



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ OBALENOU ELEKTRODOU UHLÍKOVÉ A VYSOKOLEGOVANÉ OCELI

STICK WELDING CARBON AND HIGH-ALLOY STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Hendrych

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Marek Hendrych**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**
Akademický rok: 2018/19

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

Svařování obalenou elektrodou uhlíkové a vysokolegované oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování obalenou elektrodou je stále používané pro velký sortiment elektrod. Práce porovnává charakteristiku svařování dvou rozdílných ocelí – feritické C–Mn a austenitické CrNi.

Cíle bakalářské práce:

1. Rozbor současného stavu svařování metodou 111
2. Literární studie svařitelnosti feritické a austenitické oceli
3. Návrh a provedení experimentální práce
4. Vyhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.

FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠANOVÁ, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír, SCHWARZ a Július VESELKO. Materiály a jejich svařitelnost. 2 vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5.

OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6,; vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. :il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

HENDRYCH Marek: Svařování obalovanou elektrodou uhlíkové a vysokolegované oceli

Tato práce se zabývá rozborem technologie ručního obloukového svařování neboli metody 111. V rešeršní části práce je pojednáno o principu této metody, svařovacích zdrojích a přídavném materiálu, tedy obalovaných elektrodách. Dále se zaměřuje na svařitelnost ocelí, především tedy uhlíkových a korozivzdorných austenitických ocelí.

V experimentální části bylo provedeno měření výkonových vlastností elektrod. Měření bylo provedeno na vzorcích uhlíkové oceli S235JR podle ČSN EN a korozivzdorné austenitické oceli X5CrNi18-10 podle ČSN EN. Zhodnocení zahrnuje porovnání výsledků a jejich zdůvodnění.

Klíčová slova: Ruční obloukové svařování, výkonové vlastnosti, uhlíková ocel, austenitická korozivzdorná ocel, svařitelnost, obalované elektrody

ABSTRACT

HENDRYCH Marek: Stick welding of carbon and high alloy steel

This thesis deals with analysis of manual metal arc welding method or method 111. In the research part of this thesis are discussed principles of this method, welding power sources and additional welding material-coated electrodes. Further the thesis is focused on the weldability of steels, especially carbon steels and austenitic stainless steels.

In the experimental part was accomplished measurement of operational characteristics of coated electrodes. Measurement was carried out on sample of carbon steel S235JR according to ČSN EN and austenitic stainless steel X5CrNi18-10 according to ČSN EN. The evaluation involves a comparison of the results and their justifications.

Key words: Manual metal arc welding, operational characteristics, carbon steel, austenitic stainless steel, weldability, coated electrodes

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HENDRYCH, Marek. *Svařování obalenou elektrodou uhlíkové a vysokolegované oceli* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117318>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 16.5.2019

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné rady a připomínky při psaní bakalářské práce. Také chci poděkovat své rodině za podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
2 METODA RUČNÍHO OBLOUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	11
2.1 Elektrický oblouk.....	11
2.2 Voltampérová charakteristika oblouku a zdroje	12
2.3 Svařovací zdroje	13
2.3.1 Vlastnosti základních druhů svařovacích zdrojů.....	14
2.4 Elektrody	14
2.4.1 Vlastnosti základních druhů obalů elektrod	16
2.4.2 Sušení a skladování elektrod	17
2.4.3 Označování elektrod	17
3 SVAŘITELNOST	18
3.1 Vliv chemického složení oceli na svařitelnost.....	19
3.2 Uhlíkový ekvivalent	19
3.3 Svařitelnost uhlíkových ocelí.....	20
3.4 Svařitelnost vysokolegovaných ocelí.....	21
3.4.1 Struktura vysokolegovaných ocelí.....	21
3.4.2 Austenitické Cr-Ni oceli.....	22
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	23
4.1 Vlastnosti materiálu a elektrod.....	23
4.2 Provedení experimentu.....	26
4.3 Výpočet výkonových vlastností.....	27

Seznam použité literatury

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [1,2,3,4,5,6]

Svařování patří spolu s obráběním, slévárenstvím a tvářením mezi základní druhy strojírenské technologie. Samotné svařování mezi těmito technologiemi nezabírá největší podíl, co se vyzužití týče, avšak co se týče objemu zpracovávaných materiálů, je tato technologie na vedoucí pozici. Při svařování dochází k nerozebíratelnému spojení součástí, vznikají tzv. svary. K tomuto spojení dojde vlivem dodání energie, a to buďto ve formě tepla nebo kinetické energie, případně kombinací obou. Příklad zhotoveného svaru lze vidět na obr. 3. Svařování je technologie, jež dosahuje širokého spektra užití, je možno svařovat různé materiály o různých tloušťkách. Tohoto je dosaženo díky vysoké variabilitě svařovacích technologií.

V této práci se budu podrobněji zabývat pouze metodu ručního obloukového svařování obalovanou elektrodou. Tato metoda je nejstarší ze skupiny metod využívajících pro vytvoření svaru elektrický oblouk, avšak díky své variabilitě a možnosti svařování v jakékoli poloze je stále hojně využívána. Ve velkovýrobě sice došlo k vytlačení této metody metodou MIG/MAG z důvodu vyšší efektivity, nicméně v malosériové výrobě a montážních pracích má nezastupitelnou roli. Ukázku svařování lze vidět na obr. 2. Metoda je také hojně využívána pro domácí použití díky levné pořizovací ceně zdroje a elektrod, které lze vidět na obrázcích 1 a 4. Důležitou roli v procesu svařování hraje také druh svařovaného materiálu. Dle něj jsme nuceni přizpůsobit výběr elektrod a parametry zdroje, jako je svařovací proud a napětí.



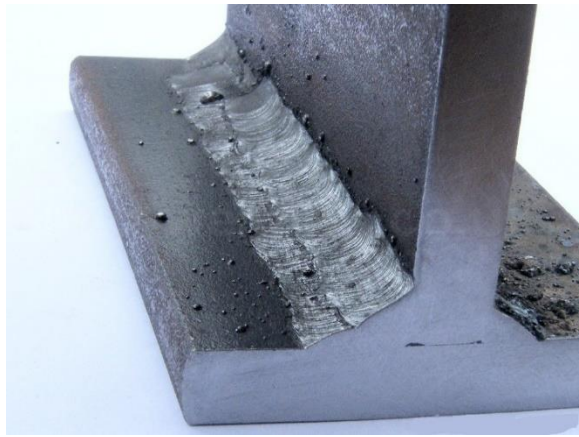
Obr. 1 Svářecí zdroj [3]



Obr. 2 Svářec [4]



Obr. 4 Svarová lázeň [6]



Obr. 3 Koutový svar [5]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [7,8]

V praktické části práce bude provedeno měření výkonových vlastností elektrod při svařování dvou druhů ocelí, konkrétně uhlíkové a austenitické. Jako uhlíková ocel byla zvolena S235JR podle ČSN EN. Pro reprezentaci austenitické oceli byla zvolena X5CrNi18-10 podle ČSN EN. Na výše vybraných vzorcích budou provedeny zkušební návary v podobě tří svarových housenek, kdy každá housenka bude odpovídat jedné elektrodě.

Pro uhlíkovou ocel byl vybrán typ elektrod E-B 121 o průměru 2 mm a délce 300 mm od firmy ESAB, vzorek oceli je zobrazen na obr. č. 5. Jedná se o univerzální elektrody s bazickým obalem pro značně namáhané součásti (tlakové nádoby, lodní a stavební konstrukce). Vhodná je pro všechny svařovací polohy kromě svislé shora dolů.

Na austenitickou ocel budou návary provedeny elektrodami typu OK 61.30 o průměru 2 mm a délce 300 mm, rovněž od firmy ESAB. Vzorek oceli lze vidět na obrázku č. 6. Jedná se o elektrodu s rutil-kyselým obalem pro svařování nerezavějících austenitických i neaustenitických ocelí. Elektroda je vhodná pro svařování ve všech polohách.



Obr. 5 Plech oceli S235JR



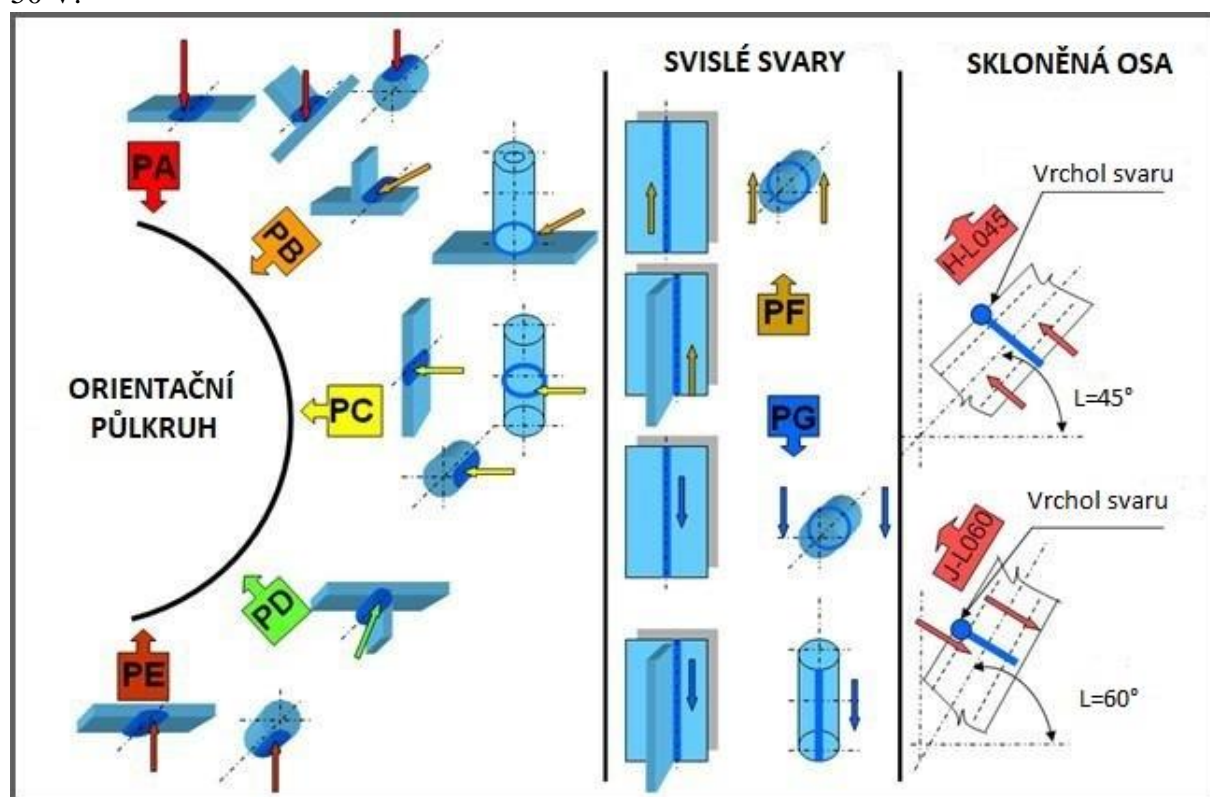
Obr. 6 Plech oceli X5CrNi1810

2 METODA RUČNÍHO OBLOUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ [1,2,9]

Metody svařování lze rozdělit do dvou hlavních skupin, jejichž kritériem rozdělení je typ dodávané energie pro vznik svaru:

- metody tavného svařování,
- metody tlakového svařování.

Metoda 111 se řadí do skupiny tavného svařování. Jako zdroj tepla je při této metodě využíván elektrický oblouk, který hoří mezi tavící se obalovanou elektrodou a svařovaným materiálem. Ke vzniku nerozebíratelného spojení tedy dojde vlivem natavení základního materiálu, přidáním spojovacího materiálu a jeho následného ztuhnutí. Metoda je velmi univerzální, lze svařovat ve všech polohách (obr. 7) a téměř všechny materiály. Hodnoty svařovacího proudu se pohybují v rozmezí 10 až 2000 A, napětí na oblouku v rozsahu 10 až 50 V.



Obr. 7 Polohy svařování [9]

2.1 Elektrický oblouk [1,2,10]

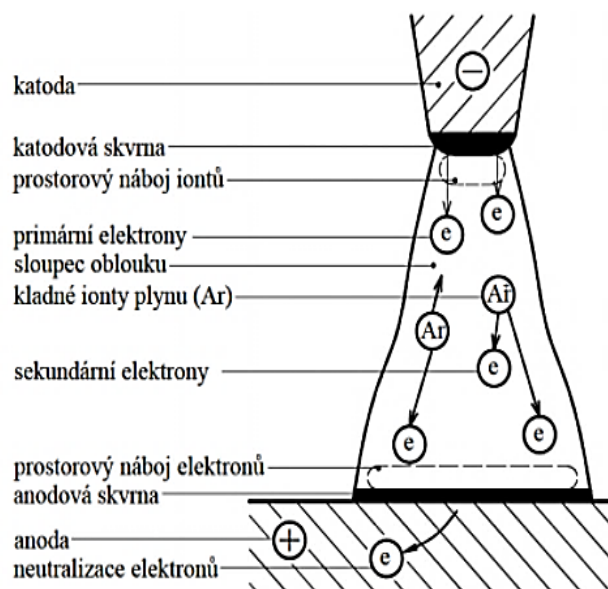
Elektrický oblouk, který je zdrojem tepla pro vznik svaru, lze definovat jako elektrický výboj za atmosférického tlaku a normální (pokojové) teploty. Při elektrickém výboji dojde k přenosu proudu mezi elektrodami v plynném prostředí. Toho jsme schopni dosáhnout pouze v případě, že je plyn ionizovaný. Ionizace je proces, při kterém se z neutrálního atomu stane iont (aniont, kationt). Po vytvoření stabilního elektrického oblouku je do okolí vyzařováno teplo, světlo a také zdraví nebezpečné ultrafialové záření. Zapálení oblouku se uskutečňuje při napětí naprázdno, toto napětí má vyšší hodnotu než napětí při ustáleném hoření oblouku. U ručního obloukového svařování se zapálení oblouku provádí dotykem či škrtnutím o svařovaný materiál. Při dotyku elektrody dojde k ohřátí materiálu na vysokou teplotu vlivem elektrického odporu. Díky tomu je zajištěna termoemise primárních elektronů, které ionizují okolní prostředí a může dojít k růstu elektrického oblouku. Z hlediska elektrotechnického jsou

pro oblouk typické tyto vlastnosti: vysoký proud, nízké napětí a malý úbytek anodového napětí. Oblouk lze rozdělit na tři hlavní oblasti: sloupec oblouku, katodovou skvrnu a anodovou skvrnu, nejlépe jde popsat vybrané části na stejnosměrném oblouku viz obr. 8.

Sloupec oblouku – oblast vymezená úbytky napětí na obou elektrodách. Jedná se o největší část oblouku, která se jeví jako neutrální sloupec plynů v plazmatickém stavu (tedy silně ionizovaný plyn, který je dobře vodivý). Při případné nárazové ionizaci vznikne pouze takový počet nových elektrických nábojů, kolik jich současně zanikne. Ve sloupci plazmatu se tedy nacházejí elektrony a ionty, kdy dochází k pohybu elektronů z katody na anodu, v případě kationtů je směr pohybu opačný. Pokles napětí v této části oblouku je rovnoměrný a teplota zde dosahuje hodnoty až 5000 °C. Maximální teploty se nacházejí ve středu oblouku a směrem ke krajům klesají.

Katodová skvrna – ostře ohraničená oblast, na které dochází k termoemisi prvotních elektronů. Ty jsou důležité pro zapálení oblouku a následnou ionizaci plynu. Elektrony jsou schopny ionizace díky vysoké kinetické energii, kterou získají v oblasti úbytku napětí. Pokles napětí je tedy výsledkem termoemise a následného urychlení elektronů. Tloušťka vrstvy úbytku je cca 0,1 mm a hodnota úbytku napětí se pohybuje v hodnotách 8-16 V, přičemž při snížení proudu narůstá úbytek napětí. Teplota katodové skvrny není stálá a obecně vzrůstá s tím, jak roste proud. Obecně se hodnoty pohybují mezi 2400-3000 °C. Katodová skvrna je také typická vysokou hodnotou proudové hustoty dosahující hodnot až 1500 A.mm⁻².

Anodová skvrna – oblast, kde dochází k neutralizaci dopadajících záporných částic a jejich následnému odvodu. Při dopadu se vysoké hodnoty kinetické energie přeměňují na teplo a částečně také na elektromagnetické záření. Teplota skvrny se pohybuje v rozmezí 2700-3600 °C. Tyto teploty jsou vyšší než hodnoty teploty varu svařovaných materiálů. Odpařované atomy kovu tedy vstupují do oblasti sloupce oblouku, kde dochází k jejich ionizaci. Stejně jako v předchozích dvou oblastech i zde dochází k úbytku napětí. Tloušťka vrstvy úbytku je až 10⁻³ mm a úbytek napětí 1-3 V.



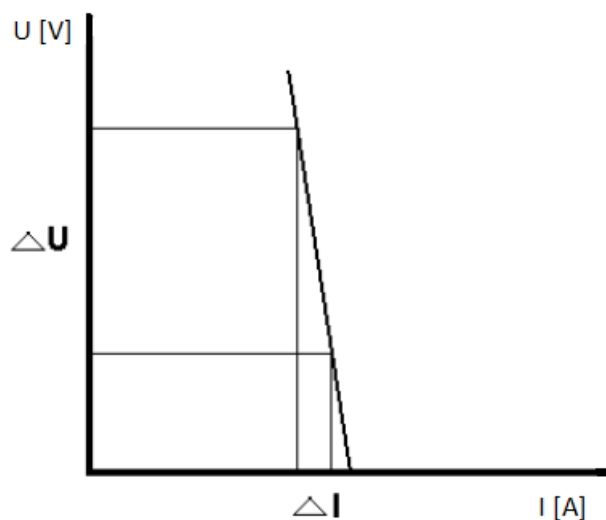
Obr. 8 Elektrický oblouk [1]

2.2 Voltampérová charakteristika oblouku a zdroje [1,2,10,12,13,14]

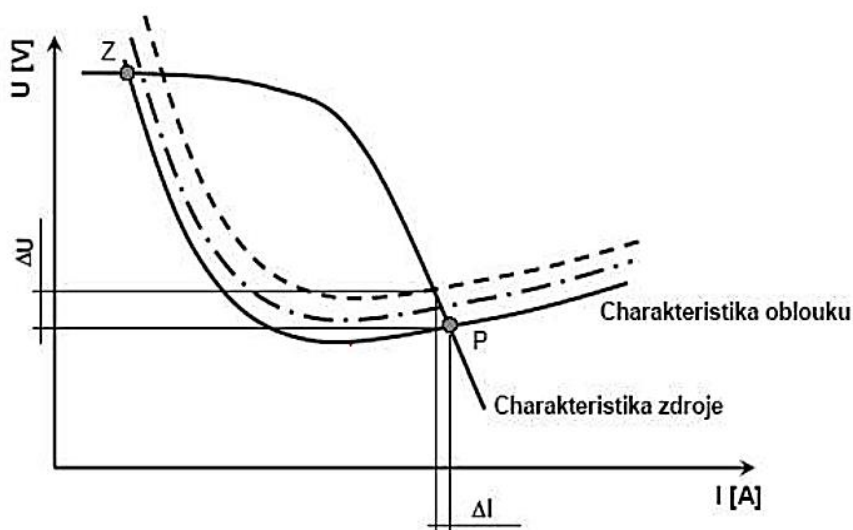
Významnou roli v teorii svařování elektrickým obloukem hraje voltampérová charakteristika. Ta nám udává závislost elektrického napětí na svařovacím proudu. Charakteristiku rozeznáváme jak pro oblouk, tak pro zdroj svařovacího proudu. V obou případech lze charakteristiky rozdělit na statické a dynamické. Statická charakteristika oblouku je typická jeho konstantní délkou, nedochází tedy k jeho kolísání vlivem zhasínání či zapalování oblouku nebo lidským faktorem. Naopak dynamická charakteristika popisuje reálný proces svařování, kdy se délka oblouku mění.

Pro ruční obloukové svařování je vhodná statická charakteristika zdroje s klesající tendencí, a to konkrétně strmou. Strmá charakteristika nám zaručí, že při změně napětí nedojde k výrazné změně svařovacího proudu, který je hlavním faktorem pro tvorbu a kvalitu svaru. Příklad klesající charakteristiky lze vidět na obr. číslo 9.

Spojením statické charakteristiky oblouku a zdroje do jednoho grafu vzniknou dva průsečíky. První průsečík se nazývá zápalný bod, viz obr. číslo 10. V tomto bodě dojde k zapálení oblouku a prudkému úbytku napětí na obou charakteristikách. Druhým bodem je pak bod pracovní. Tomuto bodu odpovídají hodnoty pracovního proudu a napětí, kterými charakterizujeme svařovací proces.



Obr. 9 Strmá charakteristika [13]



Obr. 10 Spojení charakteristik [14]

2.3 Svařovací zdroje [1,2,10,11,12,14]

Svařovací zdroje slouží k dodávání elektrického proudu do svařovacího obvodu. Během let prošly od prvopočátku celou řadou úprav a inovací. Zvláště rozvoj polovodičové techniky umožnil optimalizaci stávajících a vznik nových druhů zdrojů. Díky tomu došlo ke zvýšení efektivity, snížení hmotnosti a v neposlední řadě také ke snížení hlučnosti zdrojů. Zdroje můžeme dělit podle několika hledisek.

Podle dodávaného proudu dělíme zdroje na:

- zdroje střídavého proudu (svařovací transformátory),
- zdroje stejnosměrného proudu (svařovací dynama),
- zdroje usměrněného proudu (svařovací měniče a usměrňovače).

Podle přeměny energie dělíme na:

- zdroje rotační (svařovací dynamo),
- zdroje netočivé, statické (svařovací transformátory, měniče a usměrňovače).

Skupinu netočivých zdrojů můžeme dále dělit na několik skupin:

- ❖ zdroje se síťovým transformátorem,
 - zdroje střídavého proudu (svařovací transformátory),
 - zdroje stejnosměrného proudu (řízené a neřízené usměrňovače).
- ❖ zdroje bez síťového transformátoru (svařovací měniče).

V dnešní době je z této škály zdrojů nejvíce využívaný svařovací měnič nebo také invertor, název není ustálen.

2.3.1 Vlastnosti základních druhů svařovacích zdrojů [1,2,10,14,15]

Točivými (rotačními) zdroji rozumíme dvojici elektromotor a dynamo. Elektromotor může být nahrazen vznětovým motorem. Tyto zdroje mají dobré svářecí vlastnosti, avšak mezi nevýhody patří velká hlučnost a vysoká spotřeba energie. V současnosti se tyto zdroje téměř nevyužívají.

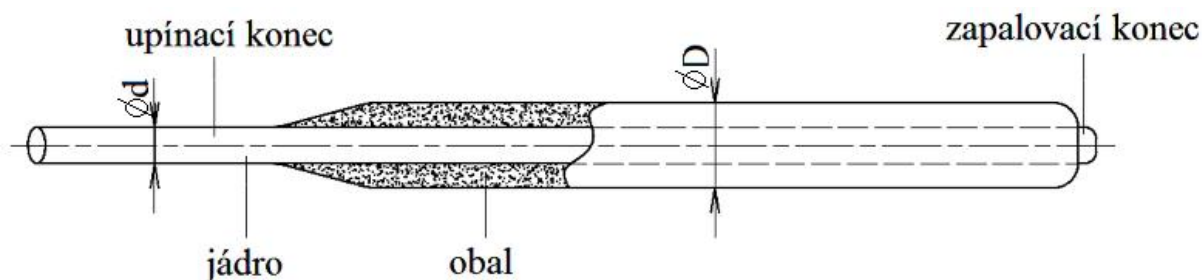
Transformátory mají své přednosti v lehké konstrukci. Kolem jádra vyrobeného ze železa jsou omotány dvě cívky, primární (velký počet závitů, malý průměr drátu) a sekundární (malý počet závitů, velký průměr drátu). Při průchodu proudem primárním vinutím vzniká v jádru elektromagnetické střídavé pole, které poté indukuje střídavý proud v sekundárním vinutí. V současné době se však transformátory vyrábí pro hobby použití a jsou vytlačovány cenově stejně dostupnými usměrňovači.

Usměrňovač je soustava skládající se z transformátoru, usměrňovacího můstku a tlumivky. V případě, že je usměrňovací můstek tvořen tyristory místo diod, hovoříme o tzv. řízeném usměrňovači.

Invertory nebo také měniče či střídače tvoří nejdynamičtější se rozvíjející skupinu svařovacích zdrojů. Primárně se jedná o řízené zdroje s výkonovými tranzistory. Ty pracují na principu středofrekvenčních měničů pracujících s frekvencemi v rozsahu 20 až 100 kHz. Velkou výhodou této skupiny zdrojů je jejich malá hmotnost a velikost, a to při zachování vysoké účinnosti. Tohoto je docíleno díky uspořádání v elektrickém řetězci, kdy transformátor je umístěn až a spínacím tranzistorem. Příčinou takového uspořádání je závislost hmotnosti a objemu transformátoru v závislosti na pracovní frekvenci. Se zvyšující se frekvencí klesá hmotnost a objem transformátoru. Srdcem celého invertoru je potom řídicí jednotka, která koriguje součinnost funkčních bloků, podávání drátu nebo dodávání ochranného plynu a v neposlední řadě zajišťuje ke komunikaci s obsluhou.

2.4 Elektrody [1,2,10,11,12,14,15,16]

Při ručním obloukovém svařování je jako přídavného materiálu využíváno obalených elektrod. Elektroda je tvořena drátem (jádre), kolem kterého je vyjma upínacího konce nanesen obal, viz obr. 11. Obal se na elektrody nanáší dvěma druhy výrobních procesů. Jedná se o máčení nebo lisování. Elektrody lze rozčlenit na několik skupin dle daných kritérií, zejména se jedná o rozdělení podle druhu obalu, tloušťky obalu, použití elektrod, vlastností atd.



Obr. 11 Obalovaná elektroda [13]

Dle základního materiálu se elektrody dělí na:

- elektrody pro svařování nelegovaných nízkouhlíkových ocelí,
- elektrody pro svařování nízkolegovaných ocelí,
- elektrody pro svařování nízkolegovaných žárupevných ocelí,
- elektrody pro svařování vysokolegovaných ocelí,
- elektrody pro svařování barevných kovů,
- elektrody pro svařování šedé litiny,
- elektrody pro navařování vrstev se zvláštními vlastnostmi,
- elektrody pro jadernou energetiku,
- elektrody pro zvláštní účely.

Dle složení obalu elektrod se elektrody rozdělují na:

- stabilizační,
- rutilové,
- rutil-celulózové,
- rutil-kyselé,
- rutil-bazické,
- rutilové tlustostěnné,
- kyselé,
- bazické,
- celulózové.

Dle poměru celkového průměru D k průměru jádra d jsou elektrody rozděleny na:

- tence balené,
- středně tlustě balené,
- tlustě balené,
- velmi tlustě balené.

Obal elektrod plní několik důležitých funkcí, které jsou nezbytné pro zapálení oblouku, jeho následné hoření a pro přechod přídatného materiálu do svarové lázně. Obal plní při svařování funkci:

- Fyzikální – spočívá ve tvorbě plynové a struskové ochrany svarové lázně, dále také v zabezpečení příznivých podmínek pro přenos kovu. Po dokončení svařovací operace zůstává svar zakrytý vrstvou tuhé strusky, která slouží jako ochrana proti oxidaci. Struska mimo jiné působí také jako tepelný izolant a výrazně snižuje rychlost ochlazování svaru, proto se doporučuje odstraňovat strusku až po vychladnutí.
- Metalurgickou – jako hlavní je především desoxidace a rafinace svarové lázně a redukci koncentrace oxidů, síry a fosforu. Dochází například k vázání síry na vápník, kdy dojde ke vzniku sulfidu vápenatého, který je odplaven do strusky. Metalurgické děje probíhají na rozhraní fází svarová lázeň-tekutá struska a mají pozitivní dopady na vlastnosti svarového kovu.

- Elektrická – tato funkce je zabezpečována díky ionizačním prvkům, mezi které patří hlavně vápník a sodík. Jsou to tedy prvky s malou ionizační energií a vytváří vhodné podmínky pro zapálení oblouku a jeho následné stabilní hoření. V obalu se však vyskytují prvky, které mají opačnou funkci, jako například kazivec, respektive fluor. Kazivec je základní složkou bazických obalů kvůli svým schopnostem vylepšit plastické vlastnosti kovu. Z těchto důvodů bývají bazické elektrody připojovány na kladný pól zdroje a pouze při stejnosměrném proudu.
- Operativní – nejvíce se projevuje při svařování elektrodami s velkou tloušťkou obalu, během jejich odtavování se v obalu vytvoří charakteristický kráter. Tento kráter usměrňuje pohyb odtavujících se kapek svarového kovu. Významně se tedy snižuje rozstřík a zároveň zvyšuje odtavovací výkon elektrod.
- Legovací – zvláště důležitá je tato funkce při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Velká část těchto elektrod má jádro z nelegované nízkouhlíkové oceli a legování svarového kovu tedy probíhá prvky obsaženými v obalu. Mezi typické legovací prvky patří Cr, Ni, V, Cu a Mn. Druh a množství prvků se mění dle požadavků na výsledné chemické složení svaru.

2.4.1 Vlastnosti základních druhů obalů elektrod [2,11,15,17]

Kyselý obal (A) – kyselé obaly obsahují velký podíl oxidů železa, tedy i vysoký potenciál dezoxidačních látek. Tento druh obalu se používá pro svařování jak stejnosměrným, tak i střídavým proudem. V případě použití stejnosměrného proudu se elektroda zapojuje na záporný pól (přímá polarita). Elektrody snášejí i vyšší hodnoty svařovacího proudu, tedy i přetížení. Svarová lázeň se vyznačuje řídkým tečením, tím pádem je manipulace s elektrodami složitější. Svar má velkou hloubku průvaru, housenka je úhledná s plynulým přechodem do základního materiálu. Struska je snadno odstranitelná, často dochází k samovolnému odstranění. Kyselé elektrody jsou typické vysokými odtavovacími výkony. Kyselý obal nemá oproti bazickému tak dobré rafinační schopnosti, z čehož plyne menší houževnatost svarového kovu než u obalů bazických.

Bazický obal (B) – elektrody s bazickým obalem jsou nejrozšířenější typ u nás. V obalu převládá kazivec a vápenec. Tento typ obalu je určen pro svařování stejnosměrným elektrickým proudem, přičemž se připojují na kladný pól (nepřímá polarita). Špatně reagují na přetížení proudem, elektroda se rozpálí. Svarová lázeň je hustě tekoucí, manipulace s elektrodami je proto velmi dobrá. Nutno svařovat krátkým obloukem. Hloubka závaru není příliš velká, obal je vhodný pro navařovací elektrody. Odtavovací výkon je nízký, kresba méně úhledná, struska se v porovnání s kyselou elektrodou hůře odstraňuje. Bazický obal je charakteristický velmi dobrými rafinačními schopnostmi, tudíž houževnatost a odolnost proti vzniku trhlin svarového kovu je v porovnání s ostatními obaly lepší.

Rutilový obal (R) – dominantní sloučeninou v obalu je rutil (oxid titaničitý), dále obsahuje živec, křemen a další složky. Rutilové elektrody jsou vhodné pro svařování stejnosměrným i střídavým proudem, kdy se elektroda při stejnosměrném svařování připojuje na záporný pól (kladná polarita). Svarová lázeň je hustě tekoucí a dochází k jejímu rychlému tuhnutí. Hloubka závaru není příliš velká. Tento typ je vhodný pro svařování tenkých plechů, stehování a dobře překlenuje větší mezery. Struska se snadno odstraňuje. Mechanické vlastnosti jsou o lepší než u kyselých elektrod, avšak nedosahují kvalit elektrod bazických. Výhodou rutilového obalu je jeho netečnost na vlhkost.

2.4.2 Sušení a skladování elektrod [1,2,15]

Velkou pozornost je třeba věnovat skladování elektrod a jejich sušení, neboť v případě nesplnění předepsaných požadavků se bezprostředně odráží na kvalitě svarového spoje. Elektrody by měly být uloženy v suché, dobře větrané místnosti s nekolísající teplotou, přičemž nejnižší dovolená teplota je 15 °C. Je užitečné do místnosti umístit silikagel ke snížení relativní vzdušné vlhkosti, jejíž hodnota by měla být maximálně 60 %. Pokud jsou balení s elektrodami umísťovány na sebe, je třeba dbát na to, aby se spodní balení nepoškozovala vlivem tíhy navršených balení. Před začátkem svařovacího procesu je třeba elektrody vysušit dle doporučení výrobců, viz tabulka 1.

Tabulka 1 Teploty sušení [2]

Druh obalu elektrody	Režim teploty sušení
Bazický	100 °C/1 hod, 350-400 °C/2 hod
Kyselý	120-150 °C/2 hod
Rutilový	Až 120 °C/2 hod

2.4.3 Označování elektrod [1,2,15]

Značení elektrod pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí dle ČSN EN ISO 2560 je možné dvěma způsoby, přičemž umožňuje použití jednoho, případně obou. Způsob „A“ staví na hodnotě meze kluzu a na minimální nárazové práci 47 J. Druhý způsob „B“ je založen na pevnosti v tahu a minimální nárazové práci 27 J. Chemické složení a mechanické vlastnosti se vztahují k čistému svarovému kovu.

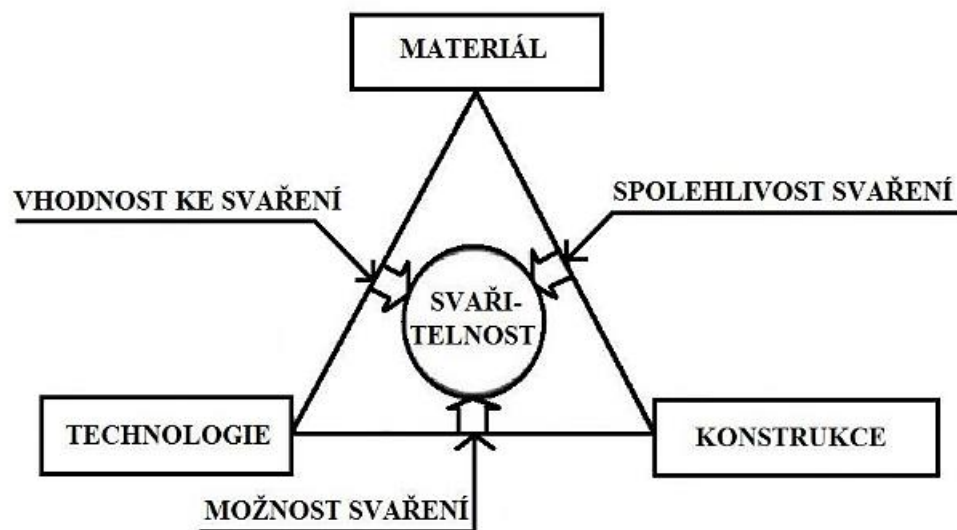
Elektrody pro svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí se označují dle ČSN EN ISO 3581.

V praxi je běžné, že výrobci elektrod používají své vlastní obchodní označování elektrod.

3 SVAŘITELNOST [10,16,17,18]

Pojem svařitelnost je definována jako komplexní charakteristika materiálu vytvořit svařenec, který splňuje požadované vlastnosti a konstrukční spolehlivost při zvolené technologii výroby. V principu lze tedy říci, že se jedná o schopnost materiálu vytvořit svarový spoj, který splňuje dané mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti při využití vybraných technologických, metalurgicko-materiálových a konstrukčních parametrů. Svařitelnost můžeme rozdělit do tří základních skupin (viz obr. 12):

- Materiálově-metalurgická svařitelnost – vyjadřuje vhodnost užití oceli pro svařování, a to z hlediska jejího chemického složení s ohledem na proces výroby oceli. Během vlastního procesu svařování chemické složení oceli ovlivňuje strukturní pochody v TOO. Pokud dojde k chybnému výběru oceli či přídavného materiálu, dojde k tvorbě zakalených struktur, které jsou velmi nežádoucí. V důsledku jejich vzniku může dojít k tvorbě trhlin a jejich následnému šíření, což může vygradovat až k trvalému porušení součásti.
- Technologická svařitelnost – popisuje důsledky výběru metody svařování na výslednou kvalitu svaru. Pod technologickou svařitelnost spadá také výběr přídavného materiálu, dále volba svařovacích parametrů jako např. průměr elektrody, proud, napětí či rychlost svařování. V neposlední řadě zde také spadá výběr vhodného tepelného zpracování oceli po dokončení svařovací operace, tedy např. žihání ke snížení vnitřního pnutí.
- Konstrukční svařitelnost – je především výběr typu svaru a jejich vhodné konfigurace pro dosažení optimálních vlastností při použití svařence k vybranému účelu. Konstrukční svařitelnost nám z návrhového hlediska tedy určuje počet, velikost a uspořádání svarových housenek, tloušťku materiálu a přípravu svarových ploch.



Obr. 12 Druhy svařitelnosti [10]

3.1 Vliv chemického složení na svařitelnost uhlíkových ocelí [16,17,18,19]

Výše obsahů jednotlivých prvků přímo ovlivňuje mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti ocelí. Jednotlivé prvky ovlivňují sváření ocelí následovně:

- Uhlík – prvek, který je přítomen ve všech ocelích má zásadní vliv na její vlastnosti, potažmo svařitelnost. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku dochází ke ztrátě plastických vlastností (kontrakce a tažnost), naopak však dojde ke zvýšení vlastností pevnostních (mez pevnosti, mez kluzu). Rovněž při zvýšení obsahu uhlíku dojde ke zvýšení tvrdosti martenzitické struktury. Ta vzniká při rychlém ochlazení a její přítomnost je nežádoucí, tudíž je obsah uhlíku v nelegovaných ocelích omezován na 0,25 hm %. Při tomto obsahu se v TOO dosáhne 50% martenzitické struktury o tvrdosti 350 HV. Tato hodnota byla stanovena jako nejvyšší přípustná u uhlíkových ocelí, které neprošly tepelným zpracováním. V případě, že dojde k překročení stanovené meze uhlíku, je potřeba do procesu svařování zařadit předehřev a tepelné zpracování.
- Dusík – v ocelích se vyskytuje v množství, které se odvíjí od technologie výroby. Patří mezi austenitotvorné prvky a rozšiřuje tedy oblast gamma. Podobně jako uhlík zvyšuje pevnostní charakteristiky a tvrdost, přičemž plastické vlastnosti snižuje. Při vylučování nitridů dusíku dochází k jevům jako je stárnutí a křehkost. Obecně se dusík považuje za nežádoucí prvek.
- Vodík – jedná se o zcela nežádoucí prvek, do struktury se dostává již při výrobním procesu, následně pak i při svařovacím procesu. V kovu tvoří hydridy nebo je rozpuštěn. Vodík je původcem vad ve svarových spojích jako např. oduhličení svarového kovu a jeho pórovitost, vznik trhlin ve svarovém kovu. Riziko vodíku ve výsledné struktuře lze minimalizovat následujícími způsoby. Řádným vysušením obalu elektrod, očištěním svařovaných částí od maziv či barviv.
- Mangan – zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, aniž by byla zásadně snížena plasticita. Díky tomu je možno dosáhnout ve svařitelných uhlíkových ocelích vyšších pevnostních charakteristik, než by odpovídalo maximálnímu obsahu uhlíku 0,25 %. Mangan patří do skupiny dezoxidačních prvků a používá se k výrobě uklidněných ocelí. Jeho obsah se v nelegovaných uhlíkových ocelí pohybuje v rozmezí 0,3 až 1,7 hm. %.

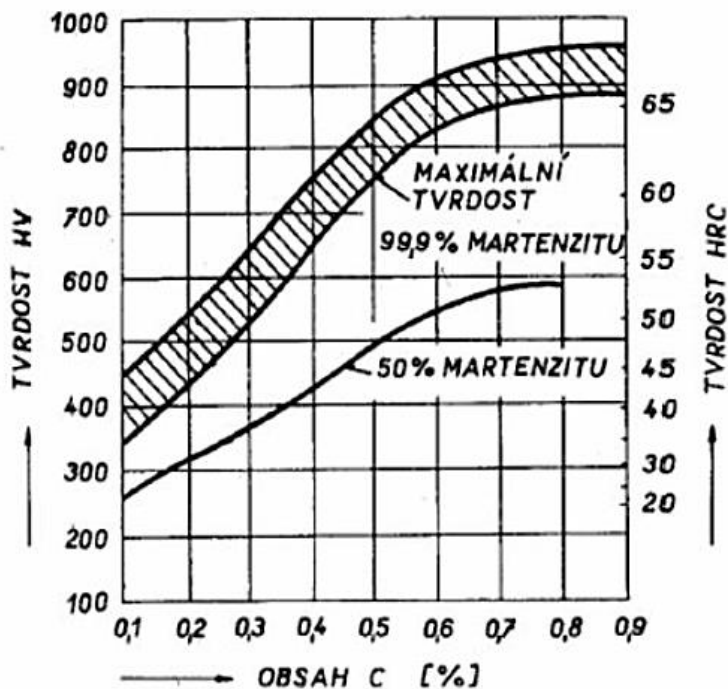
3.2 Uhlíkový ekvivalent [16,17]

Pomocí uhlíkového ekvivalentu se stanovuje svařitelnost ocelí s ohledem na její chemické složení. Ekvivalent uhlíku rovněž vyjadřuje, do jaké míry se jednotlivé prvky podílí na kalitelnosti oceli. Při zakalení oceli dojde ke vzniku křehkých zakalených struktur, jmenovitě jde o martenzit a horní bainit. Tyto struktury vznikají při svařovacím procesu v TOO a přímo ve svarovém kovu, tudíž svařování nejen komplikují, ale následně může dojít k porušení vytvořeného svaru. Uhlíkové ekvivalenty se počítají podle mnoha vzorců, některé zohledňují také tloušťku svařovaného materiálu. Výběr vhodného vzorce závisí na konkrétní situaci a úvaze technologa. Často používaný vzorec navrhl mezinárodní svářečský institut (IIW), který platí pro oceli s $C < 0,25 \%$.

$$CE = \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (3.1)$$

3.3 Svařitelnost uhlíkových ocelí [18,19,20,21]

V původních ČSN normách byly uhlíkové oceli řazeny do tříd 10, 11 a 12. Podle současné normy ČSN EN 10027-1 jsou řazeny podle mechanických a fyzikálních vlastností, nebo podle chemického složení. Svařitelnost uhlíkových ocelí je primárně ovlivňována jejich chemickým složením, výrobci ocelí většinou u uhlíkových ocelí udávají pouze obsahy C, Mn, Si, P a S. Z těchto prvků má na svařitelnost největší vliv uhlík. S jeho rostoucím obsahem se zvyšuje náchylnost oceli k zakalení, kdy ve struktuře vzniká martenzit. Současně dochází ke zvýšení náchylnosti na vznik studených trhlin, a to převážně v TOO svaru. Závislost tvrdosti na obsahu martenzitu ve struktuře udává graf na obr. 13. Z výše uvedených důvodů je obsah uhlíku ve svařitelných ocelích omezen na hodnotu 0,25 % hm. maximálně. Při dodržení této hodnoty není nutno svařovaný materiál předehřívát. Podle IWW se nedoporučuje předehřívát svarové spoje uhlíkových ocelí s mezí pevnosti do 700 MPa, při splnění kritérií uvedených v tabulce číslo 2.



Obr. 13 Vliv martenzitu na tvrdost [18]

Tabulka 2 Předehřev na základě vlastností [19]

Tloušťka svaru s [mm]	Obsah C [%]	C _{E IWW}
s ≤ 25	C ≤ 0,22	C _{E IWW} ≤ 0,45
s ≤ 37	C ≤ 0,22	C _{E IWW} ≤ 0,41

Teplota předehřevu, která zamezuje vzniku studených trhlin, nezávisí pouze na chemickém složení oceli. Vliv má také obsah difuzního vodíku a tuhost konstrukce, proto je užitečné přesvědčit se o nutnosti použití předehřevu také pomocí rovnic k tomu určených.

Dohřev s výjimkou svařování velkých tlouštěk materiálů nebývá nutný. Teplota interpass neboli mezihousenková teplota se ve většině případů u svařování uhlíkových nepředepisuje. Pokud dojde ke svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku, popřípadě větších tlouštěk, je nutno svarové spoje vždy předehřívát. Teploty předehřevu v závislosti na obsahu uhlíku jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3 Teploty předehřevu podle obsahu uhlíku [19]

Obsah uhlíku [hm. %]	0,20 až 0,30	0,30 až 0,45	0,45 až 0,80
Teplota předehřevu [°C]	100 až 150	150 až 275	275 až 425

3.4 Svařitelnost vysokolegovaných ocelí [17,18,19,20,21]

Vysokolegované oceli obsahuje více než 10 hm. %. Celkového obsahu legur a dle bývalé ČSN normy jsou řazeny do třídy 17. Vysokolegované oceli jsou vyráběny zejména pro:

- zlepšení korozních vlastností,
- zlepšení žáruvzdorných vlastností,
- zlepšení žárupevných vlastností,
- zvýšení odolnosti proti opotřebení.

Korozivzdorné oceli se vyznačují schopností pasivace. Vznikem pasivačního filmu na povrchu jsou schopny odolávat elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Nutnou podmínkou pro vznik pasivační vrstvy je minimální obsah chromu v tuhém roztoku, konkrétně 11,5 hm. %. Žáruvzdorné oceli odolávají chemické korozi a oxidaci v plynech při zvýšených teplotách (nad 600 °C). Hlavními legovacími prvky jsou Cr, Al a Si. Tyto prvky vytvoří na povrchu vrstvu oxidů, která brání opalu. Žáruvzdorné oceli odolávají creepu (časově proměnná plastická deformace), jsou typické vysokými hodnotami meze pevnosti při tečení. Tyto vlastnosti mají na svědomí legury jako Cr, W, Mo, Ti a další.

Legující prvky lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- austenitotvorné,
- feritotvorné.

Vysokolegované oceli můžeme podle dosažené mikrostruktury dělit na:

- feritické chromové oceli,
- martenzitické chromové oceli,
- austenitické Cr-Ni, Cr-Ni-Mo oceli,
- duplexní (austeniticko-feritické) Cr-Ni, Cr-Ni-Mo oceli.

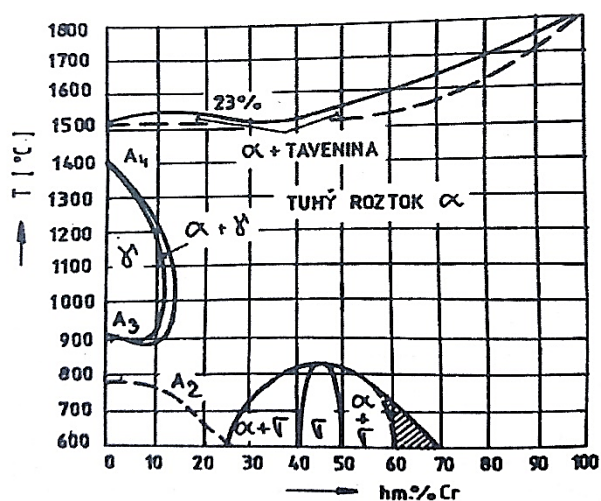
Mezi austenitické oceli řadíme také Cr-Mn oceli, popřípadě Cr-Ni-Mn oceli. Mangan je levnější austenitotvorný prvek než Ni, proto ho v některých případech nahrazuje úplně nebo jen z části. Jejich korozivzdornost však není příliš dobrá, proto se tyto oceli dnes téměř nevyrábí.

3.4.1 Struktura vysokolegovaných ocelí [17,18,19,20,21]

Struktura vysokolegovaných korozivzdorných ocelí je dána jejich chemickým složením. Informace o typech struktur získáváme pomocí binárního diagramu Fe-Cr na obr.14. Chrom je podle vlivu na výslednou strukturu řazen mezi feritotvorné prvky. V praxi to znamená, že v binárním diagramu otevírá oblast α a zároveň uzavírá oblast γ .

Struktura Cr-Ni ocelí je výsledkem působení jednotlivých austenitotvorných a feritotvorných prvků. Vlivem těchto dvou skupin prvků je počítán dle ekvivalentů, konkrétně se jedná o Ni_E pro austenitotvorné prvky a Cr_E pro prvky feritotvorné. Na základě těchto dvou ekvivalentů bylo zkonstruováno velké množství konstitučních diagramů. Tyto diagramy se používají pro odhad výsledné struktury Cr-Ni ocelí. Mezi základní typy diagramů patří Schaefflerův diagram a De Longův diagram.

Schaefflerův diagram se používá pro odhad struktury Cr-Ni austenitických ocelí s nízkým obsahem dusíku. Naopak De Longův diagram je přesnější, neboť při výpočtu Ni_E je zde zařazen i dusík s koeficientem 30. Na základě této výpočetní korekce lze použít De Longův diagram i pro Cr-Ni oceli s dusíkem.



Obr. 14 Binární diagram Fe-Cr [18]

3.4.2 Austenitické Cr-Ni oceli [18,19,20,21,22]

Austenitické oceli obvykle obsahují 18 až 20 % Cr (minimální obsah je 16,5 % Cr), dále 8 až 11 % Ni. Obsah uhlíku v těchto ocelích vzhledem k MKK se doporučuje do 0,03 %. Při vyšším obsahu uhlíku je nutné austenitické Cr-Ni oceli podrobit tepelnému zpracování v podobě žhání při teplotě okolo 1050 °C. Z této teploty je poté nutno ocel rychle ochladit, čímž dojde k potlačení precipitace karbidů a získá se austenitická struktura i u ocelí s obsahem uhlíku 0,10 %. Austenitické oceli mají asi o 50 % větší teplotní roztažnost a o 30 % nižší tepelnou vodivost než oceli feritické. Při svařovacím procesu má tento fakt za následek vznik větších napětí a deformací v porovnání s feritickými oceli.

Svařitelnost austenitických Cr-Ni korozivzdorných ocelí ovlivňují tři hlavní faktory:

- Náchylnost ke tvorbě teplých trhlin – ke vzniku teplých krystalizačních trhlin dochází pouze ve svařovém kovu, likvační a polygonizační trhliny se mohou objevovat navíc i v TOO. Důvodem vzniku trhlin je obsah nežádoucích prvků, jako jsou S, P, ale také prvků jako Ti, Si, Nb. Tyto prvky buďto snižují plasticitu tuhneícího kovu, popřípadě vytvářejí s niklem nebo železem eutektika, jež zásadně snižují technologickou pevnost hranic zrn. Snaha je tedy udržet obsahy těchto prvků na minimu, případně vytvořit sloučeniny, které přejdou do strusky. Zásadním faktorem pro minimalizaci rizika vzniku teplých trhlin je obsah δ -feritu. Ve svařových kovech se při teplotě okolí vyžaduje obsah δ -feritu mezi 3 FN a 15 FN (FN-feritové číslo). Vyšší obsahy mají za následek snížení antikoročních vlastností ocelí. Pro snížení náchylnosti ke vzniku teplých trhlin se dle ČSN EN 1011-3 doporučuje:
 - použít přídavné materiály s nízkým obsahem nečistot,
 - snížit tuhost upnutí spoje,
 - použít nízký tepelný příkon a zabránit vzniku širokých svařových lázní.
- Precipitace karbidů Cr vedoucí k MKK – mezikystalová koroze u korozivzdorných ocelí se může vyskytovat v pásmu zcitlivění, které leží v rozmezí teplot 425 až 815 °C. O tom jak MKK vzniká se uvádí řada teorií:
 - teorie ochuzení, tedy změnou chemického složení tuhého roztoku na hranicích zrn v okolí precipitátů,
 - teorie napětí, tj. energetickými rozdíly v místech, kde dochází k vylučování sekundární fáze,
 - teorie článků, tedy rozpuštěním rozhraní zrn vlivem vzniku místních článků.Všechny tři teorie udávají jako primární příčinu vzniku MKK precipitaci karbidů, případně nitridů chromu. Zabránění vzniku mezikystalové koroze je možné potlačením precipitace karbidů chromu. Precipitace je závislá na řadě faktorů:
 - a) chemické složení oceli,
 - b) dobu setrvání v oblasti kritických hodnot,
 - c) stabilizaci oceli,
 - d) mechanické a tepelné zpracování.
- Zkřehnutí a vznikem σ -fáze – fáze σ je intermetalická sloučenina charakteristická svou tvrdostí a křehkostí a bývá příčinou zkřehnutí austenitických ocelí. Její vznik je podmíněn určitou teplotou, konkrétně 500 až 820 °C. V tomto rozmezí se vyskytuje buďto sama, popřípadě s fází α , v závislosti na množství chromu v oceli. Vznik fáze sigma podporuje mnoho činitelů, například:
 - feritotvorné prvky, které vyvolají vznik chromem bohatší fáze α a napomohou přeměně ve fázi σ ,
 - karbidotvorné prvky, jako Ti, Zr, Nb, zabrání vázání chromu na karbidy a způsobí posun ve fázovém diagramu k vyšším obsahům Cr,
 - heterogenita taveb, lokální obohacení fáze α chromem,
 - místní přesycení chromem při prudkém ochlazení.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [15,23]

V rámci experimentu bylo provedeno měření výkonových vlastností elektrod. Vedle operativních vlastností elektrod jsou důležité pro svařování rovněž výkonové vlastnosti. Ty jsou velkou měrou závislé na druhu obalu elektrod. V praxi slouží pro předkalkulační a kalkulační práce svářečských výkonů, dále pro stanovení hlavních, vedlejších a celkových časů svářečských operací. V neposlední řadě jsou potřebné pro stanovení spotřeby přídavných materiálů. Výkonové vlastnosti se zjišťují dle ČSN 05 5010, kdy je provedeno navařování a dále měření spolu s vážením. Po zpracování těchto vstupních hodnot je proveden samotný výpočet výkonových vlastností.

4.1 Vlastnosti materiálu a elektrod [24,25,26,27,28,29]

Jako základní materiály pro experiment byly vybrány dva typy oceli, uhlíková a austenitická. V případě uhlíkové se konkrétně jedná o ocel S235JR podle ČSN EN 10025-2. Jedná se o nelegovanou konstrukční ocel obvyklé jakosti. Chemické složení lze vidět v tabulce 4.

Tabulka 4 Chemické složení S235JR v % [27]

Prvek	C	Mn	Si	P	S	N
Podle ČSN EN 10025-2	0,19	max. 1,5	max. -	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,014

Ocel se používá na svařované, nýtované nebo šroubované konstrukce. Jedná se zejména o stavbu hal, mostů, jeřábů, ale také na méně namáhané nosné konstrukce strojů. Ocel je vhodná pro všechny obvykle používané druhy svařování, při zvyšující tloušťce však dochází ke zvýšení obsahu uhlíku, a tedy i uhlíkového ekvivalentu. Tímto tak dochází ke zvýšení rizika studených trhlin. S235JR není určena k tepelnému zpracování vyjma normalizačního žíhání. Mechanické vlastnosti pro vybranou tloušťku oceli zobrazuje tabulka 5.

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti S235JR [27]

Mez kluzu R_{eH} [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost $A_{5,65}$ [%]	Nárazová práce KV [J]	C_{EV}
min. 235	380	26	27	0,35

Jako austenitická ocel byla zvolena X5CrNi18-10 podle ČSN EN 10088-2. Ocel je tedy legována chromem v rozmezí 17 až 19,5 % a niklem v rozsahu 8 až 10,5 %. Uhlík je přítomen v množství menším než 0,07 hm. %. Složení dalších prvků v oceli lze vidět v tabulce 6. Pevnostní a deformační charakteristiky jsou zobrazeny v tabulce 7.

Tabulka 6 Chemické složení X5CrNi18-10 v % [25]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
Podle ČSN EN 10088	\leq 0,07	\leq 1	\leq 2	max. 0,045	max. 0,030	\leq 0,11	17 až 19,5	8 až 10,5

Tabulka 7 Mechanické vlastnosti X5CrNi18-10 [25]

Mez kluzu $R_{p0,1}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{50} [%]	Vrubová houževnatost KV [J]	Max. teplota použití [°C]
250	min. 540	45	90	400

Ocel má vynikající odolnost proti korozi v prostředí vody a vzduchu bez přítomnosti anorganických kyselin a solí. Obrobitelnost je ztížena, je třeba obrábět nástroji z legovaných rychlořezných ocelí. Tváření ohýbáním a tažením je velmi dobré. Svařitelnost je zaručena, může však docházet k mezikrystalové korozi. Mechanické vlastnosti austenitické oceli jsou popsány v tabulce 7. Využití oceli se nachází zejména v potravinářském, farmaceutickém nebo kosmetickém průmyslu. Jedná se o jednu z nejvíce využívaných nerezových ocelí, zejména pro dobrý poměr cena/korozivzdornost. Často se označuje jako ocel potravinářská.

Pro vytvoření návarů byly použity elektrody od firmy ESAB. Konkrétně typ E-B 121 pro uhlíkovou ocel (E 38 3 B 42 H 5 podle EN ISO 2560-A) a typ O.K 61.30 (E 19 9 L R 1 2 podle EN ISO 3581) pro ocel austenitickou. V tabulkách 8 a 9 je vysvětleno značení elektrod.

Tabulka 8 Označení elektrody E-B 121 podle EN ISO [2]

E	Obalovaná elektroda pro ruční obloukové svařování	
38	Min. mez kluzu Pevnost v tahu Minimální tažnost	380 N/mm ² 470-600 N/mm ² 20 %
3	Nárazová práce	Teplota pro min. průměrnou nárazovou práci 47 J je 30 °C
B	Typ obalu	Bazický
4	Jmenovitá výtěžnost Druh proudu	125 % <x <160 % Stejnoseměrný a střídavý proud
2	Poloha svařování	PA, PB, PC, PD, PE, PF
H5	Obsah vodíku	5 g na 100 ml čistého svarového kovu max.

Tabulka 9 Označení elektrody O.K 61.30 podle EN ISO [2]

E	Obalovaná elektroda pro ruční obloukové svařování	
19 9 L	Chemické složení svarového kovu	19 % Cr, 9 % Ni
R	Typ obalu	Rutilový
1	Jmenovitá výtěžnost Druh proudu	x <105 % Stejnoseměrný a střídavý proud
2	Poloha svařování	Všechny polohy mimo PG

V obou případech měly elektrody stejné rozměry, průměr 2 mm a délku 300 mm. Typ E-B 121 je elektroda s univerzálním použitím pro svařování značně namáhaných konstrukcí, jako například tlakové nádoby, lodní zařízení nebo potrubní systémy. S elektrodou je možno svařovat ve všech polohách vyjma svislé shora dolů. Obal je bazický a výkonové parametry uváděné výrobcem jsou zobrazeny v tabulce 10.

Tabulka 10 Výkonové parametry elektrody E-B 121 [7]

Průměr [mm]	Délka [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Výtěžnost [%]	Doba hoření [s]	Podíl sv. kovu [%]	Výkon navaření [kg/h]
2,0	300	60-80	24	121	50	0,60	0,55

Elektroda typu O.K 61.30 použitá pro austenitickou ocel má rutil-kyselý obal. Je určena právě pro ocel X5CrNi18-10 podle ČSN EN 10088-2 a pro stabilizované oceli podobného složení. Není však vhodná pro situace, kde se vyžadují creepové vlastnosti svarového kovu. S elektrodou lze svařovat ve všech polohách. Výkonové vlastnosti uvedené výrobcem lze vidět v tabulce 11.

Tabulka 11 Výkonové vlastnosti elektrody O.K 61.30 [7]

Průměr [mm]	Délka [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Výtěžnost [%]	Doba hoření [s]	Podíl sv. kovu [%]	Výkon navaření [kg/h]
2,0	300	35-65	29	105	29	0,55	0,80

Pro austenitickou ocel je provedeno zobrazení v Schaefflerově diagramu. Pro umístění v diagramu je třeba znát hodnoty chromového a niklového ekvivalentu, ty se vypočtou dle následujících vzorců:

$$Cr_e = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot \%Nb \quad (4.1)$$

$$Cr_e = 18 + 0 + 1,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0 = 19,5$$

$$Ni_e = \%Ni + 30 \cdot \%C + \%Mn \quad (4.2)$$

$$Ni_e = 10 + 30 \cdot 0,07 + 2 = 14,1$$

Pomocí stejných vzorců byly vypočteny také ekvivalenty čistého svarového kovu elektrody.

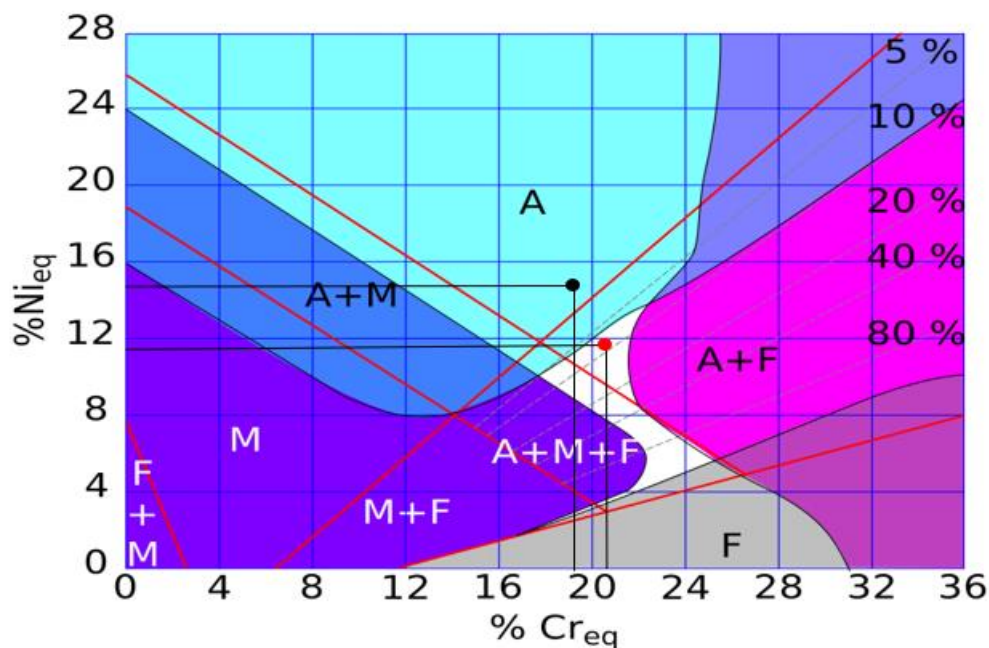
$$Cr_e = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot \%Nb$$

$$Cr_e = 19,5 + 0 + 1,5 \cdot 0,7 + 0,5 \cdot 0 = 20,55$$

$$Ni_e = \%Ni + 30 \cdot \%C + \%Mn$$

$$Ni_e = 10 + 30 \cdot 0,03 + 0,8 = 11,7$$

Získané hodnoty byly vyneseny do Schaefflerova diagramu, jak jde vidět na obr. 15. Černá tečka odpovídá austenitické oceli, červená zobrazuje elektrodu.



Obr. 15 Schaefflerův diagram [29]

4.2 Provedení experimentu [23,30]

Před zahájením svařování byly oba vzorky oceli zváženy na miskových vahách, viz obr.16. Zváženy byly také elektrody. Následně byly na obě oceli navařeny celkem tři svarové housenky. Při svařování byl měřen čas vytavení elektrody a svařovací proud. Proud byl měřen ampérmetrem na obrázku číslo 17. Vždy po každém provedeném návaru byl vzorek převážen z důvodu zjištění hmotnosti navařeného kovu. Po ukončení svařování byly pomocí digitálního posuvného měřítka změřeny délky nedopalků, rovněž byly zváženy hmotnosti nedopalků. Svařování bylo provedeno svařovacím zdrojem od značky Fronius, typ Transpocket 3500, viz obr. 18.



Obr. 16 Miskové váhy



Obr. 17 Ampérmetr



Obr. 18 Fronius Transpocket 3500 [30]

4.3 Výpočet výkonových vlastností [1,15,23]

Po provedení experimentu byly získány hodnoty potřebné pro výpočet výkonových vlastností. Hodnoty pro ocel S235JR jsou uvedeny v tabulce 12. Pro ocel X5CrNi18-10 jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro S235JR

Ocel S235JR			
Číslo elektrody	1	2	3
Is [A]	65	65	65
t [s]	55,1	50,8	48,1
G' [g]	12,5	12,5	12,5
G'' [g]	1,24	1,69	2,62
l ₁ [mm]	300	300	300
l ₂ [mm]	39,56	49,23	72,44
G ₁ [g]	1699	1705	1712
G ₂ [g]	1705	1712	1719

Tabulka 13 Naměřené hodnoty pro X5CrNi18-10

Ocel X5CrNi18-10			
Číslo elektrody	1	2	3
Is [A]	40	40	40
t [s]	48,1	50,6	51,9
G' [g]	12,4	12,4	12,4
G'' [g]	1,21	1,78	1,50
l ₁ [mm]	300	300	300
l ₂ [mm]	39,03	53,25	46,60
G ₁ [g]	742	748	755
G ₂ [g]	748	755	760

Pro výpočet výkonových vlastností je nutné znát také napětí, to bylo vypočteno z následujícího vzorce:

$$U_s = 20 + 0,04 \cdot I_s \quad (4.3)$$

$$U_s = 20 + 0,04 \cdot 65 = 22,6 \text{ V [ocel S235JR]}$$

$$U_s = 20 + 0,04 \cdot 40 = 21,6 \text{ V [ocel X5CrNi18-10]}$$

kde: U_s – svařovací napětí [V],

I_s – svařovací proud [A].

Norma ČSN EN 05 5010 stanovuje, aby pro provedení experimentu bylo použito 3 nebo 5 elektrod. Pro výpočet výkonových vlastností je však potřeba hodnoty získané z tohoto počtu elektrod zprůměrovat, v tomto případě tedy průměrovat ze tří. Tabulka 14 zobrazuje průměrné hodnoty pro ocel S235JR a tabulka 15 pro ocel X5CrNi18-10.

Tabulka 14 Průměrné hodnoty pro ocel S235JR

Ocel S235JR								
I _s [A]	U [V]	t [min]	G' [g]	G'' [g]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	G ₁ [g]	G ₂ [g]
65	22,6	0,86	12,5	1,84	300	53,74	1699	1705,67

Tabulka 15 Průměrné hodnoty pro ocel X5CrNi18-10

Ocel X5CrNi18-10								
I _s [A]	U [V]	t [min]	G' [g]	G'' [g]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	G ₁ [g]	G ₂ [g]
40	21,6	0,8	12,4	1,5	300	46,29	742	748

Z hodnot uvedených v tabulkách výše lze nyní vypočítat výkonové vlastnosti. Nejprve je však potřeba určit výchozí údaje. Ve výpočtech první hodnota odpovídá oceli S235JR a druhá oceli X5CrNi18-10. Jako první se vypočte hmotnost roztaveného kovu jádra elektrody podle vzorce:

$$G_r = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (l_1 - l_2) \cdot \rho \quad [g] \quad (4.4)$$

$$G_r = \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} \cdot (30 - 5,374) \cdot 7,85 = 6,07 \text{ g}$$

$$G_r = \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} \cdot (30 - 4,629) \cdot 7,85 = 6,26 \text{ g}$$

kde: G_r – hmotnost roztaveného kovu jádra elektrody [g]

d – průměr jádra elektrody [cm]

l₁ – délka elektrody [cm]

l₂ – délka nedopalku [cm]

ρ – měrná hmotnost kovu jádra elektrody [g·cm³]

Dále je třeba určit hmotnost navařeného kovu, a to ze vzorce:

$$G_n = G_2 - G_1 \quad [g] \quad (4.5)$$

$$G_n = 1705,67 - 1699 = 6,67 \text{ g}$$

$$G_n = 748 - 742 = 6 \text{ g}$$

kde: G_n – hmotnost navařeného kovu [g]

G₂ – hmotnost desky s návarem [g]

G₁ – hmotnost zkušební desky [g]

Hmotnost roztavených elektrod lze spočítat dle vzorce:

$$G_e = G' - G'' \quad [g] \quad (4.6)$$

$$G_e = 12,5 - 1,84 = 10,66 \text{ g}$$

$$G_e = 12,4 - 1,5 = 10,6 \text{ g}$$

kde: G' – hmotnost celé elektrody [g]

G'' – hmotnost nedopalku [g]

Vstupní parametry pro výkonové vlastnosti jsou spočteny, nyní je možno spočítat samotné výkonové vlastnosti. První je výkon roztavení, který se vypočte podle vzorce:

$$V_r = \frac{G_r}{t} [g \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.7)$$

$$V_r = \frac{6,07}{0,86} = 7,06 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$V_r = \frac{6,26}{0,80} = 7,83 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

kde: G_r – hmotnost roztaveného kovu jádra elektrody [g]
 t – doba roztavení jádra elektrody [min]

Po výkonu roztavení se určí výkon navaření, k jehož výpočtu se užije vzorec:

$$V_n = \frac{G_n}{t} [g \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.8)$$

$$V_n = \frac{6,67}{0,86} = 7,76 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$V_n = \frac{6}{0,80} = 7,50 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

kde: G_n – hmotnost navařeného kovu [g]
 t – doba roztavení jádra elektrody [min]

Důležitou roli hraje součinitel roztavení, který se vypočte podle:

$$\alpha_r = \frac{V_r}{I_s} [g/A \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.9)$$

$$\alpha_r = \frac{7,06}{65} = 0,11 [g/A \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$\alpha_r = \frac{7,83}{40} = 0,20 [g/A \cdot \text{min}^{-1}]$$

kde: V_r – výkon roztavení [$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$]
 I_s – svařovací proud [A]

Součinitel navaření lze vypočíst dle vzorce:

$$\alpha_n = \frac{V_n}{I_s} [g/A \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.10)$$

$$\alpha_n = \frac{7,76}{65} = 0,11 [g/A \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$\alpha_n = \frac{7,50}{40} = 0,19 [g/A \cdot \text{min}^{-1}]$$

kde: V_n – výkon navaření [$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$]
 I_s – svařovací proud [A]

Z ekonomického hlediska je důležitá účinnost a výtěžnost elektrod samotných. Výtěžek elektrody se provádí podle vztahu:

$$\eta_i = \frac{G_n}{G_r} \cdot 100 [\%] \quad (4.11)$$

$$\eta_i = \frac{6,67}{6,07} \cdot 100 = 109,88 \%$$

$$\eta_i = \frac{6}{6,26} \cdot 100 = 95,85 \%$$

kde: G_n – hmotnost navařeného kovu [g]

G_r – hmotnost roztaveného kovu jádra elektrody [g]

Ztráty rozstříkem, propálením a vypařením, zmenšené o množství kovu nataveného z obalu jsou dány vztahem:

$$\varphi = 100 - \eta_i [\%] \quad (4.12)$$

$$\varphi = 100 - 109,88 = +9,88 \%$$

$$\varphi = 100 - 95,85 = -4,15 \%$$

kde: η_i – výtěžek elektrody [%]

Účinnost elektrody se určí ze vztahu:

$$\eta = \frac{G_n}{G_e} \cdot 100 [\%] \quad (4.13)$$

$$\eta = \frac{6,67}{10,66} \cdot 100 = 62,57 \%$$

$$\eta = \frac{6}{10,60} \cdot 100 = 56,60 \%$$

kde: G_n – hmotnost navařeného kovu [g]

G_e – hmotnost roztavených elektrod [g]

Celková účinnost elektrod se pak vypočte podle:

$$\eta_c = \frac{G_n}{G'} \cdot 100 [\%] \quad (4.14)$$

$$\eta_c = \frac{6,67}{12,5} \cdot 100 = 53,36 \%$$

$$\eta_c = \frac{6}{12,4} \cdot 100 = 48,39 \%$$

kde: G_n – hmotnost navařeného kovu [g]

G' – hmotnost celé elektrody [g]

Na závěr se vyhodnotí spotřeba elektrické energie. Spotřeba elektrické energie na množství roztaveného kovu je dána vztahem:

$$N_r = \frac{U_s \cdot I_s \cdot t}{G_r} [W \cdot \text{min} \cdot g^{-1}] \quad (4.15)$$

$$N_r = \frac{22,6 \cdot 65 \cdot 0,86}{6,07} = 208,13 W \cdot \text{min} \cdot g^{-1}$$

$$N_r = \frac{21,6 \cdot 40 \cdot 0,80}{6,26} = 110,42 W \cdot \text{min} \cdot g^{-1}$$

kde: U_s – svařovací napětí [V]

I_s – svařovací proud [A]

t – doba roztavení jádra elektrody [min]

Spotřeba elektrické energie na množství navařeného kovu se vypočítá podle:

$$N_n = \frac{U_s \cdot I_s \cdot t}{G_r} [W \cdot \text{min} \cdot g^{-1}] \quad (4.16)$$

$$N_n = \frac{22,6 \cdot 65 \cdot 0,86}{6,67} = 189,41 W \cdot \text{min} \cdot g^{-1}$$

$$N_n = \frac{21,6 \cdot 40 \cdot 0,80}{6,60} = 104,73 \text{ W} \cdot \text{min} \cdot \text{g}^{-1}$$

kde: U_s – svařovací napětí [V]

I_s – svařovací proud [A]

t – doba roztavení jádra elektrody [min]

Na závěr experimentu bylo vypočteno teplo dodané do svaru. K tomu je potřeba znát svařovací rychlost. Ta se vypočte z následujícího vzorce:

$$v_s = \frac{l}{t} [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.17)$$

$$v_s = \frac{172}{51,6} = 3,33 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_s = \frac{155,3}{48} = 3,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde: v_s – svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

l – průměrná délka housenky [mm]

t – doba vytavení elektrody [s]

Teplo dodané do svaru se vypočte dle vzorce:

$$Q = \frac{\eta \cdot U_s \cdot I_s}{v_s \cdot 1000} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4.18)$$

$$Q = \frac{0,85 \cdot 22,6 \cdot 65}{3,33 \cdot 1000} = 0,37 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$Q = \frac{0,85 \cdot 21,6 \cdot 40}{3,24 \cdot 1000} = 0,21 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde: U_s – svařovací napětí [V]

I_s – svařovací proud [A]

v_s – svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

η – účinnost zvolené metody

5 ZÁVĚRY

Výsledkem práce je komplexní rozbor technologie ručního obloukového svařování. V současné době se ve velkovýrobě od této metody opouští nebo již byla nahrazena metodami MIG/MAG, případně TIG. Jeden z hlavních důvodů poklesu podílu této metody ve výrobě je její nízká produktivita. Ta je dána častou výměnou elektrod. Dalším faktorem je také to, že efektivita metody je silně závislá na zručnosti svářeče a těch je v poslední době poskrovnu. Nicméně svařování obalovanou elektrodou zcela jistě nevymizí úplně, na montážích a v hobby prostředí se stále využívá. Velkou výhodou pro použití na montážích je kompaktnost svařovacího zdroje, tedy malá velikost a nízká hmotnost (inventory). V hobby sféře je zase výhodou levná cena zdroje, tak elektrod.

Práce dále rozebírá svařitelnost ocelí, konkrétně uhlíkových a vysokolegovaných korozivzdorných ocelí. V rámci experimentu bylo provedeno měření výkonových vlastností na ocelích S235JR a X5CrNi18-10 podle ČSN EN. Výkonové vlastnosti jsou silně závislé na typu obalu elektrod. Z vypočtených hodnot vyplývá, že bazická elektroda E-B 121 dosahuje lepších hodnot než elektroda OK 61.30 s rutil-kyselým obalem. Výtěžnost bazické elektrody dosáhla hodnoty téměř 110 %, přičemž bazické elektrody dosahují výtěžnosti až 160 %. Výtěžnost rutilové elektrody dosáhla hodnoty 95,85 %. Celková účinnost vyšla rovněž ve prospěch bazické elektrody. Důležitým faktorem při svařování ocelí je jejich elektrický odpor. Měrný elektrický odpor uhlíkových ocelí se ohybuje kolem hodnoty $12 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, zatímco u austenitických ocelí dosahuje hodnot mnohonásobně větších, konkrétně 69 až 102 $12 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$. Tato skutečnost má za následek, že elektrody pro svařování austenitických ocelí mají velký odpor, tudíž je při svařování používán menší elektrický proud než při svařování ocelí uhlíkových. Další fyzikální vlastností, která ovlivňuje svařovací proces je tepelná vodivost. Ta je v případě uhlíkových ocelí třikrát vyšší než u ocelí austenitických. Tuto skutečnost potvrdil výpočet tepla dodaného do svaru, který u oceli S235JR vyšel téměř dvojnásobně oproti X5CrNi18-10. Toto jsou jedny z důvodů, že výkonové vlastnosti vyšly hůře pro elektrodu OK 61.30. Výpočet byl rovněž ovlivněn skutečností, že velikost nedopalků byla větší než 10 % délky elektrody, tuto hodnotu doporučuje norma. Zejména třetí elektroda při svařování oceli S235JR měla velký nedopalek. Tyto skutečnosti ovlivnily průměrnou hodnotu velikosti nedopalku, která se poté projevila v nižších hodnotách účinnosti elektrod.

Seznam použitých zdrojů [31]

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
2. BARTOŠ, Jaroslav. *Učebnice pro základní kurz svařování metodou 111 1.1: (ruční svařování elektrickým obloukem, obalenou elektrodou nelegovaných a nízkolegovaných ocelí) : se souborem testových otázek*. 4. aktualizované vydání se souborem testových otázek. V Ostravě: ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2015, 149 s. Svařování. ISBN 978-80-85771-08-4.
3. *Svářecí stroje omicron* [online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <http://www.omc.cz/svareci-invertor-gama-165>
4. *Weldmyworld: Tips for the best looking stick welds* [online]. 2012 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.bakersgas.com/weldmyworld/2012/10/28/tips-for-the-best-looking-stick-welds/>
5. *Arc (MMA) Tutorial - Fillet Joints* [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.mig-welding.co.uk/arc-fillet-joints.htm>
6. *Manual Metal Arc (MMA) Welding* [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.saf-fro.com/processes/mma-welding-process>
7. *Svařování.cz* [online]. ESAB [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.svarovani.cz/userfiles/files/07-02.pdf>
8. PTÁČEK, Luděk a . *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-720-4248-3.
9. Svary, značení svarů. *Slideplayer* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3080261/>
10. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 186 s. ISBN 80-708-2697-5.
11. ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov*. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003, 202 s. ISBN 80-968359-5-5.
12. OLSON D.L. a kolektiv autorů. *ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6*; vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7
13. Ruční obloukové svařování. *Střední škola – Centrum odborné přípravy technické Kroměříž* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33447&instance=2>
14. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II. - svařování* [online]. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_I_kubicek.pdf
15. ORSZÁGH, Peter a Viktor ORSZÁGH. *Zváranie MMA ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: VEDA, 2003, 410 s. ISBN 80-224-0758-5.
16. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II část svařování: Díl 1 základní metody tavného svařování* [online]. Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2006 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf

17. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009, 492 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-802-2731-676.
18. FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠAROVÁ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.
19. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009, 241 s. ISBN 978-80-24820255.
20. PILOUS, Václav a Vladimír KUDĚLKA. *Svařitelnost ocelí*. Brno: TESIYDO, 2017, 56 s. ISBN 978-80-87102-17-6.
21. KOUKAL, Jaroslav. *Svařování ocelových konstrukcí*. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí, 2010, 159 s. ISBN 978-809-0453-548.
22. SUNDARESAN, Subramania. Metallurgy of Welding Stainless Steels. In: *Advanced Materials Research* [online]. Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2013, **794**, s. 274-288 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.794.274. ISSN 1022-6680. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMR.794.274.pdf>
23. ČSN EN 22401 (20509): *Svařování. Obalené elektrody. Stanovení výtěžnosti, účinnosti a součinitele navaření*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
24. NEREZOVÁ OCEL 1.4301. *INOX, spol. s r. o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
25. X5CrNi18-10. *Bolzano* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobyky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobyky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
26. Charakteristika nerezových ocelí. *KonigFrankstahl* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.akfs.cz/akfs/index.php?menu=234>
27. Přehled vlastností oceli S235JR(dříve S235JRG2). *Bolzano* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
28. Materialovy list. *Bogner* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: http://www.bogner.cz/files/files/Materialovy_list_1.0038.pdf
29. Korozivzdorná ocel. *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Korozivzdorn%C3%A1_ocel#/media/File:Diagramme_schaeffler_text_zoom.svg
30. *Weldtech: prodej a servis svářečské techniky* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.weldtech.cz/produkty/produkt/svareci-zdroj-fronius-transpocket-3500>
31. *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
C _{ev}	Uhlíkový ekvivalent	[%]
Cr _E	Chromový ekvivalent	[%]
d	Průměr jádra elektrody	[mm]
G _n	Hmotnost navařeného kovu	[g]
G _r	Hmotnost roztaveného kovu jádra elektrody	[g]
G _e	Hmotnost roztavených elektrod	[g]
G ₁	Hmotnost zkušební desky	[g]
G ₂	Hmotnost desky s návarem	[g]
G'	Hmotnost elektrody s obalem	[g]
G''	Hmotnost nedopalku	[g]
I _s	Svařovací proud	[A]
KV	Nárazová práce	[J]
KV	Vrubová houževnatost	[J]
l ₁	Délka elektrody	[mm]
l ₂	Délka nedopalku	[mm]
Ni _E	Niklový ekvivalent	[%]
N _n	Spotřeba el. energie na množství navařeného kovu	[W·min·g ⁻¹]
N _r	Spotřeba el. energie na množství roztaveného kovu	[W·min·g ⁻¹]
Q	Teplo dodané do svaru	[kJ·mm ⁻¹]
R _{eH}	Mez kluzu	[MPa]
R _{p0,1}	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
t	Doba vytavení elektrody	[s]
U _s	Svařovací proud	[V]
v _s	Svařovací rychlost	[mm·s ⁻¹]
V _n	Výkon roztavení	[g·min ⁻¹]
V _r	Výkon navření	[g·min ⁻¹]
Značka	Legenda	Jednotka
α _n	Součinitel navaření	[g·A ⁻¹ ·mn ⁻¹]
α _r	Součinitel roztavení	[g·A ⁻¹ ·mn ⁻¹]
η	Účinnost elektrody	[%]
η _c	Celková účinnost elektrody	[%]
η _i	Výtěžek elektrody	[%]
ρ	Měrná hmotnost kovu jádra elektrody	[g·cm ⁻³]
φ	Ztráty	[%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svářecí zdroj [3].....	9
Obr. 2 Svářeč [4].....	9
Obr. 3 Koutový svar [5]	9
Obr. 4 Svarová lázeň [6]	9
Obr. 5 Plech oceli S235JR	10
Obr. 6 Plech oceli X5CrNi1810	10
Obr. 7 Polohy svařování [9]	11
Obr. 8 Elektrický oblouk [1]	12
Obr. 9 Strmá charakteristika [13].....	13
Obr. 10 Spojení charakteristik [14].....	13
Obr. 11 Obalovaná elektroda [13].....	15
Obr. 12 Druhy svařitelnosti [10]	18
Obr. 13 Vliv martenzitu na tvrdost [18].....	20
Obr. 14 Binární diagram Fe-Cr [18]	21
Obr. 15 Schaefflerův diagram [29]	25
Obr. 16 Miskové váhy.....	26
Obr. 17 Ampérmetr	26
Obr. 18 Fronius Transpocket 3500 [30].....	26

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Teploty sušení [2]	17
Tabulka 2 Předehřev na základě vlastností [19]	20
Tabulka 3 Teploty předehřevu podle obsahu uhlíku [19]	20
Tabulka 4 Chemické složení S235JR v % [27].....	23
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti S235JR [27].....	23
Tabulka 6 Chemické složení X5CrNi18-10 v % [25].....	23
Tabulka 7 Mechanické vlastnosti X5CrNi18-10 [25].....	23
Tabulka 8 Označení elektrody E-B 121 podle EN ISO [2].....	24
Tabulka 9 Označení elektrody O.K 61.30 podle EN ISO [2]	24
Tabulka 10 Výkonové parametry elektrody E-B 121 [7]	24
Tabulka 11 Výkonové vlastnosti elektrody O.K 61.30 [7]	25
Tabulka 12 Naměřené hodnoty pro S235JR	27
Tabulka 13 Naměřené hodnoty pro X5CrNi18-10	27
Tabulka 14 Průměrné hodnoty pro ocel S235JR.....	28
Tabulka 15 Průměrné hodnoty pro ocel X5CrNi18-10.....	28