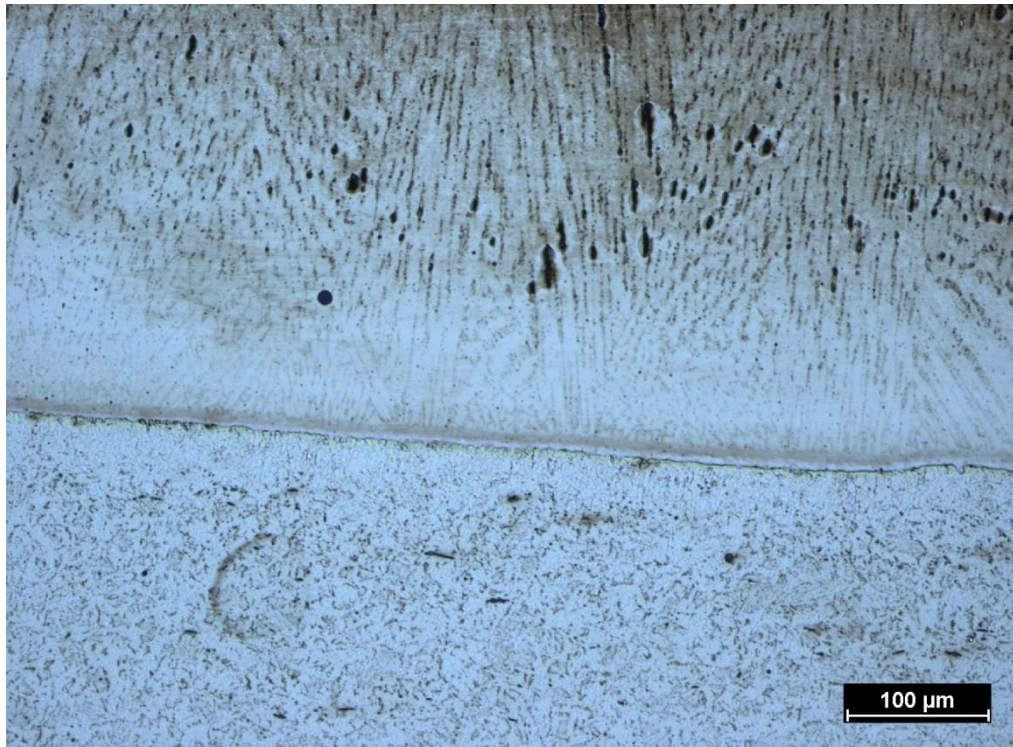
Obr. 34: Mikrostruktura dvouvrstvého návaru EutecTrode®XHD6860, zvětšení 100x



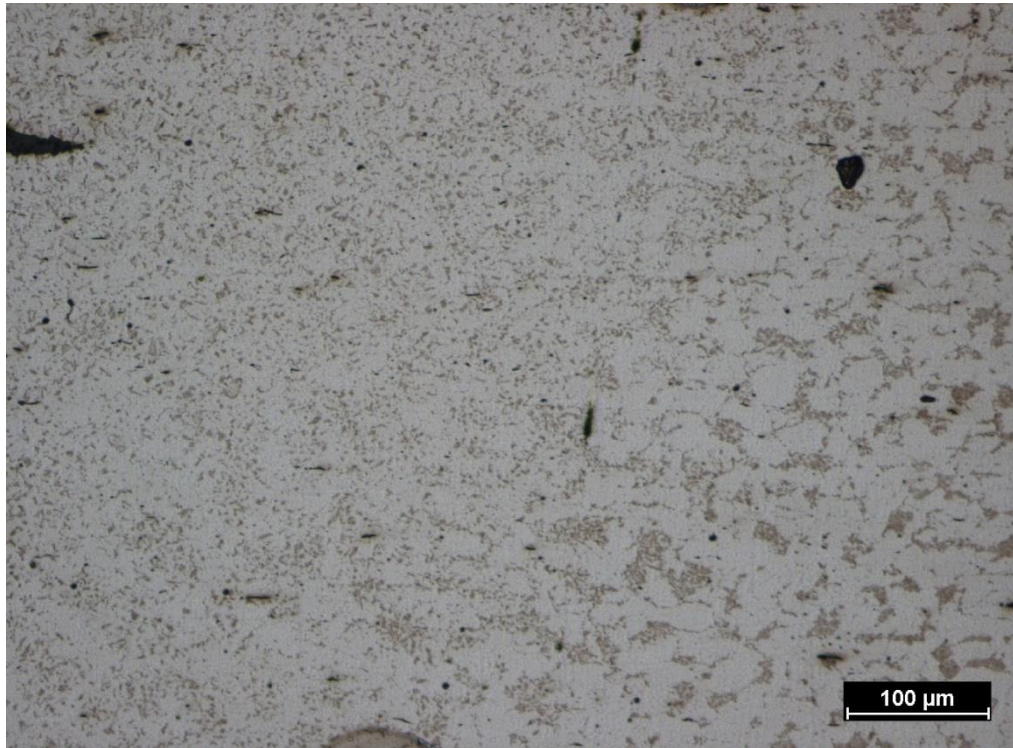
Obr. 35: Mikrostruktura dvouvrstvého návaru EutecTrode®XHD6860, zvětšení 250x



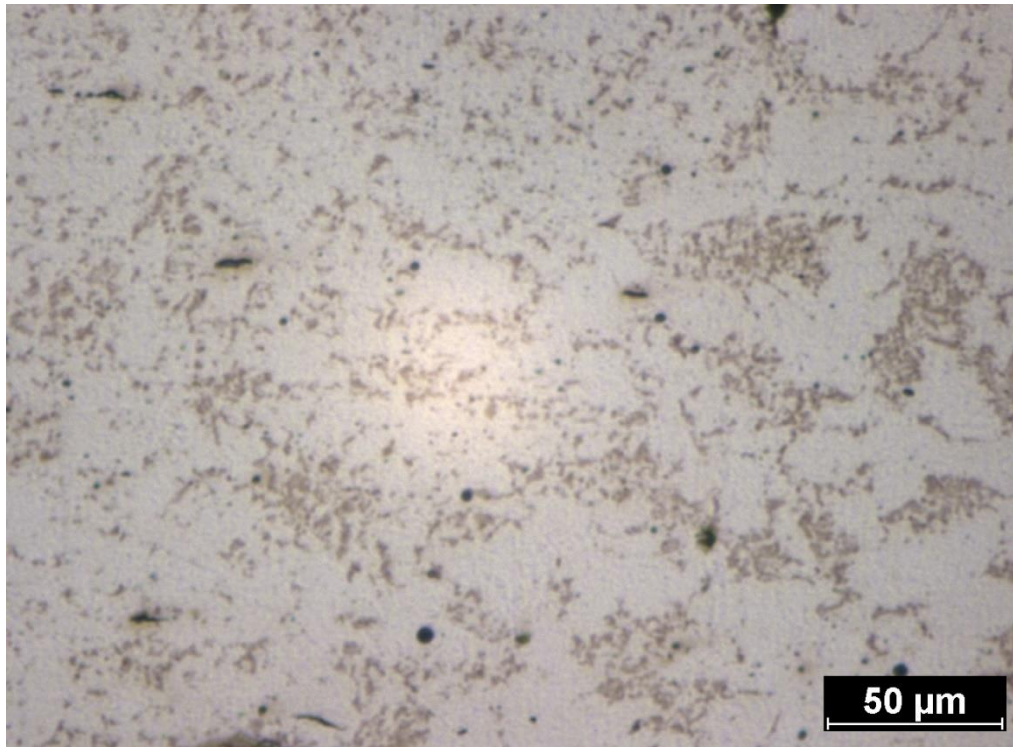
Obr. 36: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 25x



Obr. 37: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 100x

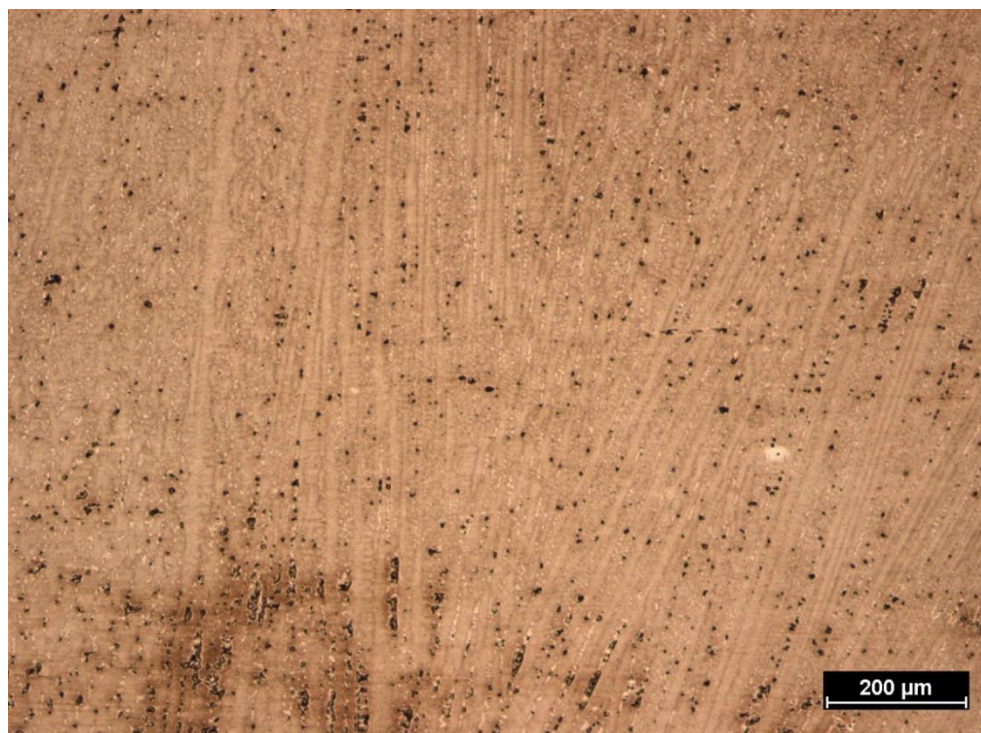


Obr. 38: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 100x

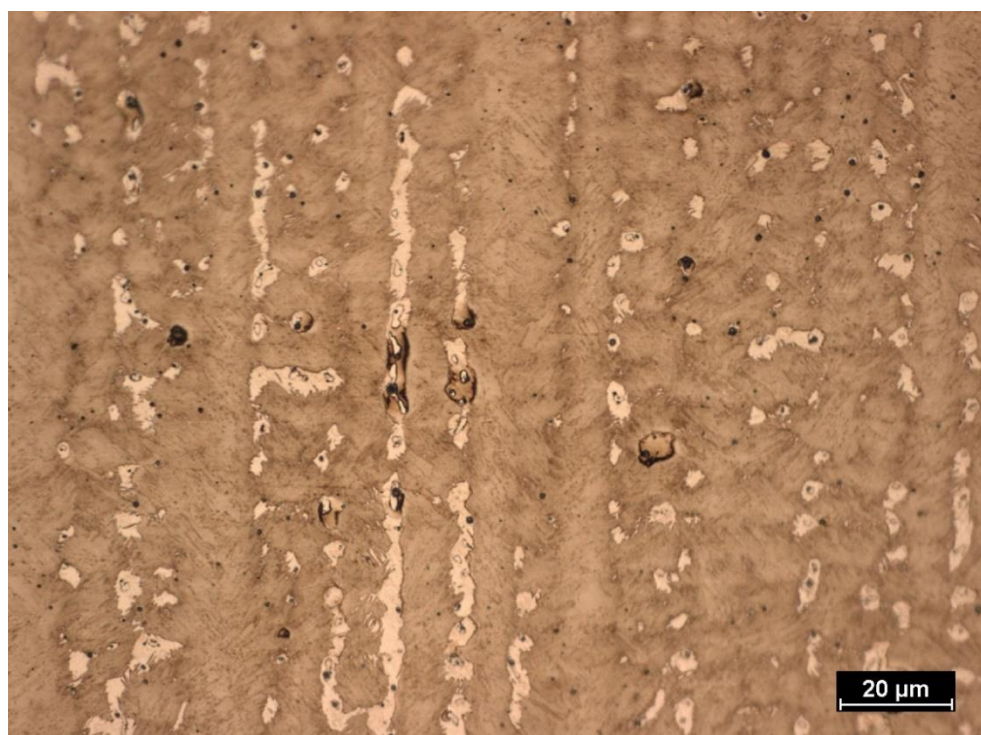


Obr. 39: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu, zvětšení 250x

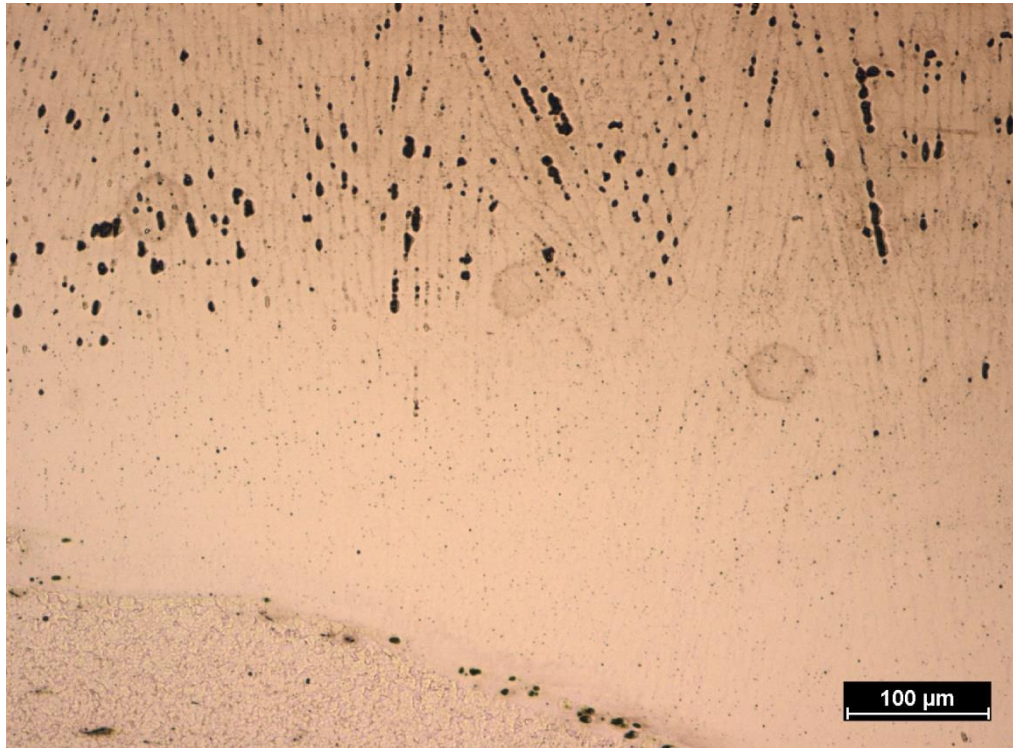
Mikrostruktura třívrstvého návaru obalenou elektrodou EutecTrode®XHD6860, tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu je na Obr. 40 až 45.



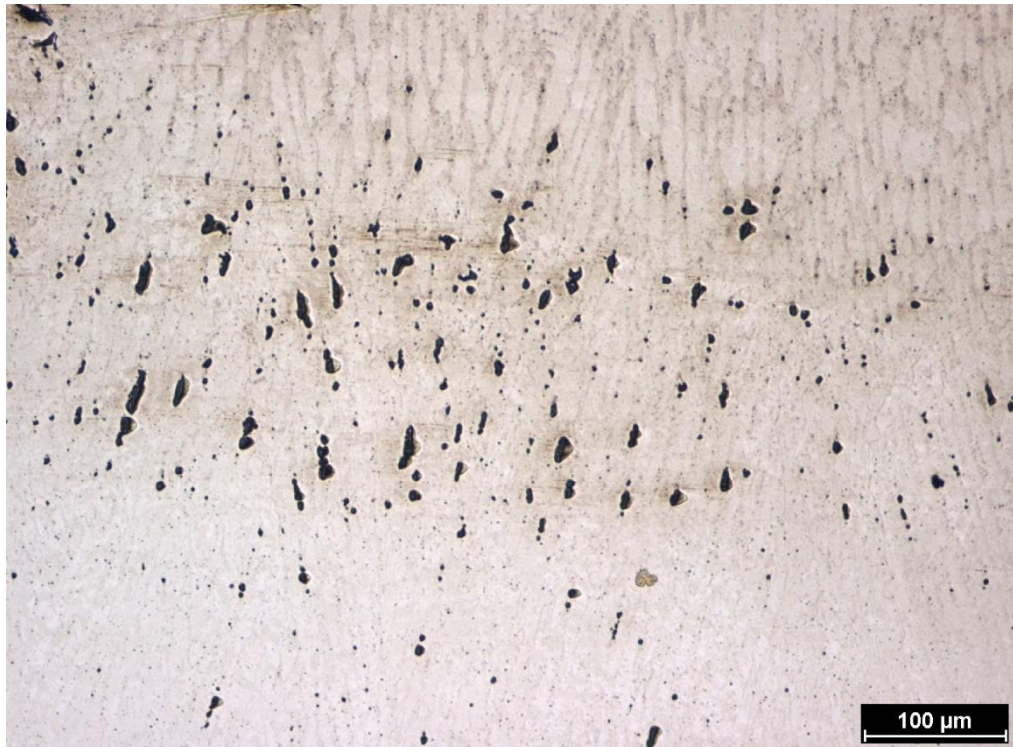
Obr. 40: Mikrostruktura třívrstvého návaru EutecTrode®XHD6860, zvětšení 50x



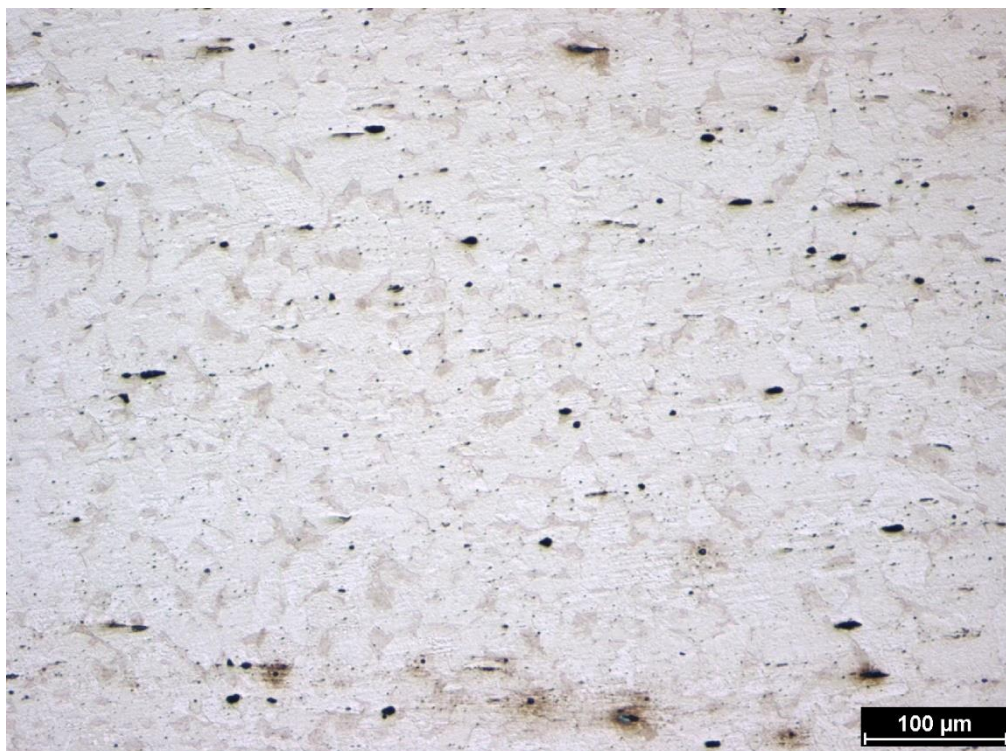
Obr. 41: Mikrostruktura třívrstvého návaru EutecTrode®XHD6860, zvětšení 400x



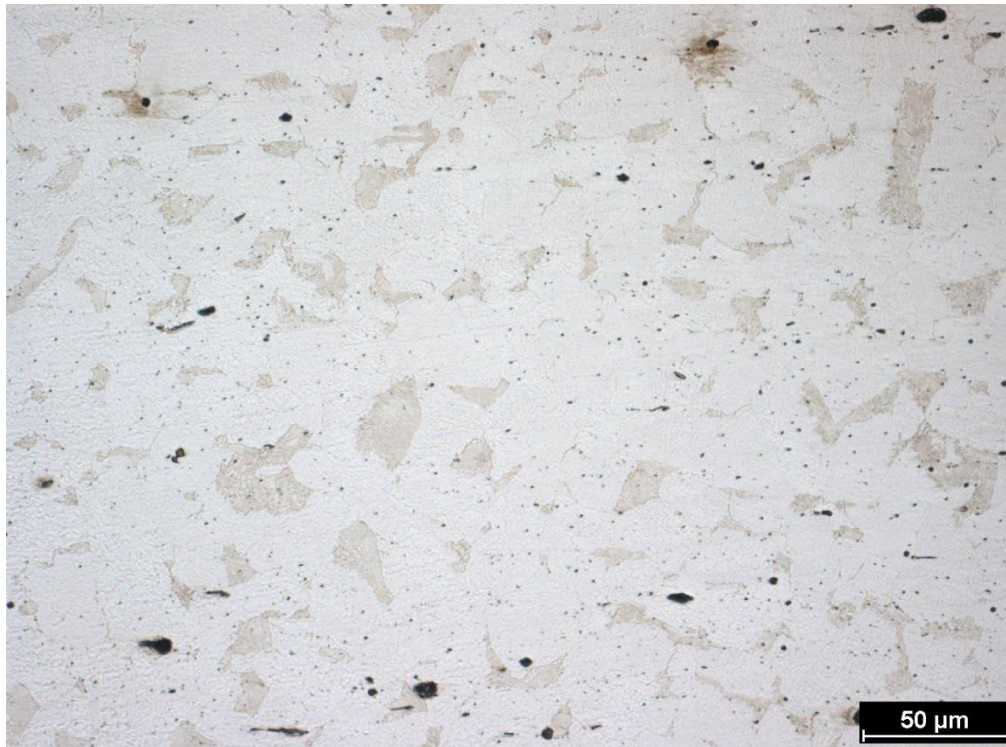
Obr. 42: Rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a návaru, zvětšení 100x



Obr. 43: Rozhraní promíšení základního materiálu s návarem a návarem, zvětšení 100x



Obr. 44: Mikrostruktura základního materiálu, zvětšení 100x

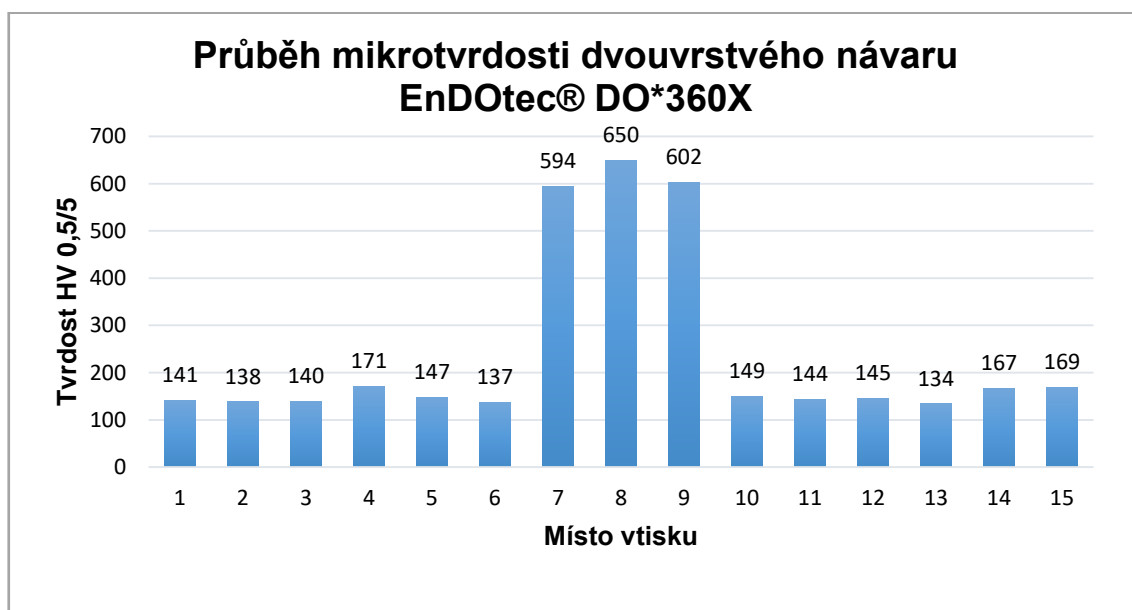
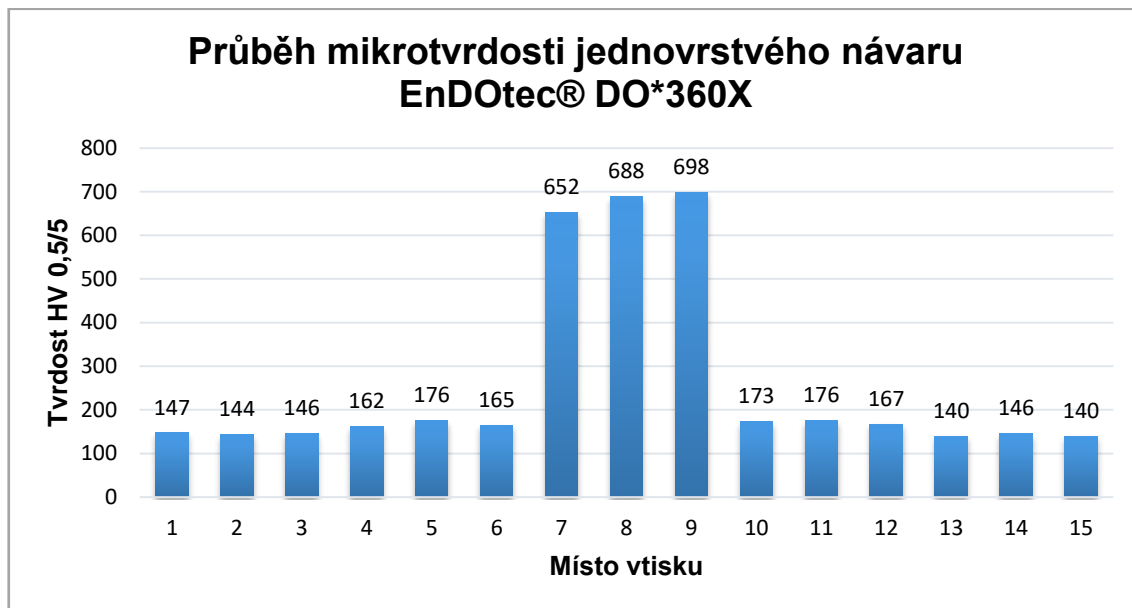


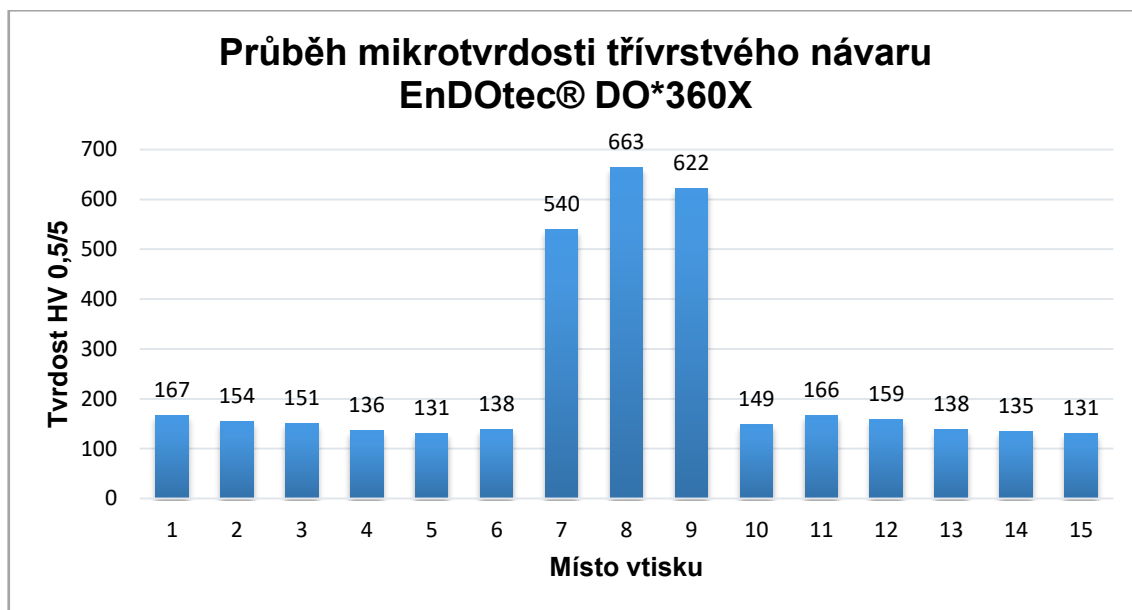
Obr. 45: Mikrostruktura základního materiálu, zvětšení 200x

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

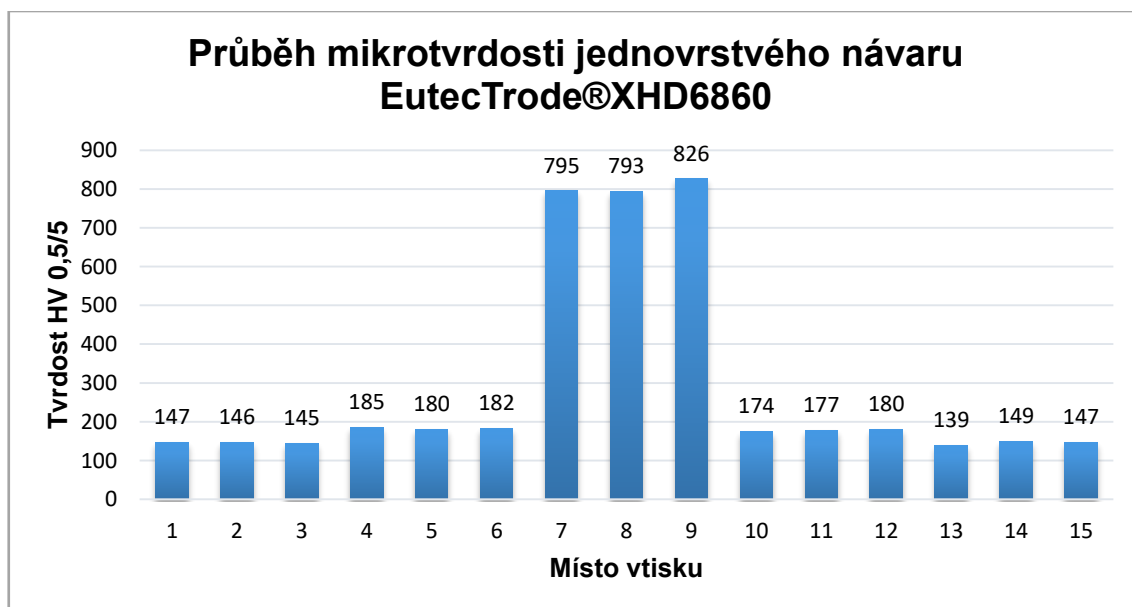
Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

Průběhy mikrotvrdosti jedno-, dvou- a třívrstvého návaru (vtisk 7, 8, 9) trubičkovým drátem EnDotec® DO*360X, tepelně ovlivněné oblasti (vtisk 4 – 6 a 10 – 12) a základního materiálu (vtisk 1 – 3 a 13 – 15).





Průběhy mikrotvrdosti jedno-, dvou- a třívrstvého návaru (vtisk 7, 8, 9) obalenou elektrodou EutecTrode®XHD6860, tepelně ovlivněné oblasti (vtisk 4 – 6 a 10 – 12) a základního materiálu (vtisk 1 – 3 a 13 – 15).



Průběh mikrotvrdosti dvouvrstvého návaru EutecTrode®XHD6860



Průběh mikrotvrdosti třívrstvého návaru EutecTrode®XHD6860



6.4 Diskuse získaných výsledků a dílčí závěry

Získané výsledky byly porovnány s údaji v materiálových prospektech výrobce svařovacích materiálů (Castoline Eutectic). Na základě provedeného srovnání lze vyslovit následující dílčí závěry, resp. diskutovat zjištěné odlišnosti:

V případě elektrody EutecTrode®XHD6860 (tzv. „Super Maraging“) výrobce uvádí tvrdosti po navaření 42 HRC pro jednovrstvý a dvouvrstvý návar, resp. 41 HRC pro třívrstvý návar. Porovnáním těchto hodnot s naměřenými tvrdostmi (Tab. 6 a 7) je zřejmé, že těchto tvrdostí nebylo v daném experimentu dosaženo. Navíc, nejvyšší tvrdosti u elektrody EutecTrode®XHD6860 bylo dosaženo ve dvouvrstevném návaru (35,5 HRC), tvrdost jednovrstevného návaru je nepatrně nižší (35 HRC), v třívrstevném návaru bylo dosaženo nejmenší tvrdosti (34,5 HRC).

U téhož návaru, tzn. elektrodou EutecTrode®XHD6860, ale ve stavu po tepelném zpracování (stárnutí 550°C / 3 h) uvádějí materiálové prospekty tvrdosti 55 HRC pro jednovrstvý návar, 60 HRC pro dvouvrstvý a 61 HRC pro třívrstvý návar. Naměřené hodnoty pro jednovrstvý svar po tepelném zpracování (stárnutí 555°C / 3 h) odpovídá předpokládané tvrdosti návaru uvedené výrobcem. Pro vícevrstvé návary jsou naměřené hodnoty (Tab. 8) nižší než udává výrobce. Dle prospektů je tendence tvrdostí stoupající s vícevrstvým návarem, nicméně na základě provedeného experimentu byla zjištěná tendence opačná, tedy klesající.

Příčina rozdílu (poklesu) tvrdosti mezi první a třetí návarovou vrstvou zde zřejmě souvisí s difúzí, a to jak prvků vytvářejících precipitáty, tak také kobaltu který jí urychluje. Vzhledem k rozdílu v obsahu uhlíku mezi základním materiálem (cca 0,2 %C) a návarovým kovem (< 0,03 %C) dochází v důsledku koncentračního gradientu k jeho difúzi směrem do návaru, což vysvětluje vyšší hodnoty tvrdosti právě v první svarové housence.

Obdobně pak návar trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X má rovněž klesající tendenci tvrdosti jak ve stavu po navaření tak i po tepelném zpracování. Ve všech případech jsou (dle očekávání) tvrdosti návaru EnDOtec® DO*360X

nižší, než u návaru elektrodou EutecTrode®XHD6860. Nejvíce se tvrdosti odlišují u třívrstvého návaru, naopak nejméně u návaru jednovrstvého.

Stejný závěr vyplývá i z měření průběhů mikrotvrdostí, kde návary elektrodou EutecTrode®XHD6860 dosáhly vyšší tvrdosti než návary trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X. Nejvyšších hodnot se dosáhlo v jednovrstvém návaru obalenou elektrodou, kde se úrovně mikrotvrdosti pohybují kolem 800 HV 0,5/5, zatímco s přibývajícemi vrstvami klesá tvrdost přibližně o 50 HV. Návar trubičkovým drátem EnDOtec® DO*360X je nejtvrďší v první vrstvě, kde se tvrdost pohybuje mezi 650 a 700 HV 0,5/5. Rozdíly v hodnotách mikrotvrdostí v jednotlivých návarech jsou zřejmě způsobeny jejich nehomogenitou (viditelné na Obr. 17, 18, 39 a 40).

U všech vzorků byl měřením průběhu mikrotvrdosti zjištěn ostrý přechod mezi návarem a základním materiálem (tepelně ovlivněnou oblastí), přechod je patrný na Obr. 19, 24, 29, 30 a 35. Největší pokles tvrdosti mezi návarem a tepelně ovlivněnou oblastí byl zaznamenán u jednovrstvého návaru elektrodou EutecTrode®XHD6860 a to až o 650 HV. Rozdíl v tvrdosti mezi základním materiálem a tepelně ovlivněnou oblastí je výrazně menší, přibližně ± 30 HV.

Mikrostruktura základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti je, dle očekávání, feriticko-perlitická (Obr. 44 a 45), v tepelně ovlivněné oblasti se objevuje výrazně hrubší zrno (Obr. 26 a 27).

Mikrostruktura návarového kovu je tvořena nízkouhlíkovým niklovým martenzitem, s precipitačně vytvrzenými intermetalickými fázemi a bílými oblastmi austenitu [18]. Masivní martenzit lze světelnou mikroskopií ovšem rozlišit pouze po rozpouštěcím žihání (před "kalením") a při vyšších zvětšeních, cca 800x. Jinak je potřebné použít elektronovou mikroskopii (nejlépe TEM, což přesahuje časové možnosti této práce). Pokud se týká zde presentovaných snímků, bez lokální chemické analýzy (EDS), je problém identifikovat jednotlivé strukturní útvary. Poměrně podivné jsou zejména tmavé částice (Obr. 29, 35 a 43). Kdyby se jednalo o důsledek redistribuce uhlíku (a jeho navázání na Ti a Mo), pak by to měly být naopak světlé karbidické částice. Všechny přiložené snímky signalizují výrazné chemické rozdíly ve struktuře (výrazné je to zejména

na obr. 41, ale chemicky odlišné pásy jsou dobře patrné i na obr. 40 a dalších). Zde by bylo vhodné pro zevrubnější analýzy (nad rámec této práce) jednoznačně provést např. EDS.

7. Závěr

V experimentální části práce byly hodnoceny dva typy návarů na bázi maraging oceli, oba z provenience firmy Castoline Eutectic. Navařené housenky byly zhotoveny jednak metodou MAG (plněná elektroda) a dále pak ručním svařováním obalenou elektrodou. Pro každou z těchto metod se jednalo o jedno dvou a třívrstvý návar.

Z materiálového pohledu je zde jistá odlišnost v tom, že chemické složení návarové kovu je poněkud specifické, resp. odlišné od tzv. „klasické“ oceli maraging typu 18Ni-9Co-5Mo-TiAl.

Hodnot tvrdostí obalené elektrody EutecTrode®XHD6860, proklamovaných v materiálových prospektech výrobce, nebylo v experimentálních návarech dosaženo. Naměřené hodnoty tvrdosti byly nižší a zároveň nebyl potvrzen předpoklad, že s více vrstvami návaru bude tvrdost vyšší.

U trubičkového drátu EnDOTec® DO*360X nejsou dosahované hodnoty tvrdosti dodavatelem specifikovány, ovšem bylo zde zjištěno, že v porovnání s návarem obalenou elektrodou zde bylo dosaženo nižších tvrdostí, a to jak v jednovrstvém, tak i v dvou i třívrstvém návarech.

Jistou roli zde sehrál zřejmě použitý aktivní plyn ve složení 2,5% CO₂ (zbytek Ar), který se podílí na tvorbě návarového kovu, zejména pak ale difúze uhlíku ze základního materiálu do návaru, způsobená koncentračním gradientem.

U obou návarů bylo totiž nejvyšší tvrdosti dosaženo v jednovrstvém návarech (v první navařené housence), nicméně u jednovrstvých návarů byla v tepelně ovlivněné oblasti naměřena nejvyšší tvrdost, v důsledku absence teplotního účinku od dalších vrstev (při navaření druhé a třetí housenky).

Z provedeného porovnání všech zvolených kombinací se jako nejlepší jeví dvouvrstvý návar obalenou elektrodou EutecTrode®XHD6860, který dosáhl druhé nejvyšší tvrdosti v návarech a zároveň nejnižší tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti.

Z aplikačního hlediska lze návary na bázi maraging oceli primárně doporučit pro opravy forem na tlakové lití hliníkových slitin, ale i tvářecích nástrojů, komponent motorů, extrémně namáhaných hřídelí či pohyblivých dílů zbraní. Je tedy zřejmé, že i v podmínkách abrazivního opotřebení se jedná o perspektivní materiálovou alternativu.

8. Zdroje

- [1] – BENEŠ, Libor, Václav MACHEK, Jiří MARTINEC a Zdeněk SVEIDLER. *Navarování tepelně exponovaných součástí pro energetiku za použití plněné elektrody na bázi kobaltové tvrdonávarové slitiny typu Stoodite 6-M.*
- [2] - PRADEEP, G. R. C.; RAMESH, A.; DURGA PRASAD, B. A review paper on hardfacing processes and materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, 2.11: 6507-6510.
- [3] – DUMOVIC, Milo. Repair and maintenance procedures for heavy machinery components. *Welding innovation*, 2003, 20.1: 1-5.
- [4] - ROVATTI, L., et al. Effect of Dilution on Microstructure and Wear Resistance of a Fe-Based Hardfacing Alloy with a High Amount of Carbide-Forming Elements. In: *Conference Papers in Science*. Hindawi Publishing Corporation, 2015.
- [5] – CHOTĚBORSKÝ, R., et al. Abrasive wear of high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys. *Research in Agricultural Engineering*, 2008, 54.4: 192-198.
- [6] – KUO, Che Wei, et al. Microstructure and wear characteristics of hypoeutectic, eutectic and hypereutectic (Cr, Fe) 23C6 carbides in hardfacing alloys. *Materials transactions*, 2007, 48.9: 2324-2328.
- [7] – BUCHELY, M. F., et al. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 2005, 259.1: 52-61.
- [8] - KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
- [9] - KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, c1998. ISBN 80-7183-054-2.
- [10] – ZIKIN, A., et al. Advanced chromium carbide-based hardfacings. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206.19: 4270-4278.
- [11] – BAUMLI, ALI AL-AZZAWI1–PÉTER. METHODS OF COMPOSITE COATING: A REVIEW. *Materials Science and Engineering*, 2015, 40.1: 26-32.
- [12] – GOSWAMI, G. L., et al. Laser cladding of nickel based Hardfacing materials as an Alternative of Stellite. *BARC, Newsletter*, 2003, 249: 65.
- [13] – ZHOU, Y. F., et al. Effect of titanium content on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C hardfacing layers. *Welding Journal*, 2012, 91.8: 229-235.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství

- [14] - WANG, Qingbao; LI, Xiaoyan. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys. *Welding Journal*, 2010, 89.6: 133-139.
- [15] - CASSINA, J. C.; MACHADO, I. G. Low-stress sliding abrasion resistance of cobalt-based surfacing deposits welded with different processes. *Welding journal*, 1992, 65: 123-128.
- [16] - LOLLA, T., et al. Delamination failures of Stellite hardfacing in power plants: a microstructural characterisation study. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19.6: 476-486.
- [17] - JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. Perspektivní materiály. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [18] - LANG, F. H.; KENYON, N. *Welding of maraging steels*. Welding Research Council, 1971.
- [19] - FANTON, Leonardo; ABDALLA, Antonio Jorge; LIMA, M. S. F. Heat Treatment and Yb-Fiber Laser welding of a maraging steel. *Welding Journal*, 2014, 93: 362-368.
- [20] – JANOUŠEK, M. Zařízení pro testování abrazivního opotřebení. [online]. [cit. 2017-2-24]. <
<http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5519.pdf> >

Příloha

Materiálové prospekty obalené elektrody EutecTrode®XHD6860.



CONFIDENTIALLY YOURS >>> Marketing Guidelines XHD 6855 & XHD 6860

MARKETING OBJECTIVES

Maraging steels (derived from "Martensitic" and "Aging" phase transformations) were first developed in the 1960's as high-strength constructional steels for the aviation and space technology. Their most important advantages are their comparatively high toughness levels at maximum tensile strength which are also much appreciated in the Tool & Die manufacturing industry.

Thus, Maraging strength values are typically approximately 20 % higher than those of chromium hot work tool steels. Even more impressive are Maraging toughness values which are more than double the values of the best premium quality AISI H11 (W.Nr. 1.2343) or AISI H13 (W.Nr. 1.2344) tool steels.

These Maraging strength and toughness values remain high at <400°C service temperatures which guarantee excellent performance in the cold working tool & die sector.

The objective is to increase Castolin penetration into the profitable Tool & Die industry market segments (fabrication, maintenance & repair) using the MMA welding process with two new Maraging steel alloy formulations XHD 6855 & XHD 6860, to complement existing application solutions with EutecTrode 6055, DO*55, PTA 16655, 45355W & 45355.

ALLOY DEVELOPMENTS

Unlike conventional quenched & tempered steels, maraging steels rely on very low carbon contents deriving their strength instead through a Precipitation Hardening (Aging) heat-treatment process (480°-550°C) forming inter-metallic compounds.

The principal alloying element was 15 to 20 wt.% nickel plus secondary alloying elements to produce complex intermetallic precipitates which include cobalt, molybdenum, titanium and aluminium. Carbon is considered an impurity in these steels and is kept as low as commercially feasible (<0.03%) in order to minimize the formation of titanium carbide which can adversely affect strength, ductility and toughness.

The commercial, non-stainless grades first developed in the 1960's, typically contained 17–19 wt.% nickel, 8–12 wt.% cobalt, 3–5 wt.% molybdenum and 0.2–1.6 wt.% titanium (typical cold working tool applications for EutecTrode 6055 & EuTroloy 16655).

Subsequently other reduced nickel (10 -14%) maraging steels were developed for higher temperature service applications where superior temper resistance is required (EnDotec DO*55).

While XHD 6855 may be considered as alternative to 6055 but much more competitive, the XHD 6860 is a higher performance electrode with a completely new metallurgical formulation with :

- **increased** as welded hardness (40 HRC)
- **increased** aged hardness (60 HRC)
- **increased** tempering resistance

making XHD 6860 the ideal solution for welding aluminium pressure die casting moulds & tooling.

2

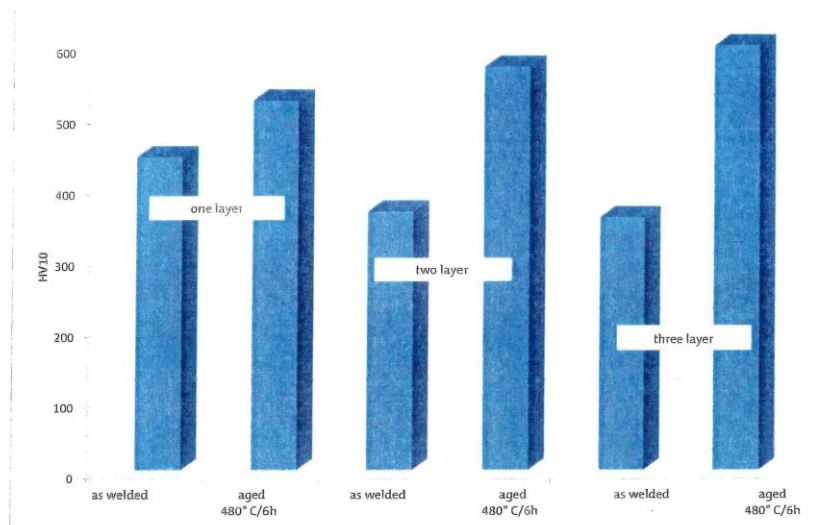
For internal use only

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav materiálového inženýrství



CONFIDENTIALLY YOURS >>> Marketing Guidelines XHD 6855 & XHD 6860



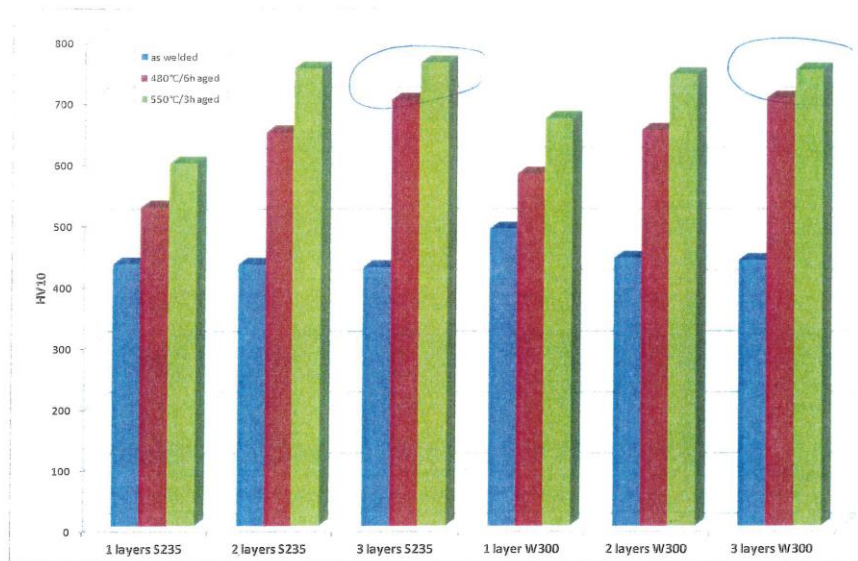
XHD 6860

Hardness (20°C) 1st layer after welding 42 HRC
Hardness (20°C) 2nd layer after welding 42 HRC
Hardness (20°C) 3rd layer after welding 41 HRC

Hardness (20°C) 1st layer after ageing 55 HRC (3hr at 550°C)
Hardness (20°C) 2nd layer after ageing 60 HRC (3hr at 550°C)
Hardness (20°C) 3rd layer after ageing 61 HRC (3hr at 550°C)



CONFIDENTIALLY YOURS >>> Marketing Guidelines XHD 6855 & XHD 6860



It is important to note that even with low dilution procedures, both XHD 6855 & XHD 6860 weld coatings exhibit best properties from the 3rd weld layer upwards (softest as welded hardness & highest aged hardness). Furthermore hot hardness values are generally maintained up to <500°C service temperatures for XHD 6855 & 550°C for XHD 6860 with excellent temper resistance, crack resistance and cutting edge retention properties.

PHYSICAL PROPERTIES

Thermal conductivity : ~14.2 W/(mK) at 20°C

Thermal expansion coefficient : ~10.3 x 10⁶ m/(mK) at 20° - 100°C

Density : 8.1 g/cc

COMPARATIVE WELDABILITY

Maraging steels (like XHD 6855 & XHD 6860 coatings) are readily weldable without any preheat in either the solution – annealed (soft) or fully aged (hard) conditions. MMA, GMA, TIG or PTA welding processes and low heat input procedures are preferred. Interpass temperatures are limited to 120°C maximum. Post-weld ageing is recommended to homogenize the mechanical properties of the weld coating heat affected zone & weld deposit.



CONFIDENTIALLY YOURS >>> Marketing Guidelines XHD 6855 & XHD 6860

PRODUCT INFORMATION

XHD 6855 & XHD 6860 Product Data Sheets in English are available.

The following supplementary technical information some of which is not printed in the Product Data Sheets is provided within these Guidelines to better appreciate and to extend the potential applications for which XHD 6855 & XHD 6860 might be envisaged by the markets

COMPOSITION

All-weld-metal chemical analysis for XHD 6855 :

C	Si	Mn	Co	Mo	Ni	Ti	Fe
<0.03%	0.19%	0.08%	12.2%	4.88%	16.3%	0.04%	Balance

Closest specification W.Nr 1.2709 :

All-weld-metal chemical analysis for XHD 6860 :

C	Si	Mn	Co	Mo	Ni	Ti	Fe
<0.03%	0.29%	0.10%	14.9%	14%	10.7%	0.06%	Balance

Closest specification not applicable because of proprietary formulation.

XHD 6860 3 layer microstructures after welding (left) & after ageing 550°C / 3 hr (right)

