

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Technologie kovářského navařování a pevnost kovářského spoje
rychlořezné a nelegované konstrukční oceli**

Autor: Věra DOMINOVÁ
Vedoucí práce: Ing. Soňa BENEŠOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Věra DOMINOVÁ**

Osobní číslo: **S19B0271P**

Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**

Specializace: **Strojírenské materiály a technologie**

Téma práce: **Technologie kovářského navařování a pevnost kovářského spoje rychlořezné a nelegované konstrukční oceli**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

Teoretická část

1. Rychlořezné oceli, přehled, postup výroby a tepelného zpracování
2. Obráběcí nástroje, způsoby upevnění rezných destiček, výhody a nevýhody jednotlivých metod
3. Metody měření pevnosti kovářského svaru, zkouška krutem, zkouška stříhem
4. Návrh experimentu metodou DOE – design of experiment

Praktická část

5. Kovářské svařování, postup, parametry procesu
6. Návrh kombinací sledovaných parametrů a provedení experimentu
7. Zkoušky krutem a stříhem
8. Diskuse výsledků
9. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. Nástrojové oceli Brno: Dům techniky, 1994.

AMBROŽ, O., KANDUS, B., KUBÍČEK, J. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

BENEŠ, V., MRKVICA, M. Teorie řezných nástrojů Praha ČVUT, 1990 ISBN 80-85771-81-0.

TOŠENOVSKÝ, J. Plánování experimentů Učební text. VŠB Ostrava 2012.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Soňa Benešová, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Kateřina Opatová**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.

děkan

Doc. Ing. Josef Odehnal, Ph.D.

vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Ráda bych vyjádřila své upřímné poděkování paní Ing. Soně Benešové, Ph.D., vedoucí této práce, a paní Ing. Kateřině Opatové, konzultantce, za skvělé vedení, odborné rady, věnovaný čas a trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat paní Ing. Věře Markové za spolupráci při návrhu a vyhodnocování experimentů. Ráda bych také vyslovila svůj vděk pracovníkům z Regionálního technologického institutu v Plzni, kteří se podíleli na výrobě vzorků pro jednotlivé experimenty, a pracovníkům z VZÚ v Plzni za jejich poskytnutí prostor, pomoci a moudrých rad při provádění mikroskopické analýzy. Nakonec bych chtěla poděkovat své rodině, partnerovi a přátelům za jejich cennou podporu a pomoc během psaní této práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Dominová	Jméno Věra	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Benešová, Ph.D.	Jméno Soňa	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Technologie kovářského navařování a pevnost kovářského spoje rychlořezné a nelegované konstrukční oceli		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	75	TEXTOVÁ ČÁST	75	GRAFICKÁ ČÁST	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce obsahuje návrh kvalitního kovářského svarového spojení rychlořezné oceli s konstrukční ocelí pro zajištění možnosti obrábění přerušovaným řezem. Návrh a provedení experimentů, které byly zkoušeny pevnostními zkouškami a praktickou zkouškou vyhotoveného obráběcího nože.
KLÍČOVÁ SLOVA	kovářské svařování, rychlořezné oceli, návrh kvalitního obráběcího nože, obrábění přerušovaným řezem

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Dominová	Name Věra	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Benešová, Ph.D.	Name Soňa	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Forging welding technology and forging joint strength of high-speed and non-alloy structural steel		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	75	TEXT PART	75	GRAPHICAL PART	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis contains the design of a quality forging welded joint of high-speed steel with structural steel to ensure the possibility of machining with intermittent cutting. Design and implementation of experiments which were verified by strength tests and practical tests of the fabricated machining knife.
KEY WORDS	forge welding, high-speed steels, design of a quality machining knife, interrupted cut machining

Obsah

Zadání bakalářské práce	2
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	15
2 Rychlořezné oceli	16
2.1 Rozdělení rychlořezných ocelí	16
2.2 Vybrané rychlořezné oceli a jejich charakteristika.....	17
2.3 Prvky ovlivňující rychlořezné oceli.....	17
2.3.1 Uhlík.....	17
2.3.2 Wolfram	17
2.3.3 Molybden	18
2.3.4 Vanad	18
2.3.5 Chrom.....	18
2.3.6 Kobalt	18
2.4 Výroba rychlořezných ocelí.....	18
2.4.1 Konvenční metoda výroby rychlořezných ocelí.....	19
2.4.2 Metoda výroby práškovou metalurgií rychle tuhoucích částic	19
2.5 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí	20
2.5.1 Zušlechťování.....	21
2.5.1.1 Kalení.....	21
2.5.1.2 Popouštění.....	21
2.5.2 Žihání naměkko.....	22
2.5.3 Žihání ke snížení pnutí	23
3 Svařování a pájení	23
3.1 Svařování.....	23
3.1.1 Základní rozdělení metod svařování	23
3.1.2 Kovářské svařování	24
3.1.3 Difuzní svařování	24
3.2 Pájení	25
3.2.1 Pájky.....	26
3.2.2 Tavidla.....	26
3.2.3 Tvrdé pájení.....	26

4	Soustružnické obráběcí nože	27
4.1	Celistvé soustružnické nože.....	28
4.2	Pájené soustružnické nože	28
4.3	Nože s mechanicky upnutými destičkami	29
5	Mechanické zkoušky	30
5.1.	Zkouška krutem	30
5.2.	Zkouška stříhem	31
6	Plánování experimentu	32
6.1	Průběh plánování a vyhodnocení experimentů.....	32
6.2	Analýza rozptylu.....	33
6.2.1	Regresní model.....	33
6.2.2	Reziduální analýza	34
	Experimentální část	36
7	Cíl práce	36
8	Úvod do experimentální části.....	36
9	Návrh experimentu č. 1	37
9.1	Návrh prvního experimentu pomocí metody DOE.....	37
9.2	Provedení experimentu č. 1	39
9.3	Zkouška krutem na vyhotovených vzorcích.....	40
10	Návrh experimentu č. 2	41
10.1	Provedení experimentu č. 2.....	47
10.2	Stříhová zkouška na vyhotovených vzorcích.....	52
10.2.1	Vyhodnocení svařované plochy vzorků	55
10.3	Mikroskopická analýza a měření tvrdosti	57
10.4	Vyhodnocení experimentu č. 2 metodou DOE	61
10.4.1	Efekty hlavních faktorů.....	62
10.4.2	Efekty interakcí hlavních faktorů.....	62
10.4.3	Shrnutí výsledků z metody DOE.....	64
11	Experiment č. 3 - Ověření kvality kovářsky svařeného spoje.....	65
12	Diskuse výsledků.....	69
13	Závěr.....	71
	Seznam použitých zdrojů	72

Přehled použitých zkratk a symbolů

AISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Analýza rozptylu (analysis of variance)
a_p	Hloubka řezu [mm]
CNC	Číslicové řízení počítačem (Computer Numeric Control)
ČSN	Česká technická norma
D	Difuzní koeficient [$m^2 s^{-1}$]
d	Kruhový průřez [mm]
DESU případně pod lakem	Elektrostruskové přetavování v ochranné atmosféře argonu nebo dusíku,
DIN	Německá národní norma
DOE	Metoda plánování experimentů
EAF	Elektrická oblouková pec
ESU	Elektrostruskové přetavování
f	Posuv [mm]
F_{max}	Maximální působící síla [N]
f_z	Posuv na zub [mm/z]
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
J_d	Rychlost transportu difundující látky
$l_{kontrolní}$	Přímá délka obrobku [mm]
M_{kmax}	Maximální dosažený kroutící moment [Nm]
NP	Nové piliny
R_a	Drsnost [μm]
R_{mk}	Mez pevnosti v krutu [MPa]
R_{ms}	Mez pevnosti ve smyku [MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu [MPa]
RO/HSS	Rychlořezná ocel / High speed steel
R-sq	Koeficient determinace
R-sq(adj)	Upravený koeficient determinace
RTI	Regionální Technologický Institut
S	Směrodatná odchylka
S_o	Průřez [m^2]
SP	Staré piliny
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
VBD	Vyměnitelná břitová destička

v_c	Řezná rychlost [m/min]
VIM	Vakuová indukční pec
VLBO	Vakuová přetavovací pec
W_k	Průřezový modul odporu v krutu [m ³]
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

Seznam obrázků

Obr. č. 1. Znázornění primární a sekundární metalurgie [10].....	19
Obr. č. 2. Metoda výroby práškovou metalurgií rychle tuhoucích částic [9].....	20
Obr. č. 3. Průběh tepelného zpracování rychlořezných ocelí [11]	20
Obr. č. 4. Popis základní struktury svarového spoje [14]	23
Obr. č. 5. Postupná stádia při vytváření difuzního spoje [21].....	25
Obr. č. 6. Princip tvrdého pájení (pájení plamenem) [24].....	26
Obr. č. 7. Souhrn základních soustružnických prací [25]	27
Obr. č. 8. Popis soustružnického nože [28].....	28
Obr. č. 9. Soustružnické nože celistvé z RO [31]	28
Obr. č. 10. Soustružnické nože s pájenou břitovou destičkou [32].....	29
Obr. č. 11. Soustružnické nože s mechanicky upnutýma VBD o různém provedení [34].....	29
Obr. č. 12. Schéma provedení zkoušky krutem [35].....	30
Obr. č. 13. Ukázka průběhu napětí po překročení elastických deformací [35].....	31
Obr. č. 14. Schéma jednoduché zkoušky stříhem [35].....	31
Obr. č. 15. Černá skříňka s definovaným počtem vstupů a výstupů [41]	33
Obr. č. 16. Vzorek 2a po zkoušce krutem	41
Obr. č. 17. Průběh teploty v místě budoucího svaru na rozhraní mezi oběma materiály při vložení do pece o teplotě 1200 °C	47
Obr. č. 18. Příprava boraxového prášku do licí lžice	48
Obr. č. 19. Odlitý přetavený borax na ocelové podložce	48
Obr. č. 20. Průběh drcení přetaveného boraxu na jemný prášek.....	49
Obr. č. 21. Přesívání boraxového nadrceného prášku	49
Obr. č. 22. Vzhled nadrceného prosetého boraxového prášku.....	49
Obr. č. 23. Připravené destičky z materiálu ČSN 19 830 a ČSN 11 523	50
Obr. č. 24. Vložení připravené směsi na očištěné plochy destiček z ČSN 11 523	50
Obr. č. 25. Připravený vzorek číslo 11	51
Obr. č. 26. Kovářské svařování	51
Obr. č. 27. Kovářské svařování	51
Obr. č. 28. Vzorek č. 1 uchycený do zkušebního stroje při stříhové zkoušce.....	53
Obr. č. 29. Pevnost ve stříhu jednotlivých vzorků zaznamenaná do grafu	54
Obr. č. 30. Hlavní menu programu ImageJ	55
Obr. č. 31. Vyznačení svarové plochy – vzorek č. 5.....	55
Obr. č. 32. Shrnutí výsledků měření velikosti barevně odlišné plochy.....	56
Obr. č. 33. Zkoumané vzorky mikroskopickou analýzou	57
Obr. č. 34. Makro vzorku č. 24	58

Obr. č. 35. Makro vzorku č. 19	58
Obr. č. 36. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 24 (NP/DR/11/H/tavidlo:pilinám 1:2)	58
Obr. č. 37. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 5 (NP/HL/12/H/ tavidlo:pilinám 1:1)..	58
Obr. č. 38. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 11 (NP/HL/11/H/ tavidlo:pilinám 1:1)	58
Obr. č. 39. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 2(NP/HL/12/J/ tavidlo:pilinám 1:1)....	59
Obr. č. 40. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 8 (NP/HL/12/H/ tavidlo:pilinám 1:1)..	59
Obr. č. 41. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 19 (NP/DR/11/J/ tavidlo:pilinám 2:1).	59
Obr. č. 42. Mikrostruktura svaru vzorku č. 24	59
Obr. č. 43. Mikrostruktura svaru vzorku č. 19	59
Obr. č. 44. Mikrostruktura svaru vzorku č. 5	60
Obr. č. 45. Mikrostruktura svaru vzorku č. 8	60
Obr. č. 46. Difuzní spoj u vzorku č. 24	60
Obr. č. 47. Difuzní spoj u vzorku č. 19	60
Obr. č. 48. Efekty jednotlivých hlavních faktorů	62
Obr. č. 49. Grafy jednotlivých interakcí mezi hlavními faktory	63
Obr. č. 50. Graf výsledných faktorů s nejvyšším vlivem.....	64
Obr. č. 52. Hřbet nože 42B po obrobení kontrolní délky 475 mm.....	67
Obr. č. 51. Čelo nože 42B po obrobení kontrolní délky 475 mm	67
Obr. č. 53. Čelo nože Škoda po obrobení kontrolní délky 570 mm.....	68
Obr. č. 54. Hřbet nože Škoda po obrobení kontrolní délky 570 mm	68

Seznam tabulek

Tab. č. 1. Skupiny rychlořezných ocelí [5]	16
Tab. č. 2. Přehled vybraných rychlořezných ocelí a jejich charakteristika [6]	17
Tab. č. 3. Rozdělení nástrojů na soustružení [27]	27
Tab. č. 4. Chemické složení použitých materiálů [6, 55–57].....	36
Tab. č. 5. Všechny kombinace pro vyhotovení kovářského spoje – úplný 4 faktorový plán.....	38
Tab. č. 6. Částečný faktorový plán.....	39
Tab. č. 7. Výsledky zkoušky krutem prvního experimentu	40
Tab. č. 8. Použité parametry frézování pro získání pilin.....	41
Tab. č. 9. Měření délek pilin	42
Tab. č. 10. Návrh faktorů pro druhý experiment metodou DOE	42
Tab. č. 11. Návrh experimentu – úplný faktorový pokus při 2 replikacích	44
Tab. č. 12. Optimální design při dvou replikacích	46
Tab. č. 13. Výsledky stříhové zkoušky druhého experimentu	52
Tab. č. 14. Shrnutí výsledků měření plochy a pevnosti ve stříhu	57

Tab. č. 15. Výsledky měření tvrdostí RO na zkoumaných vzorcích.....	61
Tab. č. 16. Výsledné hodnoty ANOVA modelu při zahrnutí všech měřených faktorů	61
Tab. č. 17. Výsledné hodnoty ANOVA modelu po krokové regresi	62
Tab. č. 18. Shrnutí nejvýznamnějších hlavních faktorů	64
Tab. č. 19. Shrnutí výsledků interakcí	65
Tab. č. 20. Opatření destiček při obráběcí zkoušce a vizuální hodnocení kovářského svaru .	66

1 Úvod

Kovářsky svařené obráběcí nože jsou v jaderném průmyslu nezbytnou věcí, například pro obrábění vík úložných kontejnerů pro radioaktivní odpad. K obrábění je zapotřebí speciálních nožů o určité pevnosti, tuhosti a životnosti, které jsou schopny obrábět s požadovanou přesností při přerušovaném řezu. Obráběcí nástroj, v našem případě se jedná o soustružnický nůž, se skládá z řezné destičky a těla. Tyto části jsou vyrobeny z odlišných materiálů. Řezná destička je vyrobena z rychlořezné oceli a tělo nástroje z nelegované uhlíkové oceli. Z rychlořezných ocelí se převážně vyrábí nástroje k obrábění, na které působí vysoká teplota vznikající vlivem vysoké řezné rychlosti a třením mezi nástrojem a obrobkem.

Pro výrobu obráběcího nástroje je třeba zajistit spojení těchto dvou částí. Spojením mechanickým upnutím řezné destičky k tělu nástroje nedosáhneme potřebné tuhosti řezného nástroje pro přerušovaný řez. Při využití pájeného spoje pomocí tvrdé pájky hrozí tepelné ovlivnění a degradace struktury rychlořezné oceli ve stavu po kalení a popouštění, proto ani tento spoj není vhodný. S ohledem na popsané nedostatky předchozích metod se jeví nejlepším řešením spojení kovářským svarem, kdy se zušlechťování (kalení a popouštění) provádí jako následující operace.

Součástí výzkumu bude ověření již známé technologie a přesné prozkoumání a zmapování technologických procesů a parametrů kovářského svařování. Zejména technologické parametry jako jsou drsnosti povrchů ploch pro svařování, teplota ohřevu a způsob realizace ohřevu. Dále velikost stlačení – úběru na lisu. V neposlední řadě je třeba optimalizovat poměr kovových pilin a boraxového prášku (tetraboritan sodný $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), určit velikost kovových pilin a čistotu boraxového prášku.

Cílem této práce je získat svarový spoj dostatečné pevnosti, která bude zjištěna mechanickými zkouškami a výsledné parametry pro vytvoření kovářského svarového spoje o vysoké kvalitě.

2 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou skupinou nástrojových ocelí, které slouží pro výrobu obráběcích nástrojů. Při obrábění nástrojovou ocelí se přeměňuje velké množství energie na teplo. Vlivem tepla dochází u nízkolegovaného martenzitu k jeho popuštění a tento nežádoucí jev zmenšuje tvrdost nástroje, současně klesá jeho řezivost. Pro obrábění za vysokých teplot, kdy dochází k tepelnému namáhání nástroje, je požadováno zachování původních vlastností nástroje a zamezení popouštění. Tento požadavek je zajištěn vhodným legováním oceli. Samotná transformace martenzitu je tak posunuta do vyšších teplot [1].

Pro rychlořezné oceli je typický vysoký obsah legujících prvků, které podstatně zvyšují jejich řezné vlastnosti. Mezi hlavní znaky těchto ocelí patří teplotní stálost, se zachováním vysoké tvrdosti do teplot 550 °C, a vysoká pevnost. Je žádoucí, aby tyto oceli měly vysokou otěruvzdornost a žáruvzdornost [2].

Rychlořezné oceli jsou značeny zkratkou RO, anebo také HSS, kdy zkratka HSS je odvozena z anglického názvu “High Speed Steel“.

2.1 Rozdělení rychlořezných ocelí

Rychlořezné oceli, jak již bylo uvedeno, se řadí mezi nástrojové oceli. Je několik možností, jak je možné nástrojové oceli dělit. Existuje řada ukazatelů pro jejich členění. Lze je dělit podle obsahu uhlíku, jejich chemického složení nebo podle součtového procentuálního obsahu legujících prvků. Norma ISO 4957:2018 pojednává o dělení nástrojových ocelí dle způsobu použití. Nástrojové oceli se dělí na nelegované oceli, legované oceli pro práci za studena, legované oceli pro práci za tepla a na rychlořezné oceli [3].

Rychlořezné oceli lze dále dělit dle AISI (American Iron and Steel Institute) na typ T a typ M. Hlavním legujícím prvkem pro oceli typu T je wolfram, kdy označení rychlořezné oceli typu T je právě odvozeno z jeho anglického názvu tungsten. Hlavním legujícím prvkem pro oceli typu M je molybden [4].

Dle normy ISO 11054:2006 lze tyto oceli rozdělit do jednotlivých skupin dle výrobního procesu viz Tab. č. 1. Skupiny rychlořezných ocelí [5].

Tab. č. 1. Skupiny rychlořezných ocelí [5]

Výrobní proces	Označení kódem	Třída chemického složení
Konvenční rychlořezné oceli	HSS	Rychlořezná ocel obsahující méně než 4,5 % kobaltu a méně než 2,6 % vanadu
	HSS-E	Rychlořezná ocel obsahující alespoň 4,5 % kobaltu nebo alespoň 2,6 % vanadu
Rychlořezná ocel vyrobená práškovou metalurgií	HSS-PM	Rychlořezná ocel obsahující méně než 4,5 % kobaltu a méně než 2,6 % vanadu
	HSS-E-PM	Rychlořezná ocel obsahující alespoň 4,5 % kobaltu nebo alespoň 2,6 % vanadu

2.2 Vybrané rychlořezné oceli a jejich charakteristika

V dnešní době je několik rychlořezných ocelí, které se nejčastěji využívají pro výrobu širokého sortimentu nástrojů – viz Tab. č. 2. Výrobci také nabízejí další varianty, které jsou pak určeny pro specifické použití.

Tab. č. 2. Přehled vybraných rychlořezných ocelí a jejich charakteristika [6]

Označení		Střední chemické složení						Obvyklé použití
Podle EN ISO 4957	Podle ČSN	C	Co	Cr	Mo	W	V	
HS18-0-1	19 824	0,78	-	4,0	-	18,0	1,10	Soustružnické nože, frézy a výstružníky. Některé nástroje pro tváření za studena.
HS3-3-2	19 820	0,99	-	4,0	2,70	2,85	2,35	Pro komunální nářadí a pilové listy. Úsporná RO.
HS6-5-2	19 830	0,84 (0,90)	-	4,0	4,95	6,3	1,90	Široce využívaná RO. Veškeré obráběcí nástroje, okruží pily a některé nástroje pro tváření za studena.
HS6-5-3	-	1,20	-	4,0	4,95	6,30	2,95	Nástroje pro obrábění se zvýšenou odolností proti opotřebení.
HS5-2-5	19 852	0,91	4,75	4,0	4,95	6,30	1,90	Obráběcí nástroje, když je třeba vyšší odolnost proti popuštění.
HS10-4-3-10	19 861	1,28	10,0	4,0	3,55	9,50	3,25	Soustružnické nože a frézy pro vysoké výkony.

Obsah křemíku a manganu je u výše uvedených RO v tabulce $\leq 0,45$ %. Fosfor a síra jsou v těchto ocelích zastoupeny maximálně do 0,030 %.

2.3 Prvky ovlivňující rychlořezné oceli

Níže v uvedených podkapitolách jsou uvedeny jednotlivé prvky a jejich vliv, které mají na rychlořezné oceli.

2.3.1 Uhlík

Obsah uhlíku RO je v rozsahu 0,85 až 1,3 %. Uhlík ovlivňuje několik vlastností ocelí jako jsou řezivost, mechanické vlastnosti a tepelné zpracování. Díky vysokému obsahu přídatných prvků je rozpustnost uhlíku 0,7 %. Toto je důvod, proč mají rychlořezné oceli většinou ledeburitickou strukturu. U rychlořezných ocelí uhlík tvoří různé typy karbidů. Tyto karbidy můžeme zapsat podle poměru počtu atomů kovu (M) a uhlíku takto: M_3C ; $M_{23}C_6$; M_6C ; M_7C_3 ; M_2C ; MC (M_4C_3) [1, 6–8].

2.3.2 Wolfram

Tento prvek je považován za základní legující prvek rychlořezných ocelí. Část wolframu je vázána jako karbid na uhlík a jeho zbývající část je rozpuštěna v matici. Karbidy wolframu, které se tvoří v RO, mají kubickou plošně středěnou mřížku. Drobné karbidy M_6C se oproti karbidům M_4C_3 lépe rozpouštějí v austenitu, i když obsahují vanad. Proto při austenitizaci

dochází ke zvyšování vanadu v matici oceli. Tento jev je přínosný pro sekundární tvrdost oceli při popouštění oceli. Rychlořezné oceli si zachovávají vysokou pevnost při vyšších teplotách vlivem malé difuzní rychlosti wolframu, která zpomaluje jeho rozpad. Na množství wolframu rozpuštěném v matici po zakalení závisí teplotní stálost rychlořezné oceli. Při snížení wolframu na 10 až 12 % lze v ocelích zvýšit obsah vanadu až na 5 %. Oceli se sníženým obsahem wolframu mají lepší plastické vlastnosti, nižší kalící teplotu a jejich řezivost zůstává stejná [1].

2.3.3 Molybden

Tímto prvkem lze zcela nebo jen z části nahradit wolfram, neboť oba prvky obdobně ovlivňují vlastnosti ocelí. Molybdenové oceli jsou vhodnější pro nástroje na přerušovaný řez, protože mají vyšší houževnatost než wolframové oceli. Molybden je rozpuštěný v základní matici a druhá jeho část tvoří eutektické a sekundární karbidy M_6C s wolframem [1].

2.3.4 Vanad

Procentuální zastoupení vanadu v ocelích se volí podle obsahu wolframu a uhlíku. Vanad je v oceli převážně vázán jako V_4C_3 karbid. V tomto karbidu je rozpuštěno malé množství wolframu, molybdenu a chromu. Zvyšováním obsahu vanadu a současně obsahu uhlíku v oceli dochází ke zvyšování tvrdých karbidů v matici oceli. Takto se zvyšuje u rychlořezných ocelí jejich řezivost a odolnost proti opotřebení. Negativní stránkou věci je zhoršení jejich brusitelnosti [1].

2.3.5 Chrom

V základní matici oceli je část chromu rozpuštěna již od licího procesu. Zbývající část chromu tvoří primární karbid $M_{23}C_6$. V tomto karbidu je rozpuštěna část wolframu, molybdenu, vanadu a železa. Při austenitizaci dojde k úplnému rozpuštění karbidu $M_{23}C_6$, který zvýší prokalitelnost a uhlík zvýší zakalitelnost [1].

2.3.6 Kobalt

Kobalt se po zakalení rychlořezné oceli téměř rozpustí v matici. Zbylá 2 až 3 % jsou v karbidech M_6C . Rozpuštěný kobalt v matici zvyšuje teplotu transformace alfa fáze na gama o 20 až 30 °C. Oceli s přísadou kobaltu mají vyšší odolnost proti popouštění, protože lze RO kalit z vyšších austenitizačních teplot. V austenitu se rozpouští více legujících prvků. Takto zpracované RO je třeba víckrát popouštět, protože v matici stoupá obsah zbytkového austenitu [1].

2.4 Výroba rychlořezných ocelí

Výroba polotovarů z rychlořezných ocelí je poměrně náročná. Oceli lze vyrábět dvěma různými způsoby. Jedná se o konvenční výrobu odléváním taveniny do kokil s následným tuhnutím a metodu výroby práškovou metalurgií rychle ztuhlých částic. Homogenita a vlastnosti materiálu jsou ovlivňovány ději, které působí při tuhnutí taveniny. Některé vady, vzniklé v průběhu výroby, nelze odstranit pomocí procesů, které probíhají v tuhé fázi. Proto je zde kladen důraz na zvládnutí metalurgických základů.

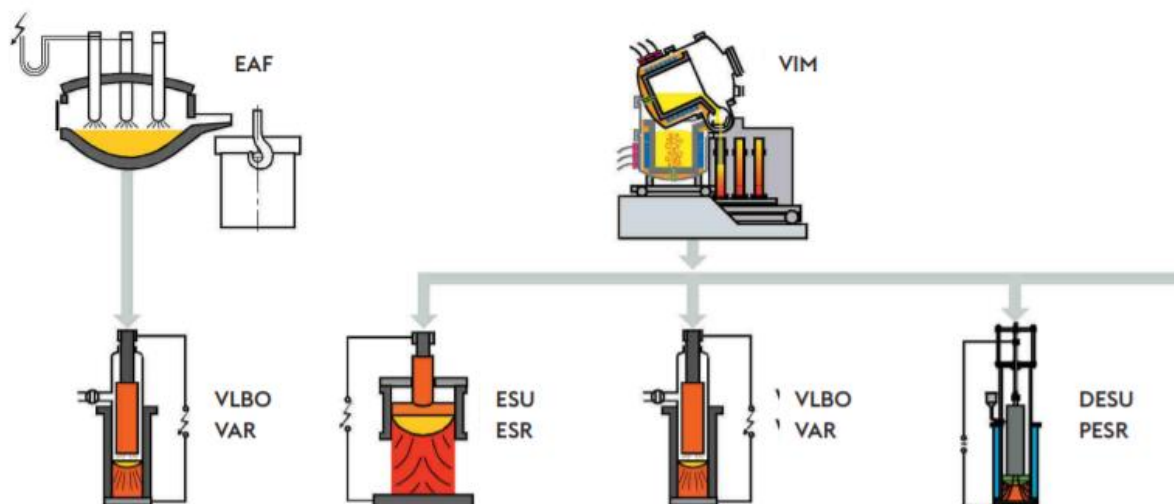
Výkonnější rychlořezné oceli a materiály s jedinečnými vlastnostmi se vyrábějí pomocí práškové metalurgie rychle ztuhlých částic. Kompaktní produkt se nejčastěji získává pomocí izostatického lisování za tepla [9].

2.4.1 Konvenční metoda výroby rychlořezných ocelí

Základem výroby je roztavení vsázky na taveninu. Vsázka je dnes z velké části složena z tříděného kovového odpadu. Tavení tohoto odpadu probíhá v obloukových pecích nebo indukčních pecích. Nevýhodou výroby RO v indukční peci je omezená rafinace (odstranění nečistot) v průběhu tavení. Rafinace probíhá ve vakuu, kde se odstraňují přebytečné plyny [9]. Následně se takto upravená tavenina odlévá do kokil, které jsou speciálně uzpůsobeny pro tuhnutí taveniny [6]. Pro snížení škodlivin, fosforu a síry, na obsah nižší než 0,001 %, se vysokolegované oceli přetavují elektrostruskově [9]. Ocel při tuhnutí, vlivem vysokého obsahu legujících prvků a uhlíku, má sklon k segregaci. Dalším krokem je tváření ingotů. Tváření je prováděno válcováním ocelí za tepla. U kobaltových ocelí je nejprve nutné provést kování a následně až válcování na menší polotovary. Po tváření oceli pozvolna chladnou v pecích. U starších postupů se pro pozvolné chladnutí oceli využívalo izolačních zásypů. Tyto oceli jsou na vzduchu zakalitelné a při rychlém chladnutí na vzduchu by mohlo dojít ke vzniku kalických trhlin. Následujícím krokem po chladnutí je tepelné zpracování ocelí [6].

Nevýhodou je značné riziko vzniku segregace, dutin v ingotu anebo při tváření vznik vláknitosti. Vláknitostí rozumíme usměrnění struktury oceli ve směru tváření například válcováním či kování [9].

Postup této metody je znázorněn na Obr. č. 1.



Obr. č. 1. Znázornění primární a sekundární metalurgie [10]

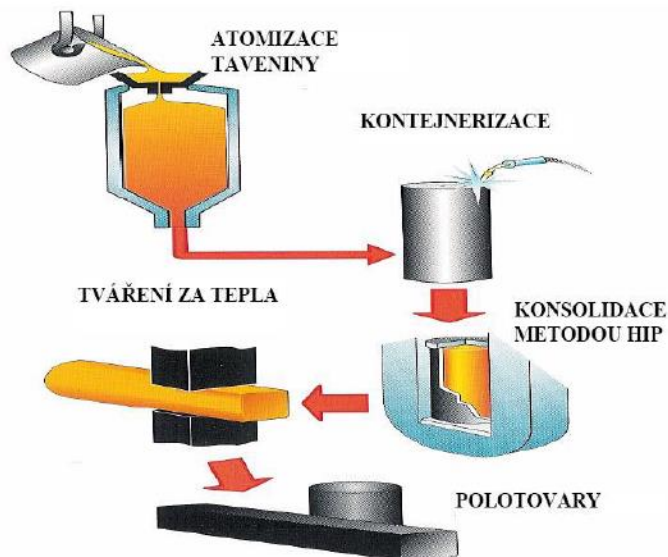
EAF – Elektrická oblouková pec, VIM – Vakuová indukční pec, VLBO – Vakuová přetavovací pec, ESU – Elektrostruskové přetavování, DESU – Elektrostruskové přetavování v ochranné atmosféře argonu nebo dusíku, případně pod tlakem.

2.4.2 Metoda výroby práškovou metalurgií rychle tuhoucích částic

Využitím této metody je získáváno homogenní struktury materiálu a vlastností, kterých se nedosáhne konvenční metodou. Prášková metalurgie je metoda beze ztrát materiálu. Základním prvkem této výroby je prášek. Prášek se získává rozprášením taveniny inertním plynem a následným rychlým ochlazením. Pro získání požadovaného produktu je prášek hermeticky uložen do kontejnerů vyrobených z nízkouhlíkové oceli. Tyto kontejnery jsou vakuovány a následně dojde k izostatickému lisování za vysoké teploty a tlaku. Vlivem vakua a tlaku uvnitř kontejneru dochází ke slinování prášku. Úplným vychladnutím kontejneru zabráníme případným deformacím. Po dokončení celého procesu se odstraní vrchní vrstva materiálu a následně můžeme tvářet za tepla. Tváření je prováděno z důvodu požadavku na polotovary o žádaném průřezu [9].

Značnou výhodou této metody výroby je potlačení řádkovitosti a segregace. Dále dochází k zamezení vzniku vláknitosti a úplnému zamezení rizika vzniku necelistvosti [9].

Postup této metody je znázorněn v Obr. č. 2.



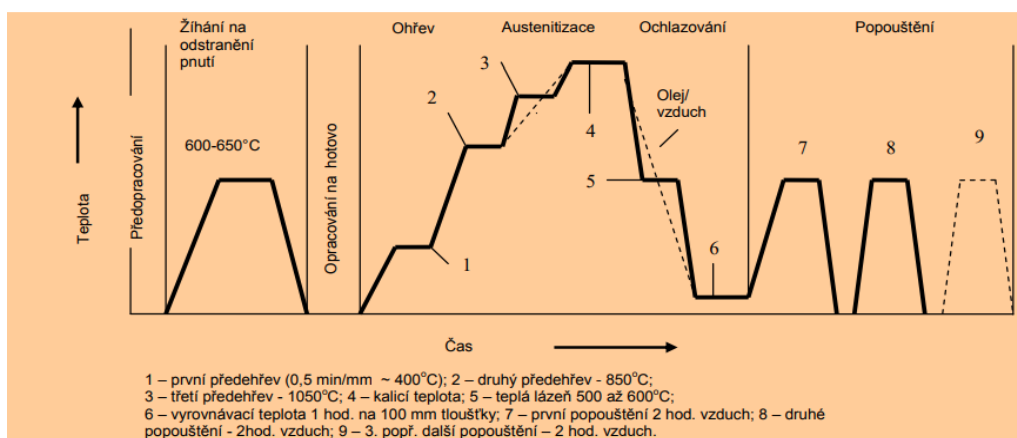
Obr. č. 2. Metoda výroby práškovou metalurgií rychle tuhoucích částic [9]

2.5 Tepelné zpracování rychlořezných ocelí

Tepelné zpracování je pro rychlořezné oceli velmi důležité. Správným provedením tepelného zpracování lze měnit konečné vlastnosti ocelí dle požadavků, které jsou na ně kladeny a s ohledem na možnosti zpracované oceli. Ke zlepšení jejich obrobiteľnosti využíváme žíhání naměkko.

Další tepelná zpracování jsou zušlechťování a zmrazování. Na správné provedení tepelného zpracování rychlořezných ocelí je nutné brát zřetel, jelikož jejich tepelná vodivost přispívá ke vzniku pnutí a jejich vysoký obsah uhlíku zapříčiňuje náchylnost k oduhličování povrchu a k praskání. Proto je správné provedení důležité [1, 11].

Příklad základního postupu tepelného zpracování rychlořezné oceli je znázorněn na Obr. č. 3.



Obr. č. 3. Průběh tepelného zpracování rychlořezných ocelí [11]

2.5.1 Zušlechťování

Popuštění a kalení jdou spolu ruku v ruce. Proto lze tyto operace označit jako zušlechťování ocelí.

2.5.1.1 Kalení

Cílem kalení je získání nerovnovážného stavu oceli, který zajišťuje zlepšení určitých mechanických vlastností oceli, jako je tvrdost. Kalení lze rozdělit dle strukturní složky, která v oceli převažuje, na martenzitické a bainitické. Principem kalení je ohřev oceli na austenitizační teplotu, výdrž na této teplotě po určitou dobu a rychlé ochlazení. Austenitizační teplota musí být dostatečně vysoká, aby mohlo dojít k rozpuštění patřičného množství karbidů. Při austenitizaci jsou rozpouštěny některé sekundární karbidy a eutektoidní karbidy. Vlivem tohoto rozpouštění je austenit nasycován legujícími prvky a uhlíkem. Rychlořezné oceli kalíme po jejich hotovém opracování či po suchém hrubém přebroušení.

Rychlořezné oceli se dříve kalily v solných lázních. Z důvodu nízké tepelné vodivosti rychlořezných ocelí bylo nutné provádět ohřev v solné lázni postupně. Dnes se kalení rychlořezných ocelí provádí ve vakuových zařízeních, kde je využíván přetlak inertního plynu. Jako inertní plyny se používají helium, dusík anebo argon. Díky těmto plynům dosahujeme kovově čistého povrchu po zakalení rychlořezných ocelí a nedochází zde ke vzniku měkkých míst v podobě zmiňovaných parních polštářů. U vakuových pecí je doba výdrže na kalicí teplotě delší z důvodu zajištění kvalitního prohrátí kaleného tělesa a kalicí teploty jsou voleny u spodních hranic kalících teplot, aby bylo zabráněno nežádoucímu hrubnutí zrna.

Pro dosažení kalicí teploty je nutná určitá doba ohřevu. Tato doba je závislá na použitém ohřevacím zařízení, výši kalicí teploty, chemickém složení oceli a na průřezu kaleného tělesa. Podle průřezu se stanovuje doba ohřevu z tabulek nebo diagramů, které platí pro dané podmínky. Ohřev rychlořezných ocelí probíhá v solných lázních. U rychlořezných ocelí je dobrý ohřev provádět v několika stupních, kdy v prvním stupni se ohřívají při teplotě 500 – 550 °C, v druhém stupni při teplotě 850 °C a pokud jsou kaleny tělesa složitějších tvarů doporučuje se i třetí stupeň ohřevu při 1050 °C. Doba, za kterou by mělo dojít k vyrovnání teplot, se přibližně volí 30 sekund na 1 mm tloušťky ohřívajícího tělesa při teplotě do 650 °C, 60 sekund na 1 mm tloušťky tělesa při ohřevu na rozmezí teplot 850 – 900 °C. Rychlořezné oceli mají vysoký obsah karbidotvorných prvků, a proto se austenitizují při poměrně vysokých teplotách. Tyto teploty se pohybují v rozmezí 1100 až 1320 °C. Při austenitizaci dochází k rozpouštění karbidů a nasycování austenitu. Po vyrovnání teploty v celém průřezu následuje výdrž na kalicí teplotě. U rychlořezných ocelí je tato výdrž poměrně krátká a pohybuje se kolem 80 až 150 sekund. Při volbě vysokých hraničních kalících teplot přichází nebezpečí hrubnutí zrna, a proto tato volba je pouze výjimečná. Stejně tak i dlouhá délka výdrže mimo stanovenou hranici podporuje hrubnutí zrna a tím i snížení houževnatosti, což je v daném případě nežádoucí. Vlivem kalení vznikají uvnitř materiálu vnitřní pnutí, jejichž důsledkem dochází k možnému popraskání materiálu.

Po dodržení výdrže na kalicí teplotě následuje ochlazování. Ochlazování je prováděno nadkritickou rychlostí. Jelikož rychlořezné oceli disponují vysokou prokalitelností, je možné je ochlazovat v několika různých prostředích, ve vodě, solné lázni nebo v oleji. Nejvhodnější druh ochlazovacího prostředí je předepisován pro jednotlivé značky oceli a je volen na základě prokalitelnosti, chemického složení a anizotermického rozpadu austenitu [1, 9, 11, 12].

2.5.1.2 Popouštění

Kalená tělesa jsou křehká a náchylná na praskání, a proto je dalším krokem výroby popouštění. Popouštěním se zajistí konečné požadované mechanické vlastnosti. Dále se popouštěním zajistí snížení zbytkového austenitu, odstranění vnitřního pnutí a dosažení

maximální tvrdosti ocelí. Martenzit, zbytkový austenit, eutektické karbidy a menší množství sekundárních karbidů tvoří strukturu zakalených rychlořezných ocelí. Zbytkový austenit je termicky stabilní díky vysokému legování. Jeho stabilita se zvyšuje se zvyšující se austenitizační teplotou ohřevu a při delším pobytu materiálu na pokojové teplotě po zakalení. Stabilita se také zvyšuje vlivem samopopouštěcího efektu při ochlazování materiálu z popouštěcích teplot v okolí teploty martenzit start. Vlivem těchto efektů a pochodů je nutné rychlořezné oceli okamžitě po kalení popouštět. Popouštění je výhodné provádět několikrát po sobě, aby se co nejvíce zbytkového austenitu přeměnilo na martenzit. Nabízí se i možnost propojit popouštění se zmrazováním materiálu. Principem popouštění je ohřev zakaleného tělesa na popouštěcí teplotu. Popouštění rychlořezných ocelí se provádí zpravidla dvakrát až třikrát a některé typy rychlořezných ocelí mohou být popouštěny i vícekrát. Při popouštění zahřejeme materiál pod teplotu 600 °C, na níž setrváme určitou dobu.

Popouštěcí teplota se volí na základě požadovaných výsledných mechanických vlastností, respektive na požadované konečné tvrdosti materiálu. Pro rychlořezné oceli je specifické popouštění na sekundární tvrdost. Sekundární tvrdosti chápeme konečnou tvrdost po popouštění. Popouštění probíhá za izotermické výdrže na popouštěcí teplotě. Nejvyšší tvrdosti dosahujeme při popouštění rychlořezných ocelí při teplotách 500–550 °C. Je nutné, aby byl ohřev na popouštěcí teploty pozvolný a došlo k rovnoměrnému a celkovému prohrátí popouštěného tělesa. Na pochodech, které probíhají ve zbytkovém austenitu a martenzitu závisí změna tvrdosti. Při popouštění se začínají vylučovat karbidy wolframu. Důsledkem tohoto vylučování je snižování tvrdosti martenzitu. Následně dochází k rozpouštění dalších legujících prvků. Vlivem klesání obsahu legujících prvků ve zbytkovém austenitu a se zvyšujícím se počtem popouštěcích cyklů rostou teploty martenzit start a martenzit finish, a také se docílí dokonalejšího rozpadu zbytkového austenitu a transformace martenzitu.

Jelikož rychlořezné oceli vyžadují popouštění při vyšších teplotách, nutně zařadit přehřev, který se provádí buď v peci či v solných lázních. Přehřev se provádí na teploty v rozmezí 300–500 °C, kdy se vyčká na vyrovnání teplot v celém tělese. Po vyrovnání teplot se ohřívá na již na popouštěcí teplotu a to přibližně rychlostí 20–50 °C za hodinu, kdy tato rychlost záleží na velikosti popouštěného tělesa. Při dosažení popouštěcí teploty nastává doba výdrže, která u rychlořezných ocelí je minimálně 30 minut. Pokud se popouští vícekrát po sobě je nutné dodržet prodlevu na popouštěcí teplotě zhruba 1 hodinu. Při dalším popouštění je popouštěcí teplota přibližně o 10 °C nižší než u předchozího popouštění [1, 9, 12, 13].

2.5.2 Žihání naměkko

Tímto tepelným zpracováním dosahujeme u rychlořezných ocelí snížení tvrdosti, zvýšení obrobiteľnosti a tváriteľnosti za studena. Žihání naměkko zařazujeme jako mezioperační zpracování, pro odstranění zákalných struktur po neřízeném ochlazování po tváření. RO jsou vždy v mezioperačním stavu žihané, aby bylo možné materiál opracovat a vyrobit z něj konkrétní nástroj pro obrábění.

Transformační žihání naměkko je technologie, kdy dochází k ohřevu oceli nad transformační teplotu, která se obvykle pohybuje okolo 780 °C až 840 °C. Následuje výdrž na této teplotě 2 až 4 hodiny. Dosáhneme tak jemnější struktury sferoidizovaných karbidů a relativně vyšší tvrdosti. Po výdrži nad transformační teplotou se oceli ochlazují rychlostí 10 °C za hodinu. Ochlazování probíhá přes překrystalizační interval na teplotu 760 °C. Následuje další výdrž na této teplotě. Opět je to kolem 4 hodin s následným chladnutím ocele na vzduchu či v peci. Stabilizace karbidů, které se při austenitizaci pomalu rozpouštějí, je nežádoucí, a proto výdrž na těchto teplotách nesmí být příliš dlouhá. Žiháním naměkko dosahujeme struktury tvořené eutektickými karbidy, legovaným feritem, sferoidizovanými eutektoidními a sekundárními karbidy [1].

2.5.3 Žihání ke snížení pnutí

Vlivem tváření za studena nebo opracovávání nástrojů z rychlořezných ocelí vzniká uvnitř materiálu pnutí, zejména při intenzivním přebrušování po jejich tepelném zpracování. Aby nedocházelo k uvolňování vnitřního pnutí při ohřevu na kalící teploty, do technologického postupu zařazujeme žihání. Doporučená žihací teplota se pohybuje okolo 600–650 °C, kde následuje výdrž po dobu kolem 1 hodiny. Po výdrži na žihací teplotě následuje pomalé ochlazení [1, 11].

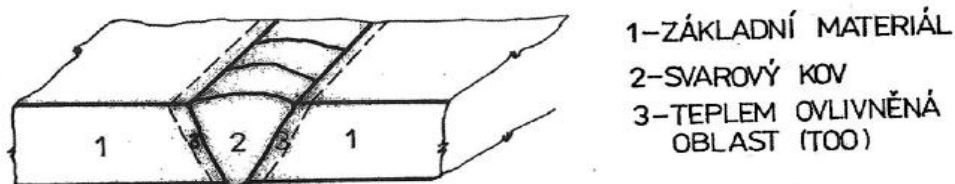
3 Svařování a pájení

Tato kapitola je věnována metodám, které slouží pro vytvoření nerozebíratelných spojů.

3.1 Svařování

Spojování materiálů prostřednictvím svařování je jednou z nejefektivnějších metod pro spojování. Technologii svařování lze definovat jako nerozebíratelné spojení dvou materiálů. Nerozebíratelné spojení je velice pevné a svojí pevností odpovídá pevnosti spojovaných materiálů. Nerozebíratelného spoje dosáhneme svařováním pomocí tepla, případně tlaku, který je vyvolán lisem a způsobuje deformaci kontaktních ploch. Svařování lze jednoduše rozdělit na technologie s využitím přídavného materiálu nebo bez použití přídavného materiálu.

Na Obr. č. 4 je znázorněna základní struktura svarového spoje, který se skládá ze základního materiálu, který je k sobě spojován svarovým kovem. Svarový kov se vytvořil v průběhu svařování roztavením základního materiálu a přídavného materiálu a jejich smísením. Poslední částí je tepelně ovlivněná oblast, která je částí základního materiálu a byla tepelně ovlivněna při tavném svařování. Její struktura a vlastnosti se liší od základního materiálu [14–16].



Obr. č. 4. Popis základní struktury svarového spoje [14]

3.1.1 Základní rozdělení metod svařování

Svařování můžeme rozdělit na dvě základní metody – tavné a tlakové svařování. Tyto metody mají pod sebou jednotlivé typy svařování.

Pro tavné svařování je charakteristický vznik spoje pomocí přívodu tepelné energie do oblasti vzniku svaru. Vlivem tepla dochází k natavení základního materiálu, eventuálně přídavného materiálu. Pomocí adhezních sil je vázána tekutá fáze kovu na povrch tuhé fáze kovu. Slabé adhezní síly se při tuhnutí taveniny mění na chemickou vazbu v podobě krystalové mřížky. Tavné svařování může být i s využitím tlaku (např. elektrické odporové svařování) nebo bez využití tlaku (svařování pomocí elektrického oblouku, plazmové, elektronové atd.)

Principem tlakového svařování je působení mechanické energie za doprovodu tepla, která slouží k aktivaci povrchových atomů a makro nebo mikrodeformací. Spojované povrchy se za působení tepla přiblíží k sobě tak, že začnou působit meziatomové síly a vznikne tak svarový spoj. Ke spojení dochází v plastickém stavu při vysoké teplotě. Příkladem tlakového svařování je kovářské svařování [14–15, 17].

3.1.2 Kovářské svařování

Ke kovářskému svařování se váže velice dlouhá historie. Tato technologie je považována za tradici. O jejím provedení (technologickém postupu) se zachovalo velice málo zdrojů. Informace o kovářském sváření se zachovaly díky pamětníkům, kteří ho popisují, tak jak ho znají.

Už dříve touto metodou byla vyráběná damašková ocel, která nese své jméno podle syrského města Damašek. Výroba damaškové oceli spočívá v nahřívání plátů ocelí různého druhu a jeho překládání přes sebe. Pomocí kladiva nebo lisu jsou svařeny přeložené pláty k sobě. Damašková ocel je velice pevný a houževnatý materiál. Dnes je tato metoda svařování velice náročná na provedení u materiálů, jakými jsou novodobé ušlechtilé oceli, které disponují velkým množstvím legur. Některé z těchto legur nevhodně ovlivňují tvorbu kovářského spoje a mohlo by dojít ke špatnému sváření a následně rozpadu spoje při jeho užívání v praxi.

Podstatou kovářského spoje rychlořezné oceli a jemnozrnné konstrukční oceli je pečlivá příprava spojovaných ploch, spočívající v dokonalém odmaštění. Základní surovinou pro vyhotovení spoje je tavidlo, které na sebe váže oxidy a nečistoty. Výroba spoje probíhá tak, že se na připravené a očištěné plochy vloží směs tvořená tavidlem a kovovými pilinami. Po této přípravě dojde k uložení do pece, kde se materiály zahřejí na 50 až 90 % teploty tání materiálu. Po jejich zahřátí je dalším krokem samotný proces svařování vlivem působení vnějšího tlaku v podobě úderů lisu nebo kladiva. V průběhu kování probíhají difuzní procesy mezi kovanými materiály a přídatným materiálem, který tvoří vlastní svar. Pevného spoje pak dosahujeme vlivem urychlení difuzních procesů, za pomoci vysoké teploty.

Základním rozdílem mezi kovářským a difuzním svařováním je, že se u kovářského spoje přidává mezi spojované plochy tavidlo a přídatný materiál, například v podobě kovových pilin. Předpokladem pro vznik tohoto spoje je vznik meziatomárních vazeb [18, 19].

Dříve takto vyhotovené kovářské spoje nebyly podrobeny pevnostním zkouškám, záleželo na znalostech a praxi zhotovitele.

3.1.3 Difuzní svařování

Difuzní svařování se řídí Fickovými zákony, pojednávajícími o transportních dějích [20]. V rovnici (1) je popsán první Fickův zákon:

$$J_d = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad \left[\frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right] \quad (1)$$

J_d ...Rychlost transportu prolínající látky; D ...Difuzní koeficient; c ...Spád koncentrace

Veličina J_d znázorňuje rychlost transportu prolínající látky. Ten je úměrný koncentračnímu gradientu ve směru difuze. Veličina D je konstanta úměrnosti a je označována jako koeficient difuze. Druhý Fickův zákon využíváme, jestliže difuzní koeficient není závislý na koncentraci [20]. Druhý Fickův zákon vyjadřuje rovnice (2) ve tvaru:

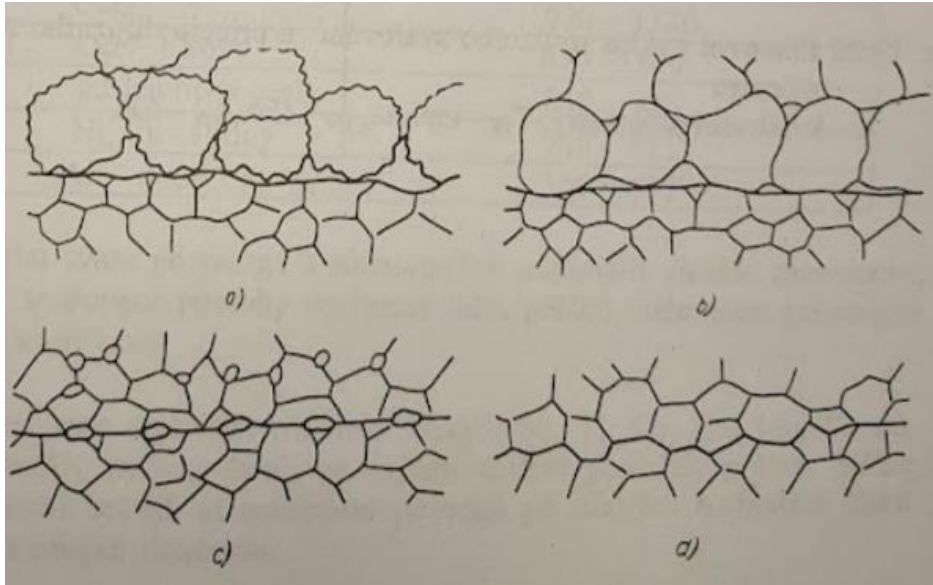
$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \left[\frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{m}^3} \right] \quad (2)$$

D ...Difuzní koeficient; c ...Spád koncentrace; τ ... čas

Principem difuzního svařování je spojení dvou kovů za pomoci teploty a tlaku, který působí v místě svaru. Vlivem tlaku vznikají lokální plastické deformace, které zajišťují přiblížení materiálů natolik, aby mohla vzniknout difuze mezi povrchovými vrstvami spojovaných materiálů [21].

Principem difuzního svaru je zahřátí dvou kontaktních ploch na 50 až 90% teploty tání materiálů. Teplota se řídí podle materiálu s nižší tavící teplotou. Působením měrného tlaku na zahřáté plochy vzniká svarový spoj. Na začátku vzájemné difuze spojovaných materiálů dochází k přemísťování vakancí a dislokací. Difuzí se dosahuje vyrovnání energetické bilance a tím také odstranění původního rozhraní ploch. Rychlost difuze závisí na teplotě [18, 21].

Postup stádií při vzniku difuzního spoje je znázorněn na Obr. č. 5.



Obr. č. 5. Postupná stádia při vytváření difuzního spoje [21]

- a) První kontakt a počátek migrace atomů a vytváření můstků
- b) Dochází zde k plastickému zarovnání mikrone rovností ploch
- c) Vznik mikrodeformací a působení intenzivní difuze
- d) Dokončení difuze a vznik difuzního spoje

3.2 Pájení

Pájení je charakterizováno jako nerozebíratelné spojení dvou materiálů, pomocí přídavného materiálu. V případě přídavného materiálu se jedná o pájku, slitinu kovů s různým poměrem složek, například olova, cínu, mědi, která má nižší teplotu tavení a odlišné chemické složení než spojované kovy. Pájení lze rozdělit podle teploty, a to na tvrdé a měkké. Pro měkké pájení se využívají měkké pájky, které mají přibližný bod tání do 450 °C. Pájky s bodem tání nad teplotu 450 °C jsou značeny jako pájky tvrdé [14, 22].

Pro vytvoření pájeného spoje je důležitá příprava základních materiálů. Materiály jsou k sobě přiloženy při zachování určité minimální mezery. V mezerách o šířce menší než 0,5 mm se projevuje kapilární síla. Principem pájení je zahřátí pájeného místa nebo celé součásti. V těchto zahřátých místech nedochází k natavování základních materiálů, ale pouze k jejich smáčení pájkou. Smáčivost lze definovat jako schopnost vytvořit souvislý povlak za použití vhodné pájky, tavidla a teploty. Utvořený povlak má úhel smáčení, který je menší než 90°. Další potřebnou vlastností pro vytvoření spoje je vzlínavost, která je definována jako schopnost roztavené pájky, při určité teplotě, vyplnit místo mezery za působení kapilární síly. Spoj vznikne na základně difuzního procesu a adhezivního působení. Při spojování vznikne přechodová oblast u pájky i základního materiálu. V této přechodové oblasti dochází ke změnám chemických a fyzikálních vlastností a také ke snížení kvality spoje, z důvodu přítomnosti křehkých intermediálních fází. Při difuzi dochází k přechodu látky s vyšší koncentrací (veličina, která číselně charakterizuje směs) do prostředí látky se svojí nižší koncentrací. Difuze probíhá do té doby, než dojde k vyrovnání koncentrace obou látek [14].

3.2.1 Pájky

Pojem pájka je užíván pro označení přídavného materiálu, který má funkci vyplňovat mezeru mezi spojovanými materiály. Měkké pájky se skládají z měkkých kovů o různém poměru složek. Těmito složkami se dosahují vlastnosti, které jsou potřebné pro dosažení spoje například teplota tavení pájky. Měkké pájky jsou nejčastěji slitinami olova, cínu, kadmia, zinku a stříbra.

Tvrdé pájky jsou složeny ze slitin kovů, které disponují vyšším bodem tání, jako jsou slitiny mědi, kadmia, niklu, stříbra, zinku, a to v různých kombinacích a poměrech. Tyto pájky se nejčastěji hodí pro pájení pod tavidlem, ve vakuu případně redukční atmosféře.

Pájky se nachází ve formě polotovarů. Příkladem můžeme uvést prášky, dráty, trubičky, tyčinky, pásy a pasty [14, 22].

3.2.2 Tavidla

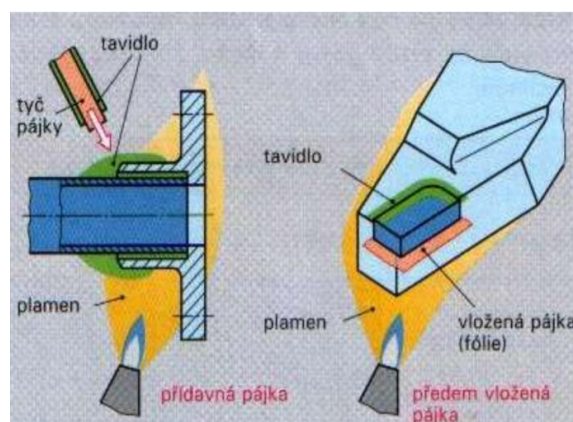
Pro zlepšení technologie pájení se využívá tavidel. Jedná se o chemické látky, které mají za úkol chránit pájený materiál a pájku před okolními vlivy, například oxidací. Pro pájení je důležité, aby tavidla splňovala několik podmínek, mezi něž patří dobrá smáčivost povrchů základních materiálů, chemická stálost, nižší reakční teplota (zhruba o 50 až 150 °C, než je teplota tavení pájky) a stálé povrchové napětí. Tavidlo by mělo mít vždy menší hustotu, než je hustota používané pájky. Tavidla mívají formu prášku, kapaliny, pasty nebo ochranné atmosféry [23].

3.2.3 Tvrdé pájení

Tento druh pájení využíváme na spoje, s důrazem na vyšší pevnost spoje. Pro tvrdé pájení je nejčastěji využíván ohřev pomocí kyslíkoacetylenového plamene, který je nastaven na teplotu potřebnou k pájení. Dokonalejší metodou je tvrdé pájení ve vysokém vakuu. Tento způsob lze využít pro různé druhy kovových materiálů s vysokou teplotou tání. Na pájené plochy, důkladně očištěné (odmaštěné) se nanáší tavidlo. Do tavidla je občas namáčen v průběhu pájení i konec pájky [22, 24].

Jako tavidla se pro tvrdé pájení nejčastěji používá borax (tetraboritan sodný – $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) nebo směs boraxu s kyselinou boritou. Pro zvýšení účinnosti tavidel je využívána kyselina fosforečná či její soli, uhličitany, fluoridy a chloridy [14].

Na Obr. č. 6 je znázorněn princip pájení plamenem, který je využíván pro tvrdé pájení.



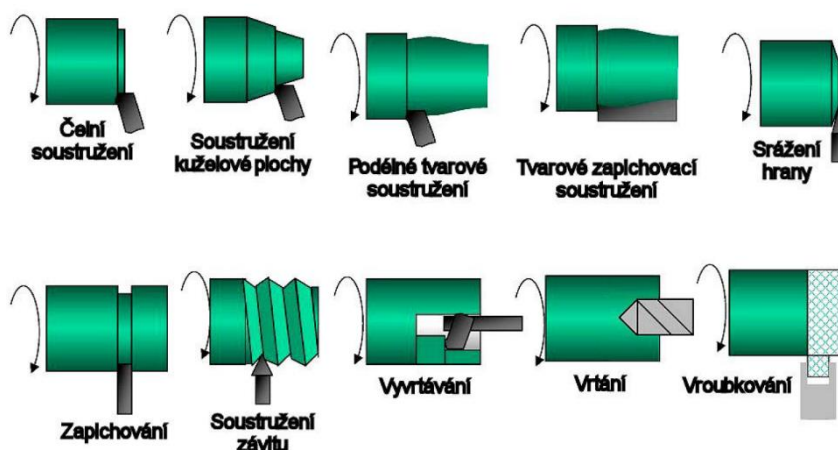
Obr. č. 6. Princip tvrdého pájení (pájení plamenem) [24]

4 Soustružnické obráběcí nože

Obrábění lze definovat jako technologický proces. Tímto procesem je vytvářen obrobek o určitých rozměrech, tvaru a jakosti povrchu. Principem je odebrání materiálu obráběcím nástrojem ve formě třísky vlivem mechanických, elektrických, chemických účinků a jejich kombinací. Obráběcí nástroj tvoří aktivní část v soustavě pro obrábění, protože dochází k dotyku nástroje a obrobku za vzájemného působení řezných sil [25].

Jedna z mnoha možností, jak obrábět materiály, je technologický proces soustružení. Jedná se o třískové obrábění materiálu nejčastěji pomocí jednobřitého nástroje. Soustružením jsou především vyhotovovány součásti válcovitého tvaru. Hlavní řezným pohybem při soustružení je pohyb rotační, který vykonává obrobek. Vedlejšími pohyby pak jsou posuv a přísuv. V případě posuvu se jedná o podélný pohyb kolem obrobku. Přísuv zajišťuje hloubku řezu [26].

Pomocí soustružení lze vykonávat několik druhů prací. Jednotlivé druhy jsou znázorněny na Obr. č. 7.



Obr. č. 7. Souhrn základních soustružnických prací [25]

Nástroje na soustružení lze dělit podle několika způsobů. Dělíme je dle orientace nástroje vzhledem k obrobku, podle směru obrábění, podle množství odebraného materiálu a kvality obrobenej plochy nebo podle způsobu jejich výroby. Toto dělení popisuje Tab. č. 3 [27].

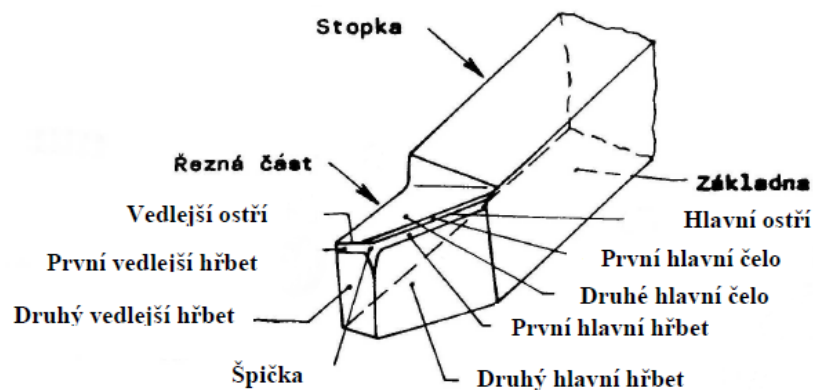
Tab. č. 3. Rozdělení nástrojů na soustružení [27]

Rozdělení podle	Orientace nástroje	Směru obrábění	Možností odebraného mat. a kvality obr. povrchu	Způsobu výroby
Členění dělení	Vnější	Podélné	Hrubovací	Nože kované celistvé
	Vnitřní	Příčné		Nože broušené z RO
	Čelní	Kopírovací	Dokončovací	Nože s pájenými destičkami
				Nože s VBD

RO-rychlořezná ocel, VBD-vyměnitelná břitová destička

Soustružnické obráběcí nástroje se skládají ze špičky a stopky. Špička je tvořena řeznou částí nástroje, která má svoji geometrii nože, která je dána hřbetem (vedlejší a hlavním), ostřím (vedlejší a hlavní) a čelem (vedlejší a hlavní). Funkcí čela břitů je vytváření třísky, při obrábění. Tělo nástroje slouží k upnutí nástroje do upínacího nožového přípravku, který bývá většinou součástí stroje [25].

Popis soustružnického nože nalezneme v Obr. č. 8.



Obr. č. 8. Popis soustružnického nože [28]

4.1 Celistvé soustružnické nože

Pro tyto nože je charakteristické, že jsou vyrobeny z jednoho materiálu. K jejich výrobě se používají materiály jako: rychlořezné oceli nebo ve výjimečných případech slinuté karbidy. Prvním krokem výroby je vytvoření základního polotovaru v podobě tyče či výkovku. Pracovní část nože je následně broušena. Takto vyrobené nástroje jsou tvarově jednoduché a jsou vyráběny prostřednictvím kusové či hromadné výroby. Přestření břitů je zde možné, a to ve velkém počtu opakování. Nevýhodou tohoto provedení je velká spotřeba kvalitního materiálu a vysoká cena [29, 30].

Celistvé soustružnické nože z RO jsou vyobrazeny na Obr. č. 9.



Obr. č. 9. Soustružnické nože celistvé z RO [31]

4.2 Pájené soustružnické nože

Technologie pájení je využívána ke spojení břitové destičky k tělu nástroje. Břitové destičky jsou nejčastěji vyrobeny ze slinutých karbidů a méně často se využívají rychlořezné oceli. Těla těchto nástrojů jsou vyráběna z nástrojových ocelí, pokud

je vyžadována vyšší pevnost, nebo z konstrukčních ocelí. Tvary nástrojů vyhotovených touto technologií jsou definovány technickými normami [29].

Pájení je provedeno pomocí tvrdé pájky na bázi stříbra. Nástroj se nahřívá na teplotu pájení v peci, elektricky odporově nebo indukčně. Mezi břitovou destičkou a tělo nástroje se pak vkládá síťka či jsou na jedné z pájených ploch utvořeny výstupky, které mají požadovanou výšku. Forma tohoto spojení je výhodná z důvodu zajištění pevného, stabilního a přesného spoje. Značnou nevýhodou pájených spojů je jejich složitější konstrukce. Mezi spojením může dojít ke vzniku pnutí, jehož vlivem vzniká nežádoucí jev – trhliny na destičce ze slinutého karbidu [30].

Pájené soustružnické nože nalezneme na Obr. č. 10.



Obr. č. 10. Soustružnické nože s pájenou břitovou destičkou [32]

4.3 Nože s mechanicky upnutými destičkami

Potřeba mechanického upevnování břitových destiček přišla s rozvojem výroby vyměnitelných břitových destiček – VBD. K využívání vedla potřeba úspory času na přeostřování rezných destiček a zkrácení vedlejších časů strojů. Principem této metody je uložení VBD do přesně připravených lůžek, které se nachází na těle nástroje. Upnutí lze realizovat následujícími způsoby: pákovým upínacím systémem, systémem s upínkou ve tvaru klínu, případně systémem s upínkou a šroubkem [30, 33].

Případy mechanicky upnuté VBD jsou znázorněny na Obr. č. 11.



Obr. č. 11. Soustružnické nože s mechanicky upnutými VBD o různém provedení [34]

5 Mechanické zkoušky

Jak už název těchto zkoušek napovídá, jedná se o zkoušky, kterými zjišťujeme mechanické vlastnosti materiálů nebo jejich spojů. Za základní čtyři druhy mechanických vlastností materiálu jsou považovány pružnost, tažnost, houževnatost a pevnost. Mechanické zkoušky tedy využíváme pro zjištění jakosti, kvality, bezpečnosti materiálů a spojů. Pomocí nich můžeme zjišťovat, jaké mechanické vlastnosti zkoušený materiál nebo spoj má. Výsledkem mechanických zkoušek jsou podklady, které dále slouží pro pevnostní propočty.

Mechanické zkoušky lze dělit podle tří různých aspektů, podle způsobu zatěžování, fyzikálních podmínek zkoušky a podle stavu napjatosti [35, 36].

Níže charakterizované zkoušky byly zvoleny pro zkoušení vzorků v praktické části bakalářské práce. Zkouška stříhem byla volena na základě podobnosti namáhání v praktickém užití soustružnického nože při obrábění a lze v ní očekávat nejmenší pevnost.

5.1. Zkouška krutem

Jedná se o statickou zkoušku materiálů. Zkouška krutem není sama o sobě předepsána normou, z důvodu její experimentální náročnosti, a proto se pro vyhodnocení mechanických vlastností u běžných materiálů nevyužívá. Výstupem této zkoušky je pevnost materiálu v krutu a modul pružnosti ve smyku [35].

„Namáhání krutem vzniká tehdy, je-li tyč zatížena dvojicí momentů působících v rovinách kolmých na osu tyče, které mají opačný směr. Příčný průřez tyče je pak namáhán smykovým napětím působícím v rovině průřezu.“ [35]

Výstupní hodnoty je nutné na základě získaných hodnot ze zkoušky dopočítat pomocí známých jednoduchých vzorců. Pevnost v krutu R_{mk} vyjadřuje rovnice (3).

$$R_{mk} = \frac{M_{kmax}}{W_k} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

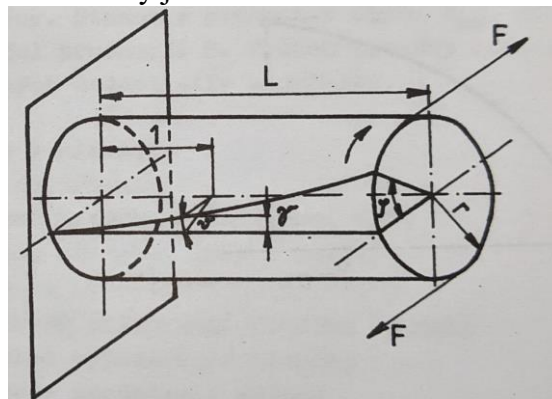
R_{mk} ...Pevnost v krutu; M_{kmax} ...Maximální kroucí moment;

W_k ...Průřezový modul odporu v krutu

Hodnota M_{kmax} představuje maximální dosažený kroucí moment před porušením materiálu. W_k zde představuje průřezový modul odporu v krutu pro zkušební vzorek [35].

Zkouška krutem se provádí tak, že nejprve dojde k upevnění jednoho konce zkoumaného vzorku do zkoušecího stroje. Druhý konec zkoumaného vzorku je zatěžován kroucím momentem, který má známou velikost. Překročení maximální meze krutu zkoumaného vzorku způsobí vznik porušení materiálu v podobě trhlin [37].

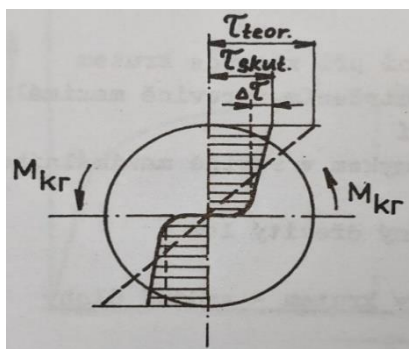
Schéma provedení této zkoušky je znázorněno na Obr. č. 12.



Obr. č. 12. Schéma provedení zkoušky krutem [35]

Při zatěžování zkušební vzorku je napětí v průřezu materiálu nerovnoměrně rozloženo. Například u tyče, která je kruhového průřezu se napětí mění s rostoucí plastickou deformací [35].

Na Obr. č. 13 je znázorněn průběh ideálního napětí na zkušebním vzorku kruhového průřezu.

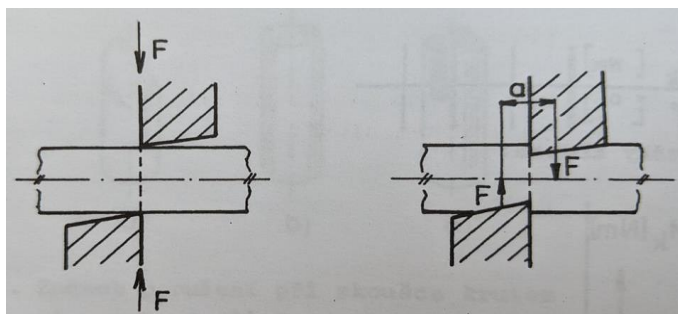


Obr. č. 13. Ukázka průběhu napětí po překročení elastických deformací [35]

5.2. Zkouška stříhem

Zkoušku stříhem řadíme mezi statické zkoušky materiálů a je označována normou ČSN 42 0342. Tato zkouška má dva možné způsoby provedení, kterými je jednoduchá zkouška stříhem a zkouška dvojitým stříhem. Strojní součásti jsou většinou současně namáhány normálovým a smykovým napětím, proto dosažení ideálního smyku není prakticky dosažitelné. Vždy se ke smykovému napětí přidává přídavné ohybové napětí, při kterém pak vzniká stříh. Ideální smyk si lze představit jako posuv dvou průřezů po sobě, které jsou si nekonečně blízké. Prostý smyk lze najít pouze na počátku stříhu [35].

Na Obr. č. 14 jsou znázorněny schémata průběhu jednoduché zkoušky stříhem.



Obr. č. 14. Schéma jednoduché zkoušky stříhem [35]

V levé části Obr. č. 14 se nachází stav před vniknutím zkušebních břitů do zkoumaného vzorku. V pravé části naopak již vidíme stav po vniknutí zkušebních břitů dovnitř zkoumaného materiálu. Zkouška je založena na principu dvou pohybujiících se nožů naproti sobě.

Zkouškou stříhem vyhodnocujeme pevnost materiálu ve stříhu. Pokud budeme uvažovat, že napětí je rovnoměrně rozloženo, lze stanovit smluvní mez pevnosti, která odpovídá určitému průřezu zkušební vzorku (S_0). Výpočet pro pevnost ve smyku lze vyjádřit rovnicí (4):

$$R_{ms} = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

R_{mk} ...Pevnost ve stříhu; $F_{k\max}$...Maximální síla; S_0 ...Průřez zkušební vzorku

V praxi však nerovnoměrné rozdělení napětí v zkoušeném průřezu narůstá se zvětšujícím se průřezem [35].

6 Plánování experimentu

V rámci této bakalářské práce byla využita metoda Design of experiment (DOE). Tato metoda je zde žádoucí, jelikož praktická část této bakalářské práce obsahuje mnoho variabilních technologických faktorů. Metoda DOE pomůže k optimalizaci testů provedených v experimentální části. Tímto způsobem se zúží množství provedených testů při zachování provázanosti mezi jednotlivými parametry.

Slovo experiment už napovídá, že se jedná o pozorování a konání za účelem potvrzení a vyvrácení hypotézy anebo znalosti. Hypotézy nebo znalosti tvrdí něco o příčinách a vztazích určitých jevů. Termínem experiment u metody DOE je označována vhodně uspořádaná soustava pokusů. Cílem experimentu je nalezení nejlepší varianty pracovního postupu a nabytí poznatků o vlastnostech výrobku anebo výrobního postupu. Postupy experimentu můžeme rozdělit na neplánované a plánované. Při plánování experimentů se pak tyto experimenty řídí podle 3P. 3P chápeme jako tři charakteristiky, kterými jsou:

- „a) počet pokusů, ze kterých se experiment skládá,*
- b) podmínky, za kterých se jednotlivé pokusy uskuteční,*
- c) pořadí pokusů.“ [38]*

Pojmem pokusy značíme zjišťování hodnot ukazatele kvality, kde jsou určité, předem plánované podmínky výroby. Experiment pod sebe zahrnuje všechny pokusy, které mají určitý systém. Metoda DOE se využívá zejména tam, kde je zapotřebí testovat složité úlohy. V praxi nalezne uplatnění u testování nových výrobků anebo u výrobních systémech. Cílem metody plánování experimentu je snížit možnou proměnlivost výstupních hodnot sledované vlastnosti a kvalifikovat míru významnosti jednotlivých faktorů. Určením míry významnosti jednotlivých faktorů rozhodneme o způsobu, jakým ovlivňují jednotlivé faktory hlavní ukazatel kvality. Dalším cílem je určení úrovně významných faktorů tak, aby hlavní ukazatel kvality byl optimální a také stabilní [38 - 40].

6.1 Průběh plánování a vyhodnocení experimentů

Metodu DOE lze rozdělit na několik etap. První etapou je plánování experimentu, kdy se nejprve určí zásadní faktory, které by mohly ovlivňovat experiment. Počet pokusů vychází z matematického výpočtu, ve kterém hrají hlavní roli počty faktorů a počet opakování. Další etapou je sestavení samotné tabulky (plán experimentu), kde jsou vypsány jednotlivé pokusy a k nim přiřazené faktory pomocí kombinatoriky. V tabulce je vše uspořádáno tak, aby u každého z pokusů byla pokaždé jiná kombinace faktorů. Plán experimentu lze rozdělit na úplný a na částečný faktorový plán experimentu. Plán pro částečný faktorový experiment je sestaven jen pro několik tzv. hlavních faktorů a zbylé faktory zde budou považovány za vedlejší. Jejich označení, hlavní a vedlejší, nesouvisí s jejich velikostí vlivu na daný ukazatel. Vliv je na počátku experimentu neznámý. Takto sestavený plán experimentu je pro praktické použití nevýhodný. Dochází při něm k vysoké a neúspěšné spotřebě materiálů. Proto v další etapě metody DOE se vytváří optimální design, který zúží počet prováděných pokusů na základě určité podobnosti mezi jednotlivými pokusy určenými v prvotním plánu experimentu.

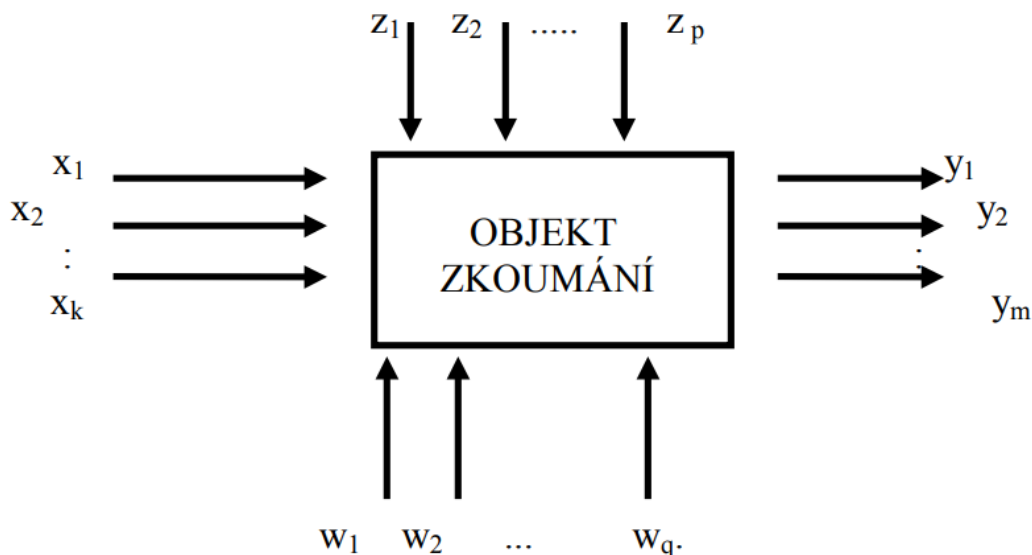
Po provedení jednotlivých pokusů a získání výsledků po mechanických zkouškách ze vzorků se určuje efekt faktorů. Efekt faktorů můžeme chápat jako změnu ukazatele kvality. Pro zjištění tohoto efektu existuje pět různých metod, který mi jsou průměr rozdílů, rozdíl průměrů, znaménková metoda, Yatesova metoda a polovina regresních koeficientů.

Významnost efektů lze zjistit při opakování pokusů. Toto testování významnosti obnáší nevýhodu v podobě velkého počtu pokusů, která lze vyřešit zdvojením měření. Výsledky se opět uvádějí do tabulky hodnot. Z této tabulky jsou pak vyčteny hodnoty efektů a určí se jejich význam s dopadem na kvalitu vzorků [38].

6.2 Analýza rozptylu

Tato analýza je označována zkratkou ANOVA, která je odvozena z anglického názvu analysis of variance. ANOVA se používá pro ověřování významnosti rozdílu mezi výběrovými průměry většího počtu náhodných výběrů. Pro toto testování musí být počet testovaných průměrů alespoň 3.

Podstatou metody ANOVA je, že celkový rozptyl je rozložen na dílčí rozptyly, které se přiřazují příslušným jednotlivým vlivům. Podle těchto vlivů jsou empirické údaje roztrženy. Analýza rozptylu obsahuje dílčí složky rozptylů, ale i reziduální rozptyl. Tyto rozptyly jsou složkami celkového rozptylu. Reziduální rozptyl je vyvolán dalšími vlivy, které nejsou v rozboru popsány. Významně ovlivňující úroveň zkoumaného znaku se určuje porovnáním složek rozptylu zkoumaného kvantitativního znaku. Aby tato analýza byla úspěšná, je nutná správná příprava experimentu. V praxi to znamená snahu o získání relevantních informací o zkoumané závislosti při nejmenším možném počtu pokusů. Toto lze interpretovat, jako černou skříňku s definovaným počtem vstupů a výstupů, kterou lze znázornit pomocí Obr. č. 15.



Obr. č. 15. Černá skříňka s definovaným počtem vstupů a výstupů [41]

Všechny způsoby možného vlivu (vstupní parametry) na objekt zkoumání jsou znázorněny na Obr. č. 15 šipkami, které směřují směrem k objektu zkoumání – značíme je vstupními parametry. Vlastnosti zkoumaného objektu nazýváme výstupy a ty jsou znázorněny na Obr. č. 15 šipkami, které směřují od objektu zkoumání [41].

6.2.1 Regresní model

Regresní model je model, který popisuje vztah mezi jednotlivými úrovněmi faktorů a měřenou proměnnou. Je to jeden z výstupů z analýzy rozptylu.

Je několik typů regresních modelů, kterými jsou:

- Lineární regresní model, kde vztah mezi jednotlivými vstupy a výstup je znázorněn přímkou. Lineární regresní model je jeden z nejjednodušších regresních modelů, kde lze snadno pozorovat závislosti.

- Vícenásobný regresní model, kde existuje více vstupních proměnných, které ovlivňují výstupní hodnoty. Formulace modelu je díky více vstupům složitější než u lineárního regresního modelu, ale stále vztah mezi vstupy a výstupy může být lineární.
- Nelineární regresní model, může být mocninná funkce nebo exponenciální funkce. Toto záleží na vstupních proměnných. Tento model se dá za pomoci vhodné transformace upravit na lineární tvar s ohledem na jeho parametry.
- Krokový regresní model je metodou, která umožňuje výběr nejlepších proměnných pro modelování z velkého počtu potenciálních proměnných.

Regresní model je statistický model, který slouží k předpovědi hodnoty závislé proměnné na základě jedné nebo více nezávislých proměnných. Je zde několik kroků, které je nutné provést pro vytvoření regresního modelu. V prvním kroku jsou určeny cíle regrese, tedy je nutné definovat, co má být predikováno a co jsou nezávislé proměnné, které budou využívány k předpovědi hodnot. Dalším, a to druhým krokem je sběr dat, kde se získávají a shromažďují data o závislých proměnných a případných nezávislých proměnných. Pak následuje výběr modelu, který je vhodný pro prováděnou analýzu a rozdělení dat na dvě množiny. První množina obsahuje trénovací data a druhá množina obsahuje testovací data. Pro vytvoření regresního modelu se využívá trénovací množina dat a pro ověření, jestli model správně předpovídá hodnoty je využita testovací množina dat. Pokud model nefunguje dobře, je dobré upravit jeho parametry, přidat další nezávislé proměnné anebo změnit úplně typ regresního modelu. Nakonec zbývá už jen interpretace výsledků a určení, jaký vliv mají nezávislé proměnné na závislou proměnnou. Interpretace výsledků a jejich hodnocení je provedeno analýzou reziduí.

Pro vyhodnocení kvality modelu jsou používány tři ukazatele, kterými jsou:

- Směrodatná odchylka (S) je statistická charakteristika, která umožňuje srovnávání jednotlivých dat mezi sebou. Určuje míru rozptýlení naměřených či pozorovaných hodnot okolo regresní přímky. Čím menší je směrodatná odchylka, tím je model přesnější.
- Koeficient determinace ($R - sq$) je statistickou charakteristikou, která určuje, jak dobře se regresní přímka uzpůsobuje datům. Tedy udává, jak dobře model dokáže namodelovat naměřená data. Nabývá hodnot od 0 do 1 a čím vyšší je jeho hodnota, tím je model kvalitnější a přesnější.
- Upravený koeficient determinace ($R - sq (adj)$) je podobnou statistickou charakteristikou jako je koeficient determinace. Na rozdíl od neupraveného koeficientu tento upravený zahrnuje informaci o počtu proměnných. Jeho výchozí informace je přesnější než výchozí informace neupraveného koeficientu determinace [42–46].

6.2.2 Reziduální analýza

Reziduální analýza (zbytková analýza) nebo také analýza reziduí je statistickou metodou, která hodnotí, jestli pozorovaná data souhlasí s předpoklady statistického modelu. Využívá se k hodnocení kvality modelu a odhaluje náhodné chyby v modelu, jestli jsou skutečně náhodné. Jednou z možností, jak provést reziduální analýzu, je použití reziduálních grafů, pomocí kterých se ověřují základní vlastnosti reziduí. Pojmem rezidua se označuje rozdíl mezi skutečnými a predikovanými hodnotami. Vyšetřovanými vlastnostmi jsou nulová středí hodnota, homogenní rozptyl reziduí, nezávislost reziduí a normativa reziduí. Reziduální grafy zobrazují rozdíl mezi pozorovanou hodnotou a hodnotou, která vyplývá z modelu pro každou jednotlivou pozorovanou hodnotu [47, 48].

Zjednodušený postup pro hodnocení modelu za pomoci reziduálních grafů se skládá přibližně z šesti kroků. V prvním kroku je nutné vybrat vhodný model, který je nutný natrénovat na vhodných datech. Tréninkem se rozumí, že se model trénuje na předpovídání reziduí místo skutečných původních hodnot. Dalším krokem je výpočet rozdílu mezi předpovídanými a skutečnými hodnotami, kterým získáme rezidua. Pak následuje samotná tvorba reziduálního

grafu, který má osu X a Y. Na ose X jsou zobrazovány predikované hodnoty a na ose Y jsou zobrazovány hodnoty skutečné. Hodnoty reziduí by měly být rovnoměrně rozloženy podél nuly, pokud jsou předpovědi modelu správné. Správnost se na grafu poznává tím, že je rozptýl reziduí kolem nuly rovnoměrný a nezobrazuje se v nich žádný vzor či výrazné body. Analýza grafu se provádí do té doby, dokud není docíleno uspokojivých výsledků. Pokud se objeví při analýze nějaké nedostatky u reziduálního grafu, je nutné se navrátit zpět k modelu, který je třeba upravit tak, aby pak výsledky v reziduálním grafu byly uspokojivé [44, 45].

Experimentální část

7 Cíl práce

Experimentální část této bakalářské práce se skládá z několika částí. V první experimentální části bude za cíl navrhnout experiment č. 1 pomocí metody DOE a zmapovat parametry kovářského navařování. Výsledky experimentu č. 1 budou použity pro navržení experimentu č. 2, který má za cíl vytvořit svarový spoj s dostatečnou pevností. Kvalita spoje bude ověřena pomocí mechanických zkoušek.

Výsledky této práce jsou důležitým zdrojem informací pro odborníky v oboru kovářského navařování a práce s rychlořeznými oceli. Práce by měla přispět k rozvoji a zdokonalení technologií spojování pomocí kovářského svařování, což může vést k větší efektivitě a produktivitě v průmyslové výrobě.

8 Úvod do experimentální části

Soustružnický nůž se skládá z těla nástroje a řezné destičky. V našem případě je tělo nástroje vyhotoveno z materiálu ČSN 41 1523. Jedná se o nízkolegovanou konstrukční ocel s obsahem uhlíku 0,20 %. Tento materiál disponuje mezi pevnosti v tahu R_m v rozmezí 450 až 690 MPa a její svařitelnost je zaručena. Ocel ČSN 41 1523 je normalizačně žíhána v rozmezí teplot 800–900 °C a popouštěna v rozmezí teplot 670–700 °C. Řezná destička je vyhotovena z rychlořezné oceli ČSN 41 9830. Jedná se o molybden wolframovou ocel s vysokou houževnatostí, dobrou odolností proti popouštění a opotřebení. Využívá se na řezné nástroje, které jsou velmi namáhané při obrábění kovových materiálů i při obrábění přerušovaným řezem [49–51].

Pro utvoření kovářského svaru je nutné mezi dva spojované kusy vložit směs, která se skládá z přídatného materiálu v podobě kovových pilin a boraxového prášku, jakožto tavidla. Pro tento experiment byly využity dva druhy materiálů kovových pilin, a to ČSN 41 1378 a ČSN 41 2050.

Ocel ČSN 41 1378 je nelegovaná svařitelná konstrukční ocel. ČSN 41 2050 představuje ocel k zušlechťování, která je řazena mezi jakostní oceli [52–54].

Podrobné chemické složení použitých ocelí je zaznamenáno v Tab. č. 4.

Tab. č. 4. Chemické složení použitých materiálů [6, 55–57]

Materiál	Chemické složení [%]											
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	W	V
11 523	max 0,20	max 1,60	max 0,55	0,04	0,045	-	-	-	-	-	-	-
11 378	max 0,16	-	-	0,04	0,040	min 0,02	-	-	-	-	-	-
12 050	0,42- 0,50	0,50- ,080	0,17- 0,37	0,04	0,04	-	max 0,25	max 0,30	max 0,30	-	-	-
19 830	0,9	-	-	-	-	-	4,3	-	-	5,0	6,5	1,9

Boraxový prášek užívaný jako tavidlo nebo celým názvem tetraboritan sodný ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$) je dekahydrát. Jedná se o pevnou bílou látku bez zápachu, která se používá v podobě prášku, je klasifikována jako nebezpečná. Využívá se pro analytickou chemii, laboratorní syntézy a pro průmyslovou aplikaci. Jeho výhodou je dosažení čistoty spoje, jelikož na sebe v roztaveném stavu váže oxidy a nečistoty [58].

V této části práce je představen experimentální výzkum pro vyhotovení kvalitního spoje mezi řeznou destičkou a tělem nástroje a získání informací, jaký parametr ovlivňuje nejvíce jeho kvalitu. Byly navrženy 2 experimenty za pomoci metody DOE, kde byly vyhotoveny jednotlivé vzorky o různých parametrech a zkoušeny za pomoci mechanických zkoušek.

9 Návrh experimentu č. 1

Samotný návrh experimentu byl proveden metodou DOE (design of experiment). Velikost vzorku byla volena tak, aby odpovídala velikosti spojované plochy u obráběcího nože, a to je přibližně 40 x 40 mm. Návrh a provedení tohoto experimentu zmapoval efekty faktorů na vyhotovení spoje. Toto zmapování bude pak přínosné pro provedení experimentu číslo 2, kde se bude možné plně věnovat zjišťování nejvyššího vlivu hlavních faktorů na vyhotovený spoj a zároveň dojde k úspoře na použitých materiálech, využití energii a času.

9.1 Návrh prvního experimentu pomocí metody DOE

Na základě úvah v tomto experimentu byly zvoleny tyto faktory:

Druh a kvalita kovových pilin:

V praxi se tyto piliny připravovaly v drtičce nebo byly získávány jako vedlejší produkt z řezání, kde nebylo přítomno mazivo. Zde je otázka, jaký má vliv doba odležení pilin na vzduchu, případně použití jemné kovové vlny nebo svařování přímo bez použití přídavného materiálu a tavidla. Při odležení pilin na vzduchu dochází k jejich oxidaci.

Faktory: Staré kovové piliny & nové kovové piliny & kovová vlna

Stav nakovávaných povrchů:

Pro pokus byly připraveny dva typy povrchů. První je hladký leštěný povrch. Drsnost povrchu po leštění závisí na použitém leštícím kotouči, ale dosahuje se tak drsnosti Ra v rozmezí od 0,02 μm do 0,71 μm [59]. Druhým je hrubý povrch, který byl vyhotoven frézováním. Při frézování dosahujeme drsnosti Ra v rozmezí od 1,6 μm do 6,3 μm [60]. Otázkou je, jakou roli zde hraje stav povrchu a jaký vliv má na kvalitu svarového spoje a jeho pevnost.

Faktory: Hladký povrch & drsný povrch

Teplota nakování:

Vyšší teplota nakování je nežádoucí z důvodu, že delší výdrž na této teplotě může vyvolat efekty ve struktuře rychlořezné oceli, které jsou nežádoucí. Příkladem můžeme uvést hrubnutí zrna ve struktuře materiálu.

Faktory: 1200 °C & 1100 °C

Doba výdrže na teplotě:

Doba setrvání na teplotě může ovlivnit strukturu nežádoucím způsobem. Při delší výdrži vysokolegovaných nástrojových ocelí na vysoké teplotě může dojít k přerozdělení legujících prvků a jejich vyloučení po hranicích zrn. To má za následek zhoršení mechanických vlastností a hrubnutí zrna.

Faktory: 5 minut & 10 minut

V Tab. č. 5 je znázorněn návrh úplného faktorového pokusu, který zahrnuje 32 variant. Počet variant byl získán z jednoduché kombinatoriky.

Tab. č. 5. Všechny kombinace pro vyhotovení kovářského spoje – úplný 4 faktorový plán

Č. varianty	Teplota	povrch	Doba výdrže na teplotě	Spojovací materiál
1	1200 °C	hladký leštěný	5 minut	Nové piliny
2				Staré piliny
3				Kovová vlna
4				Bez pilin i tavidla
5			10 minut	Nové piliny
6				Staré piliny
7				Kovová vlna
8				Bez pilin i tavidla
9		drsný	5 minut	Nové piliny
10				Staré piliny
11				Kovová vlna
12				Bez pilin i tavidla
13			10 minut	Nové piliny
14				Staré piliny
15				Kovová vlna
16				Bez pilin i tavidla
17	1100 °C	hladký leštěný	5 minut	Nové piliny
18				Staré piliny
19				Kovová vlna
20				Bez pilin i tavidla
21			10 minut	Nové piliny
22				Staré piliny
23				Kovová vlna
24				Bez pilin i tavidla
25		drsný	5 minut	Nové piliny
26				Staré piliny
27				Kovová vlna
28				Bez pilin i tavidla
29			10 minut	Nové piliny
30				Staré piliny
31				Kovová vlna
32				Bez pilin i tavidla

Tento plán byl sestaven za pomoci kombinatoriky. Pro experiment je vyžadována replikace vzorků, což znamená, že je nutné vyrobit 2 vzorky od každé plánované možnosti. Takto by se dosáhlo počtu vzorků 64, což je velice náročné s ohledem na spotřebovaný materiál i čas potřebný pro provedení experimentů. Optimalizace byla vyhodnocena za pomoci matematiky z Regionálního technologického institutu. Matematicky lze vytipovat, které z vedlejších faktorů jsou obsažené v hlavních faktorech. Důležité faktory jsou kombinací těchto vedlejších faktorů. Z experimentu však může vzejít výsledek, že hlavní faktory nejsou těmi hlavními významnými. U vedlejších faktorů tomu může být naopak, kdy z výsledku může vzejít, že jsou hlavními, které mají velký vliv na kvalitu spoje. Z tohoto důvodu byl vyhotoven neúplný faktorový plán, který je znázorněn v Tab. č. 6. Podle neúplného faktorového plánu bude zapotřebí vyrobit 16 vzorků z důvodu vyžadování replik. Tento plán obsahuje tři faktory na dvou úrovních jeden faktor na čtyřech úrovních.

Tab. č. 6. Částečný faktorový plán

Č. varianty	Spojovací materiál	Povrch	Doba výdrže	Teplota
1	Nové piliny	Hladký leštěný	5 min	1100 °C
2	Nové piliny	Drsný	10 min	1200 °C
3	Staré piliny	Hladký leštěný	5 min	1200 °C
4	Staré piliny	Drsný	10 min	1100 °C
5	Kovová vlna	Hladký leštěný	10 min	1100 °C
6	Kovová vlna	Drsný	5 min	1200 °C
7	Bez pilin i tavidla	Hladký leštěný	10 min	1200 °C
8	Bez pilin i tavidla	Drsný	5 min	1100 °C

9.2 Provedení experimentu č. 1

Experiment byl proveden podle Tab. č. 6. Pro dostatek vzorků pro pevnostní zkoušky je vyžadována dvojitá replikace vzorků z Tab. č. 6. Po provedení experimentu bylo získáno celkem 16 vzorků k pevnostním zkouškám.

Před začátkem experimentu bylo nutné zajistit ohřev pecí na požadovanou teplotu. Místa styčných ploch, připravených destiček, byla očištěna za pomoci acetonu. Na takto očištěné povrchy se pak rovnoměrně nanášela připravená směs, která se skládala z přídatného materiálu v podobě kovových pilin a tavidla – přetaveného boraxového prášku, podle Tab. č. 6. Hmotnost směsi nanášené na vzorek činila 9 g. Následovalo sestavení vzorku, kdy uhlíková ocel tvořila spodní díl a vrchní díl byla rychlořezná ocel. Takto sestavený vzorek se vložil do vyhřáté pece a setrval předepsaný počet minut v peci dle Tab. č. 5. Všechny kombinace pro vyhotovení kovářského spoje – úplný 4 faktorový plán. V peci přídatný materiál dosáhl vlivem tepla tvárného stavu. Předehřátý vzorek byl vyjmut z pece a pomocí lisu stlačen vlastní tíhou kovádky. Následně se skované vzorky vkládaly do druhé pece ohřáté na teplotu 500 °C, aby došlo k řízenému pomalému chladnutí bez vzniku trhlin vlivem vnitřního pnutí.

Na takto připravených vzorcích byla provedena zkouška krutem.

9.3 Zkouška krutem na vyhotovených vzorcích

Vzorky byly testovány na multifunkčním testovacím zařízení Inova. Nejprve se testovaly varianty vzorků 1 a 7. Ty byly nařezány z 40x 40 mm na vzorky o velikost 20 x 20 mm. Takto nařezané vzorky nebyly však vhodné k vyhodnocení pevnostní zkoušky v krutu. Ostatní vzorky byly vyrobeny s kruhový průřezem o průměru $d = 34$ mm.

Při zkoušce krutem se stanovuje pevnost v krutu a modul pružnosti ve smyku. Aby bylo možné doložit pevnost v krutu, je nutné určit průřezový modul v krutu W_k [mm³]. Pro vzorky kruhového průřezu s průměrem $d = 34$ mm platí dle rovnice (5).

$$W_k = 0,2 \times d^3 [\text{mm}^3] \quad (5)$$

$$W_k = 7860,8 \text{ mm}^3 \doteq 7861 \text{ mm}^3 \quad (6)$$

Pevnost v krutu R_{mk} [MPa] se stanoví podle rovnice (7):

$$R_{mk} = \frac{M_{kmax}}{W_k} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

Výsledky výpočtů jsou zaznamenány v níže uvedené Tab. č. 7. Většina pokusů byla bez úspěchu, protože nedošlo ke vzniku svarového spoje. Došlo tak k rozpadu vzorků už při jejich řezání na požadovaný profil nebo při jejich upínání do zkušebního stroje.

Tab. č. 7. Výsledky zkoušky krutem prvního experimentu

Č. varianty	Spojovací materiál	Povrch	Doba výdrže	Teplota [°C]	Maximální krouticí moment M_{kmax} [Nm]			Průřez	R_{mk} [MPa]
					1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek		
1	Nové piliny	Hladký leštěný	5 min	1100	Rozpad při řezání	Rozpad při řezání	Rozpad při řezání	čtvercový	-
2	Nové piliny	Drsný	10 min	1200	756	Utržení v čelistech – chyba	-	kruhový	98,2
3	Staré piliny	Hladký leštěný	5 min	1200	669	Rozpad při začátku testu	-	kruhový	86,9
4	Staré piliny	Drsný	10 min	1100	Rozpad při řezání	Rozpad při řezání	-	kruhový	-
5	Kovová vlna	Hladký leštěný	10 min	1100	Rozpad při upínání	Rozpad při upínání	-	kruhový	-
6	Kovová vlna	Drsný	5 min	1200	Rozpad při řezání	Rozpad při řezání	-	kruhový	-
7	Bez ničeho	Hladký leštěný	10 min	1200	255	48	139	čtvercový	138,6
8	Bez ničeho	Drsný	5 min	1100	Rozpad při řezání	Rozpad při řezání	-	kruhový	-

V tabulce je jednoznačně vidět, že je zde rozhodující vliv teploty, jelikož při teplotě 1100 °C nedošlo ke vzniku svarového spoje. Dále je zde patrné, že kovová vlna, jakožto přídatný materiál, se rovněž neosvědčila. Při provádění zkoušky krutem docházelo k dalším obtížím. Jednou z těchto obtíží je vznik deformace na měkké oceli už při jejím upínání do čelistí.

Došlo tak k vyvolání dodatečného napětí v místě svaru. Uspokojivý výsledek zde naplnily varianty vzorků 2 a 3. Při přepočtení těchto výsledků na spoj o ploše 40 x 40 mm, který odpovídá přibližně spojované ploše u obráběcího nože, by výsledná celková pevnost spoje odpovídala hodnotám 140-160 kN. Pro převedení na hmotnostní zatížení by 140-160 kN odpovídalo 14 až 16 tunám.

Na Obr. č. 16 je znázorněn vzorek číslo 2 po zkoušce krutem.



Obr. č. 16. Vzorek 2a po zkoušce krutem

Celkové vyhodnocení tohoto experimentu podle metody DOE nebylo možné provést z důvodu nedostatečného počtu úspěšných výsledků.

10 Návrh experimentu č. 2

Po předchozím neúspěšném experimentu se pokračovalo v návrhu druhé sady testů. Tento druhý návrh prošel několika úpravami v podobě zvýšení teploty ohřevu na 1200°C. Dále byl tento experiment více zaměřen na testování druhu a hrubosti použitých kovových pilin a na úpravu povrchu spojovaných materiálů. Příprava povrchů byla provedena stejně jako v experimentu č. 1. Jako tavidlo zde byl využit borax.

Použité piliny byly vyrobeny pomocí frézování, bez použití chladicí kapaliny. Hrubost pilin byla definována parametry frézování, které jsou uvedeny v Tab. č. 8. Bylo také provedeno měření frézovaných pilin, pro zjištění jejich průměrné délky u jemných a hrubých pilin. Toto měření je zaznamenáno v Tab. č. 9. Označení pilin (jemné a hrubé) bylo zvoleno na základě frézování stejnými reznými podmínkami.

Tab. č. 8. Použité parametry frézování pro získání pilin

Hrubost pilin	Hrubé	Jemné
Řezná rychlost v_c [mm/min]	200	150
Posuv na zub f_z [mm/z]	0,05	0,01
Radiální šířka řezu a_e [mm]	0,04	0,01

Tab. č. 9. Měření délek pilin

Hrubé		Jemné	
12 050	11 378	12 050	11 378
1,360	0,246	0,703	0,046
1,312	0,292	1,063	0,021
1,356	0,208	0,542	0,050
1,157	0,232	0,722	0,032
1,324	0,250	0,888	0,076
Průměrné hodnoty [mm]			
1,302	0,246	0,784	0,045

Z výsledků měření délek v Tab. č. 9 je patrné, že délky pilin se liší. Hrubé piliny z materiálu 12 050 mají průměrnou délku 1,302 mm. To je více než pětkrát delší než průměrná délka hrubých pilin z materiálu 11 378, která činí 0,246 mm. U jemných pilin byl pozorován podobný úkaz, kdy průměrná délka jemných pilin z materiálu 12 050 činí 0,784 mm, a to je více než sedmkrát delší než průměrná délka jemných pilin z materiálu 11 378 o délce 0,045 mm. Díky rozdílným použitým materiálům se hrubosti pilin liší.

Tab. č. 10. Návrh faktorů pro druhý experiment metodou DOE

Spojovací materiál	Povrch	Poměr tavidlo: piliny	Druh pilin – ocel dle ČSN	Hrubost pilin
nové piliny	hladký	1:2	12 050	jemné
				hrubé
			11 378	jemné
				hrubé
		1:1	12 050	jemné
				hrubé
			11 378	jemné
				hrubé
	drsňý	1:2	12 050	jemné
				hrubé
			11 378	jemné
		hrubé		
		2:1	12 050	jemné
				hrubé
11 378	jemné			
	hrubé			
1:1	12 050	jemné		
		hrubé		
11 378	jemné			

nové piliny	drsňý	1:1	11 378	hrubé	
		1:2	12 050	jemné	
			11 378	hrubé	
		2:1	12 050	jemné	
11 378	hrubé				
staré piliny	hladký	2:1	12 050	jemné	
			11 378	hrubé	
		1:1	12 050	jemné	
			11 378	hrubé	
		1:2	12 050	jemné	
			11 378	hrubé	
		drsňý	2:1	12 050	jemné
				11 378	hrubé
	1:1		12 050	jemné	
			11 378	hrubé	
	1:2		12 050	jemné	
			11 378	hrubé	

V Tab. č. 10 jsou navrženy možné varianty kombinací faktorů. Dále je třeba provést replikaci vzorků, kterou je třeba do tabulky také zahrnout. Spolupracující paní Ing. Věrou Markovou, matematickou z RTI ZČU, byla navržena Tab. č. 11, kde jsou zahrnuty veškeré kombinace i s jejich replikací a obnáší to celkem 72 experimentů.

Tab. č. 11. Návrh experimentu – úplný faktorový pokus při 2 replikacích

Označení vzorku	4 2 - level factors, 1 3 - level factors, 36 runs, 3/4 fraction ([No active dataset]) + 1 replications					
	Replikace	Spojovací materiál	Povrch	Druh pilin	Hrubost pilin	Poměr tavidlo: piliny
1	1	nové piliny	hladký	12 050	jemné	2:1
2	1	nové piliny	hladký	12 050	jemné	1:1
3	1	nové piliny	hladký	12 050	jemné	1:2
4	1	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	2:1
5	1	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:1
6	1	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:2
7	1	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	2:1
8	1	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	1:1
9	1	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	1:2
10	1	nové piliny	drsny	12 050	jemné	2:1
11	1	nové piliny	drsny	12 050	jemné	1:1
12	1	nové piliny	drsny	12 050	jemné	1:2
13	1	nové piliny	drsny	11 378	jemné	2:1
14	1	nové piliny	drsny	11 378	jemné	1:1
15	1	nové piliny	drsny	11 378	jemné	1:2
16	1	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	2:1
17	1	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	1:1
18	1	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	1:2
19	1	staré piliny	hladký	12 050	jemné	2:1
20	1	staré piliny	hladký	12 050	jemné	1:1
21	1	staré piliny	hladký	12 050	jemné	1:2
22	1	staré piliny	hladký	11 378	jemné	2:1
23	1	staré piliny	hladký	11 378	jemné	1:1
24	1	staré piliny	hladký	11 378	jemné	1:2
25	1	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	2:1
26	1	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	1:1
27	1	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	1:2
28	1	staré piliny	drsny	12 050	jemné	2:1
29	1	staré piliny	drsny	12 050	jemné	1:1

30	1	staré piliny	drsny	12 050	jemné	1:2
31	1	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	2:1
32	1	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	1:1
33	1	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	1:2
34	1	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	2:1
35	1	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	1:1
36	1	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	1:2
37	2	nové piliny	hladký	12 050	jemné	2:1
38	2	nové piliny	hladký	12 050	jemné	1:1
39	2	nové piliny	hladký	12 050	jemné	1:2
40	2	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	2:1
41	2	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:1
42	2	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:2
43	2	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	2:1
44	2	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	1:1
45	2	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	1:2
46	2	nové piliny	drsny	12 050	jemné	2:1
47	2	nové piliny	drsny	12 050	jemné	1:1
48	2	nové piliny	drsny	12 050	jemné	1:2
49	2	nové piliny	drsny	11 378	jemné	2:1
50	2	nové piliny	drsny	11 378	jemné	1:1
51	2	nové piliny	drsny	11 378	jemné	1:2
52	2	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	2:1
53	2	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	1:1
54	2	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	1:2
55	2	staré piliny	hladký	12 050	jemné	2:1
56	2	staré piliny	hladký	12 050	jemné	1:1
57	2	staré piliny	hladký	12 050	jemné	1:2
58	2	staré piliny	hladký	11 378	jemné	2:1
59	2	staré piliny	hladký	11 378	jemné	1:1
60	2	staré piliny	hladký	11 378	jemné	1:2
61	2	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	2:1
62	2	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	1:1
63	2	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	1:2
64	2	staré piliny	drsny	12 050	jemné	2:1
65	2	staré piliny	drsny	12 050	jemné	1:1
66	2	staré piliny	drsny	12 050	jemné	1:2

67	2	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	2:1
68	2	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	1:1
69	2	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	1:2
70	2	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	2:1
71	2	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	1:1
72	2	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	1:2

Provedení 72 experimentů by bylo materiálově, energeticky i časově náročné. Proto je třeba optimálního designu, který je opět vytvořen za pomoci matematicky. Optimálním designem snížíme počet vzorků na celkový počet 40. Snížení počtu vzorků je provedeno na základě vnitřní podobnosti vzorků. V níže uvedené Tab. č. 12 je vyhotoven optimální design i s replikací vzorků. Číslování vybraných kombinací je zachováno z původní Tab. č. 11 kvůli přehlednosti a jednotnosti tabulek.

Tab. č. 12. Optimální design při dvou replikacích

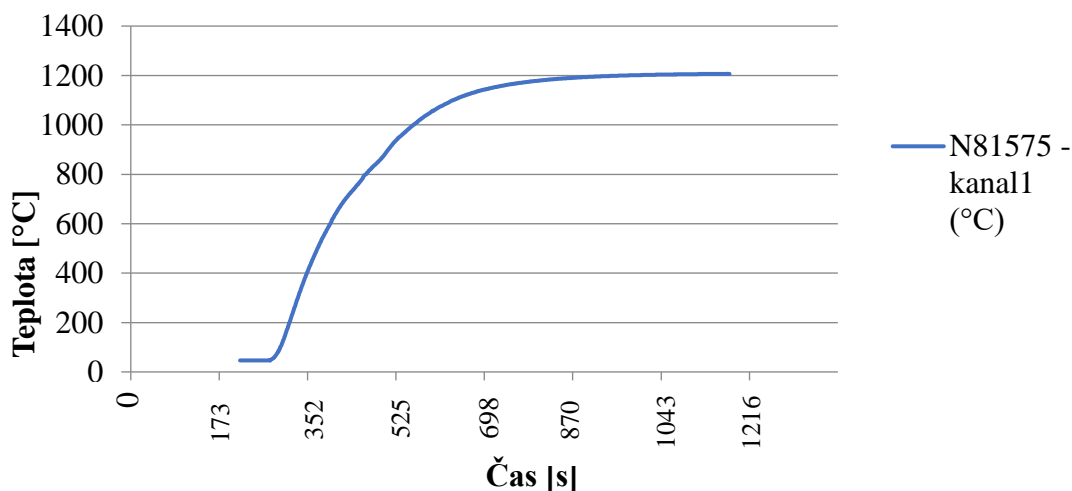
Označení vzorku	Selected Runs (D-optimal design) (4 2 - level factors, 1 3 - level factors, 48 runs, full factorial ([No active dataset]) in Workbook2); 5 factors; 20 runs; D-optimal Model incl.: linear effects/interacts					
	Replikace	Spojovací materiál	Povrch	Druh pilin	Hrúbost pilin	Poměr tavidlo: piliny
2	1	nové piliny	hladký	12 050	jemné	1:1
5	1	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:1
8	1	nové piliny	hladký	11 378	jemné	1:1
11	1	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	1:1
36	1	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	1:2
27	1	staré piliny	hladký	12 050	jemné	1:2
31	1	staré piliny	hladký	11 378	jemné	2:1
28	1	staré piliny	hladký	12 050	hrubé	2:1
45	1	staré piliny	drsny	11 378	jemné	1:2
42	1	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	1:2
37	1	staré piliny	drsny	12 050	jemné	2:1
46	1	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	2:1
24	1	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	1:2
16	1	nové piliny	drsny	12 050	hrubé	2:1
19	1	nové piliny	drsny	11 378	jemné	2:1
15	1	nové piliny	drsny	12 050	jemné	1:2
1	1	nové piliny	hladký	12 050	jemné	2:1
10	1	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	2:1
6	1	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:2
9	1	nové piliny	hladký	11 378	jemné	1:2
2	2	nové piliny	hladký	12 050	jemné	1:1

5	2	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:1
8	2	nové piliny	hladký	11 378	jemné	1:1
11	2	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	1:1
36	2	staré piliny	hladký	11 378	hrubé	1:2
27	2	staré piliny	hladký	12 050	jemné	1:2
31	2	staré piliny	hladký	11 378	jemné	2:1
28	2	staré piliny	hladký	12 050	hrubé	2:1
45	2	staré piliny	drsny	11 378	jemné	1:2
42	2	staré piliny	drsny	12 050	hrubé	1:2
37	2	staré piliny	drsny	12 050	jemné	2:1
46	2	staré piliny	drsny	11 378	hrubé	2:1
24	2	nové piliny	drsny	11 378	hrubé	1:2
16	2	nové piliny	drsny	12 050	hrubé	2:1
19	2	nové piliny	drsny	11 378	jemné	2:1
15	2	nové piliny	drsny	12 050	jemné	1:2
1	2	nové piliny	hladký	12 050	jemné	2:1
10	2	nové piliny	hladký	11 378	hrubé	2:1
6	2	nové piliny	hladký	12 050	hrubé	1:2
9	2	nové piliny	hladký	11 378	jemné	1:2

10.1 Provedení experimentu č. 2

Prvním krokem před provedením experimentu bylo zjistit dobu ohřevu vzorků. Doba ohřevu vzorků je důležitá pro provedení kvalitního spoje. Kdyby nebylo dosaženo potřebné teploty mezi spojovanými materiály, pak by bylo nejspíše kovářské svařování neúspěšné. Zjišťování bylo provedeno za pomoci termočlánku OM-CP-OCTTEMP 2000 - typ K do pece PKE 18/12 R předehřáté na 1200 °C. Tento záznam je zachycen na Obr. č. 17.

Kovářský spoj- průběh ohřevu na 1200 °C



Obr. č. 17. Průběh teploty v místě budoucího svaru na rozhraní mezi oběma materiály při vložení do pece o teplotě 1200 °C

Z Obr. č. 17 bylo stanoveno, že ohřev termočlánku trval 13 minut a doba výdrže 2 minuty. Celkem se jedná o 15 minut výdrže, která bude aplikována na připravené soustavy vzorků.

První fáze experimentu sloužila k přípravě tavidla, ocelových pilin a destiček pro spoj. K přípravě tavidla je třeba tetraboritan sodný v prášku, licí lžice z vysokolegované chromové oceli. Pro použití je třeba tavidlo přetavit v peci s cílem odstranit z něho vlhkost. Nejprve bylo nutné přehřát pec PKE 18/12 R na teplotu 1200 °C, aby došlo k přetavení prášku. Do licí lžice se vložily 3 – 4 polévkové lžice boraxového prášku viz Obr. č. 18.



Obr. č. 18. Příprava boraxového prášku do licí lžice

Když teplota pece PKE 18/12 R dosáhla 1000 °C, byla dovnitř vložena licí lžice s připraveným práškem. Boraxový prášek se již při této teplotě taví a stačilo nastavení nižší teploty pece. K přetavení boraxového prášku stačilo vložít licí lžici do pece na 5 minut. Přetavený borax se odléval na ocelovou podložku, jako je znázorněno na Obr. č. 19. Takto se odlily 4 várky přetaveného boraxu.



Obr. č. 19. Odlitý přetavený borax na ocelové podložce

Následně bylo nutné počkat, než odlitý borax na ocelové podložce vychladne. Po jeho vychladnutí se borax přendal do nerezové misky, v které se pak nadrtil za pomoci lisu. Drcení boraxu se provádělo do té doby, než vznikl jemný boraxový prášek, který lze z části vidět na Obr. č. 20.



Obr. č. 20. Průběh drcení přetaveného boraxu na jemný prášek

Potom se nadrcený prášek přesil za pomoci síta do uzavíratelné nádoby pro zamezení přístupu vzdušné vlhkosti, kde byl uložen do dalšího dne viz Obr. č. 21. Vzhled nadrceného a přesetého prášku je vyobrazen na Obr. č. 22.



Obr. č. 21. Přesívání boraxového nadrceného prášku



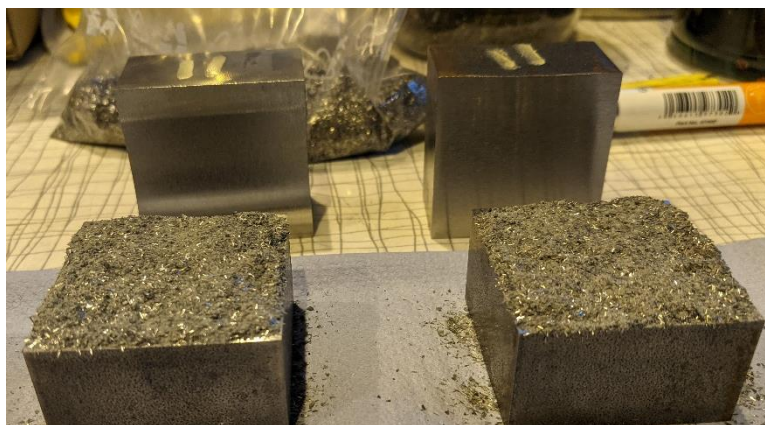
Obr. č. 22. Vzhled nadrceného prosetého boraxového prášku

Destičky potřebné pro sestavení vzorků byly vyhotoveny za pomoci frézování a broušení. Povrch těchto destiček odpovídal požadavkům z Tab. č. 12. Na Obr. č. 23 vyobrazeny připravené destičky pro vytvoření vzorku. Materiál v pravo je ČSN 11 523, ale označení na fotodokumentaci odpovídá označení pod jakým byl materiál nakoupen.



Obr. č. 23. Připravené destičky z materiálu ČSN 19 830 a ČSN 11 523

Cílem druhé fáze experimentu bylo vytvořit kovářské spoje podle požadavků z Tab. č. 12. Nejprve se na začátku dne předehřála pec PKE 18/12 R na teplotu 1200°C. Důležité bylo předem si připravit lis Žďas CKW6000 pro stlačování předehřátých vzorků. Hydraulický lis má lisovací sílu 100 tun. Lis byl nastavený na režim R a jeho lisovací rychlost byla rovna 1 m/s. Dolní úvrať lisu byla nastavena na 41 mm. Počítalo se základní výškou 47 mm beranu při dosednutí na vzorek, který je bez nanesené vrstvy tavidla. Úběr lisu byl tedy nastavený na 6 mm a tavidlo se do tohoto úběru nezapočetlo. Následně se pokračovalo v případě spojovací směsi podle Tab. č. 12. Destičky byly brány z krabiček dle předpisu v Tab. č. 12, podle požadované úpravy spojovaného povrchu. Plochy destiček v místě spoje se důkladně očistily acetonem. Vzorky, o rozměru 40x40 mm, se sestavovaly následujícím způsobem. Měkčí materiál, tedy ocel ČSN 11 523 tvoří dolní část vzorku. Na ocel ČSN 11 523 byla vložena jedna kávová lžička připravené směsi boraxu a pilin, namíchané podle požadovaného poměru dle Tab. č. 11. Takto připravené dolní části vzorku jsou zobrazeny na Obr. č. 24.



Obr. č. 24. Vložení připravené směsi na očištěný plochy destiček z ČSN 11 523

Destička z materiálu 19 830 se následně přiložila na směs boraxu a kovových pilin o celkové hmotnosti 9 gramů, která byla položena na měkčím materiálu. Takto připravené vzorky byly značeny číslem dle Tab. č. 12, aby nedošlo k nechtěné záměně vzorku za jiný a především kvůli orientaci mezi vzorky. Tato sestava je zobrazena na Obr. č. 25.



Obr. č. 25. Připravený vzorek číslo 11

Dalším krokem k přípravě finálního vzorku, který bude dále využit pro pevnostní zkoušky, bylo vložení do pece PKE 18/12 R, která byla předehřátá na 1200 °C. Doba trvání ohřevu vzorku je 13 minut, kterou jsme určili z Obr. č. 17 pomocí termočlánku. Po 13 minutách byl borax plně roztaven. To zabránilo oxidaci kovových pilin, které byly natavené a rovněž oxidaci kontaktních ploch. Vzorek byl vyjmut z pece a ihned přesunut do lisu. Toto lze vidět na Obr. č. 26 a Obr. č. 27.



Obr. č. 26. Kovářské svařování



Obr. č. 27. Kovářské svařování

Následně kovářsky svařené vzorky putovaly do druhé pece Nabertherm, předehřáté na 500 °C, kde kontrolovaně chladly přibližně 2 hodiny na teplotu 500 °C. Po dosažení teploty 500 °C vzorky chladly na vzduchu. Kontrolované chladnutí je nutné z důvodů, že rychlořezné oceli jsou snadno zakalitelné na vzduchu a tomuto jsme se chtěli vyhnout. Jejich rychlým ochlazením se do materiálu vnáší velké zbytkové pnutí a může dojít až k praskání.

10.2 Stříhová zkouška na vyhotovených vzorcích

Pro posouzení kvality spoje byla využita výsledná pevnost ve stříhu. Byla tedy provedena zkouška pevnosti ve stříhu na multifunkčním testovacím zařízení Inova. Zde bylo nutné využít speciálního upínacího zařízení pro zkoušku, aby nedocházelo k deformaci oceli ČSN 11 523 od uchycení do zkušebního stroje. K deformaci docházelo vlivem měkkosti oceli a působení upínací síly od upínek. Každý zkoušený vzorek, byl rozřezán na 4 díly tak, aby vznikly 4 vzorky, jejichž členění je uvedeno v Tab. č. 13.

Výsledky ze zkoušky stříhem jsou zaznamenány v Tab. č. 13. Zde jsou zkoušené vzorky určeny optimální metodou DOE, které jsou umístěny v Tab. č. 12.

Tab. č. 13. Výsledky stříhové zkoušky druhého experimentu

Číslo vzorku	Spojovací materiál	Povrch	Druh pilin	Hrubost pilin	tav:pil	Pevnost ve stříhu [kN]	Sm. Odch.	Vzorky			
								0	1	2	3
2	Nové piliny	Hladký	12 050	Jemné	1:1	18,325	4,352	24,46	14,19	17,12	17,53
5	Nové piliny	Hladký	12 050	Hrubé	1:1	25,773	2,965	26,19	28,61	21,61	26,68
8	Nové piliny	Hladký	11 378	Jemné	1:1	18,875	1,731	11,30	12,72	12,16	15,32
11	Nové piliny	Hladký	11 378	Hrubé	1:1	23,495	7,675	25,20	13,73	32,32	22,73
36	Staré piliny	Hladký	11 378	Hrubé	1:2	26,953	3,617	24,98	28,87	30,96	23,00
27	Staré piliny	Hladký	12 050	Jemné	1:2	15,935	2,330	13,65	17,61	14,23	18,25
31	Staré piliny	Hladký	11 378	Jemné	2:1	19,128	2,998	22,91	20,06	17,35	16,19
28	Staré piliny	Hladký	12 050	Hrubé	2:1	27,043	2,207	26,00	30,23	26,70	25,24
45	Staré piliny	Drsný	11 378	Jemné	1:2	26,325	2,743	24,14	30,11	24,48	26,57
42	Staré piliny	Drsný	12 050	Hrubé	1:2	21,210	7,005	17,66	15,15	31,10	20,93
37	Staré piliny	Drsný	12 050	Jemné	2:1	15,148	5,822	23,85	12,46	12,71	11,57
46	Staré piliny	Drsný	11 378	Hrubé	2:1	30,995	9,026	35,42	37,63	33,20	17,73
24	Nové piliny	Drsný	11 378	Hrubé	1:2	29,158	2,582	25,67	29,14	29,99	31,83
16	Nové piliny	Drsný	12 050	Hrubé	2:1	16,980	3,828	22,46	15,78	13,55	16,13
19	Nové piliny	Drsný	11 378	Jemné	2:1	13,125	4,220	8,44	11,84	13,66	18,56
15	Nové piliny	Drsný	12 050	Jemné	1:2	2,200	3,111	4,40	0,00		
1	Nové piliny	Hladký	12 050	Jemné	2:1	20,370	1,782	19,50	18,80	22,88	20,30
10	Nové piliny	Hladký	11 378	Hrubé	2:1	29,025	4,176	26,20	27,09	35,23	27,58
6	Nové piliny	Hladký	12 050	Hrubé	1:2	19,033	3,991	22,68	18,81	21,10	13,54
9	Nové piliny	Hladký	11 378	Jemné	1:2	17,868	2,114	17,74	15,51	20,65	17,57

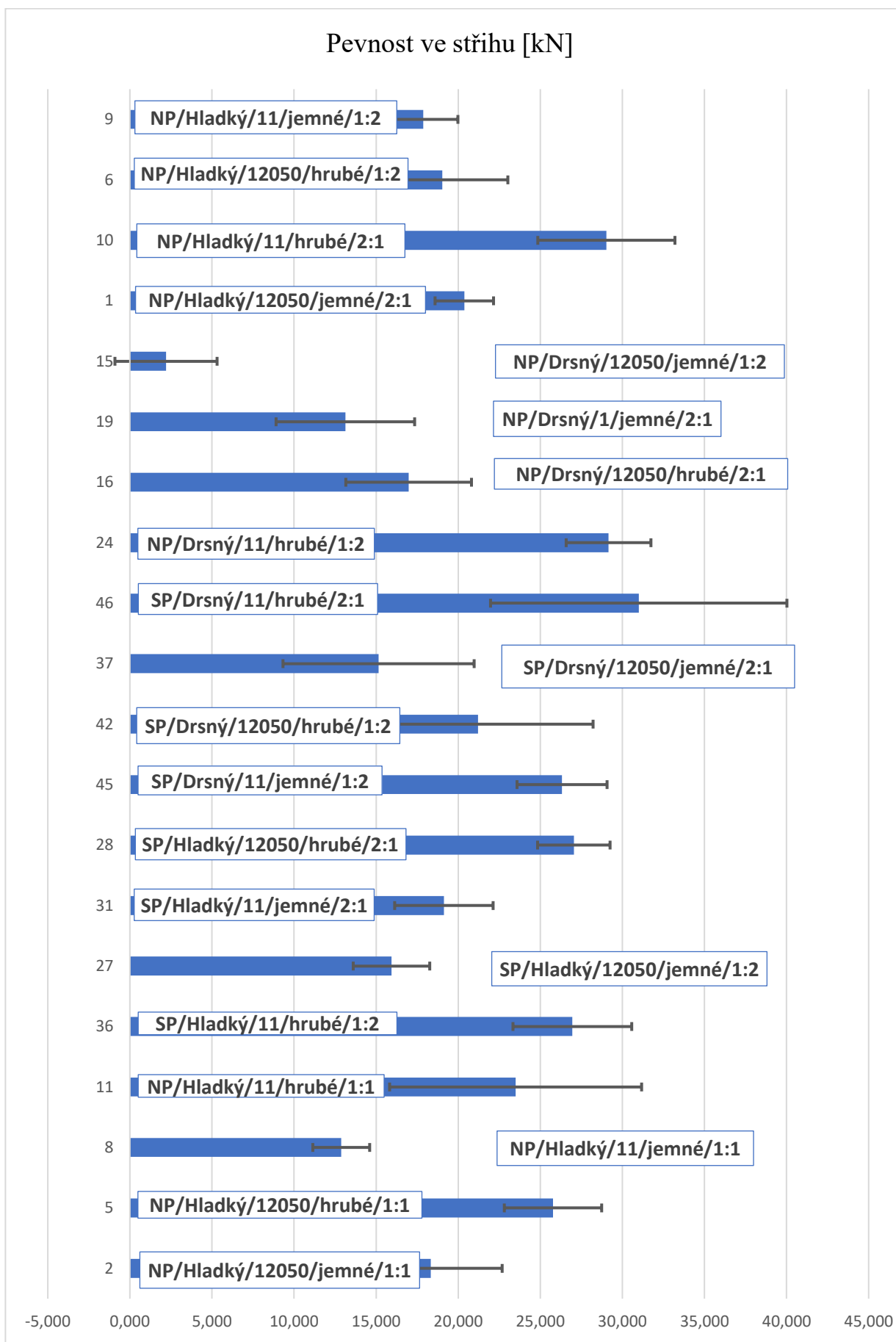
Na Obr. č. 28 je vidět vzorek, který je uchycen do zkušebního stroje pro pevnostní zkoušku stříhem.



Obr. č. 28. Vzorek č. 1 uchycený do zkušebního stroje při stříhové zkoušce

Z Tab. č. 13 je patrné, že u vzorku číslo 15 bylo měření neprůkazné. Neprůkazné měření mohlo být způsobené náhodnou nehomogenitou spoje, jelikož ostatní svarové spoje byly testovány bezchybně. U dvou z těchto vzorků došlo, ještě před vyhotovení pevnostní zkoušky, k rozpadu. Pevnost ve stříhu vzorků s vyznačenou směrodatnou odchylkou je vyobrazena v Obr. č. 29.

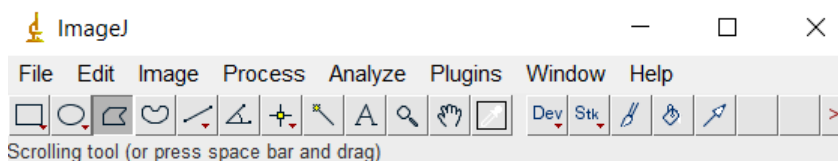
Vzorek s nejvyšší pevností ve stříhu byl označen číslem 24. V Obr. č. 29 nebo z Tab. č. 13 je možné vidět, že všechny zkoušené vzorky (0 až 3), které byly označeny číslem 24, měly pevnost ve stříhu kolem hodnoty 29 kN. Zde byl minimální rozptyl hodnot pevnosti ve stříhu, a proto je směrodatná odchylka vzorku č. 24 nejmenší. Z uvedených důvodů lze považovat vzorek č. 24 za nejlepší.



Obr. č. 29. Pevnost ve stříhu jednotlivých vzorků zaznamenaná do grafu

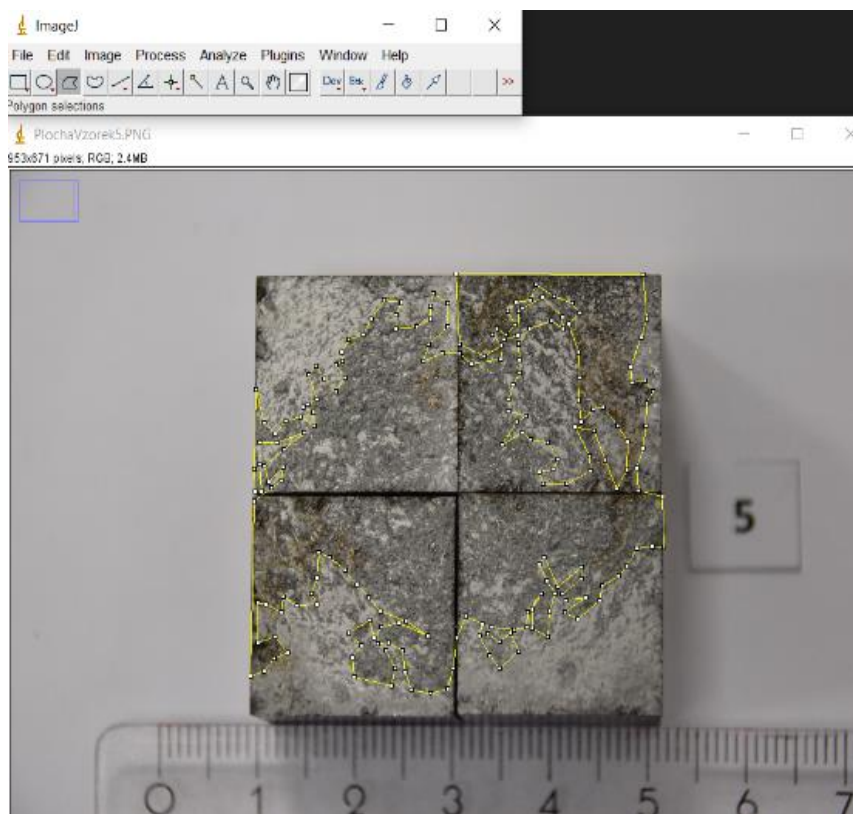
10.2.1 Vyhodnocení svařované plochy vzorků

Na plochách vzorků lze pozorovat barevně odlišné oblasti. Všechny vzorky z pevnostní zkoušky, z experimentu číslo 2, byly vyfoceny pomocí fotoaparátu. Pro analýzu velikosti barevně odlišných oblastí byl využit program ImageJ, který je znázorněn na Obr. č. 30.



Obr. č. 30. Hlavní menu programu ImageJ

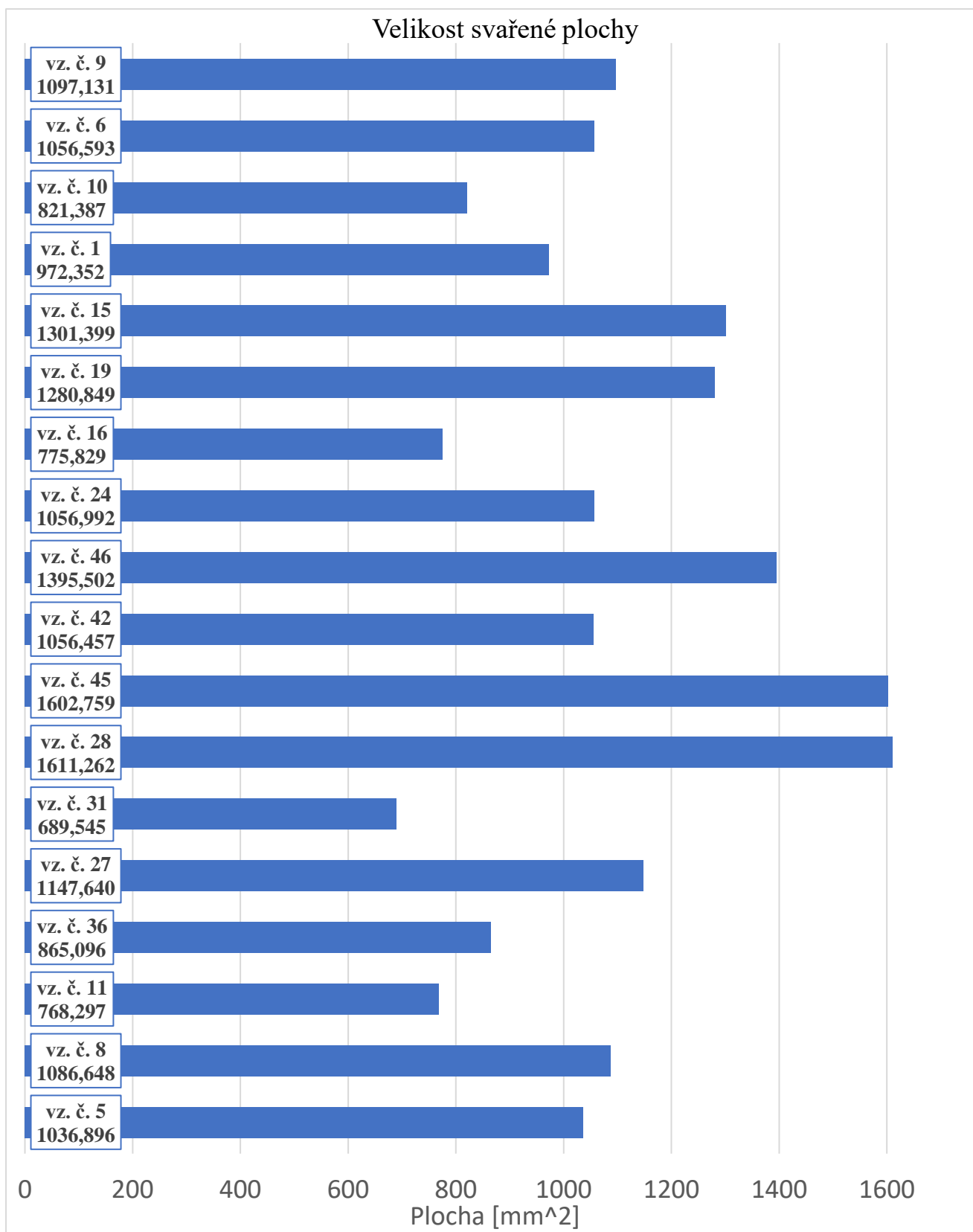
Prvním krokem pro provedení měření je vložení nafocených fotografií vzorků do programu pro obrazovou analýzu ImageJ. Tyto vzorky mají viditelnou plochu vzniklého svaru, který byl porušen při zkoušce stříhem. Plocha se označí za pomoci polygon nástroje, který je zdokumentovaný na Obr. č. 31. Tento obrázek současně vyobrazuje vyznačenou barevně odlišnou oblast, jako v případě vzorku číslo 5.



Obr. č. 31. Vyznačení svarové plochy – vzorek č. 5

Po vyznačení a ohraničení barevně odlišné oblasti je provedeno její měření. Měření je provedeno prostřednictvím Analyze → Measure, viz Obr. č. 30.

Výsledné hodnoty z tohoto měření byly shrnuty prostřednictvím Obr. č. 32 tak, aby byla jednoznačně vidět velikost barevně odlišné oblasti. Jednotlivé vzorky jsou označeny zkratkou „vz. č. x“, kde x symbolizuje jejich číselné označení.



Obr. č. 32. Shrnutí výsledků měření velikosti barevně odlišné plochy

Pro vyhodnocení vlivu opticky odlišných oblastí na pevnost vzorků bylo vybráno šest nejlepších vzorků a jeden nejhorší, ke kterým byla přiřazena jejich naměřená velikost plochy barevně odlišných oblastí. Vzorek číslo 15 se zde považuje za zmetkový, jelikož jeho výsledky jsou výrazně odlišné od ostatních. Naměřené hodnoty jsou shrnuty v Tab. č. 14.

Tab. č. 14. Shrnutí výsledků měření plochy a pevnosti ve stříhu

Vzorek	Pevnost ve stříhu [kN]	Plocha [mm ²]	Piliny	Stáří	Hrubost pilin	Poměr	Povrch
46	30,9950	1395,502	11 378	Staré	Hrubé	2:1	Drsný
24	29,1575	1056,992	11 378	Nové	Hrubé	1:2	Drsný
10	29,0250	821,387	11 378	Nové	Hrubé	2:1	Hladký
28	27,0425	1611,262	12 050	Staré	Hrubé	2:1	Hladký
36	26,9525	865,096	11 378	Staré	Hrubé	1:2	Hladký
45	26,3250	1602,759	11 378	Staré	Jemné	1:2	Drsný
19	13,1250	1280,849	11 378	Nové	Jemné	2:1	Drsný

Při pohledu do Tab. č. 14 je patrné, že vliv barevně odlišných oblastí na pevnost svaru nemá pozorovatelný význam. Pro ukázkou je zde vybrán výčet pár vzorků. Aby zde byla jistá závislost, předpokladem by byla podobnost velikosti plochy mezi těmito vzorky, které si ve zkoušce pevnosti vedly nejlépe. Při pohlednutí do Tab. č. 14 je vidět četnější zastoupení vzorků, které vznikly za použití starých, hrubých pilin z materiálu 11 378. Pro potvrzení výsledků je využit i neúspěšný vzorek číslo 19, který neměl významnou pevnost ve stříhu, avšak jeho velikost barevně odlišné oblasti dosahuje téměř velikosti plochy nejlepšího vzorku číslo 46. Tento jev je důkazem toho, že opticky odlišné oblasti nejsou svarovou plochou.

10.3 Mikroskopická analýza a měření tvrdosti

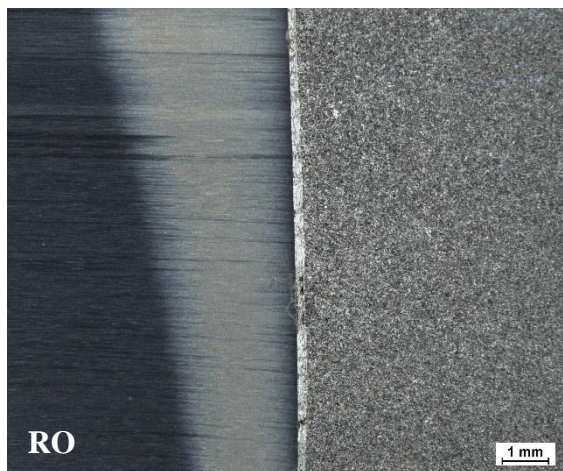
Pro studium mikrostruktury kovářského svaru a měření tvrdosti bylo vybráno 6 vzorků (viz Obr. č. 33). Výběr byl proveden tak, aby byly zahrnuty různé parametry vzorků, zejména čtyři vzorky (vzorek č. 8, vzorek č. 11, vzorek č. 5 a vzorek č. 2), které byly vyhodnoceny jako důležité i pro metodu DOE analýzy. Zbylé dva vzorky byly zvoleny tak, aby byli pokryti další dva zástupci různých poměrů tavidla:pilinám a zároveň jeden z nich je nejlepším vzorkem stříhové zkoušky a druhý je jeden z nejhorsích.

Vzorky z experimentu č. 2 byly rozřezány na 20x20 mm a broušeny na zařízení SAPHIR 330 s použitím brusných papírů o drsnostech 80, 280, 400, 600, 1000 a 1500. Následně byly vzorky leštěny brusnou pastou na leštícím kotouči MD Flock za podlévání lihem. Pro naleptání mikrostruktury vzorku byl použit 5 % nital (5% roztok HNO₃ v ethanolu). Mikrostruktura byla fotografována na světelném mikroskopu Nikon EPIPHOT 300 a lupě Nikon SMZ 800.

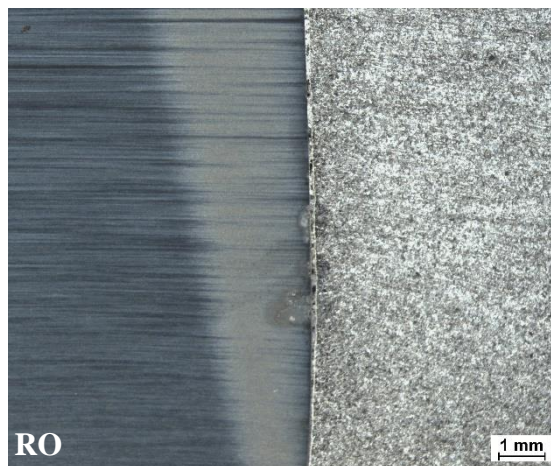


Obr. č. 33. Zkoumané vzorky mikroskopickou analýzou

Na Obr. č. 34 a Obr. č. 35 jsou fotografie maker nejlepšího vzorku, a to vzorku č. 24 a nejhoršího vzorku č. 19. Kovářský svar u vzorku č. 24 vypadá kompaktněji než u vzorku č. 19 a má podstatně méně černých míst. Výrazná šedá linie na straně rychlořezné oceli byla zřejmě způsobena vzlínáním nitalu skrz póry v místě svaru.

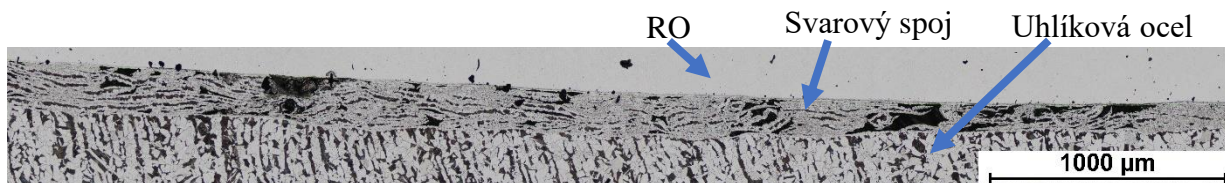


Obr. č. 34. Makro vzorku č. 24

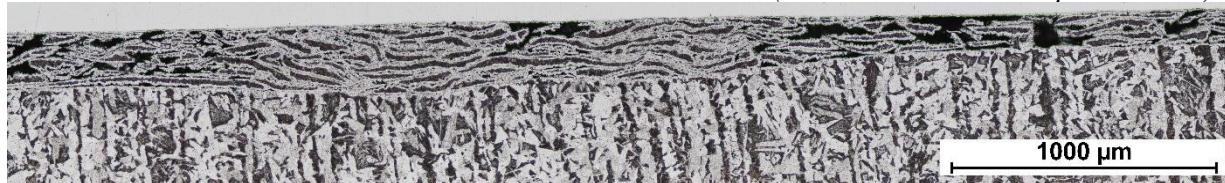


Obr. č. 35. Makro vzorku č. 19

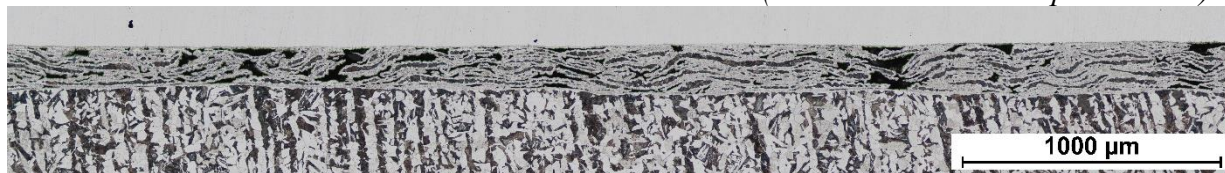
Mikrostruktura kovářských svarů, pro podrobnější prozkoumání svarových spojů na zkoumaných vzorcích je znázorněna na Obr. č. 36 až Obr. č. 41. Na fotkách focených při zvětšení 100x je naleptán pouze materiál 11 523, který se leptá mnohem rychleji než rychlořezná ocel. Fotografie vzorků byly seřazeny posloupně od nejlepšího po nejhorší. U vzorků, kde byly využity hrubé piliny, je četnost děr v místě kovářského svaru menší a dochází k lepšímu propojení mezi pilinami a uhlíkovou ocelí. Na rozdíl od jemných pilin, kde došlo spíše k jejich zkroucení a nerovnoměrnému rozložení. U jemných pilin je možné pozorovat vyšší četnost děr. Jejich vznik byl nejspíše zapříčiněn boraxem, který se pak odplavil. Označení mikrostruktury na Obr. č. 36 platí i pro Obr. č. 37 až Obr. č. 41.



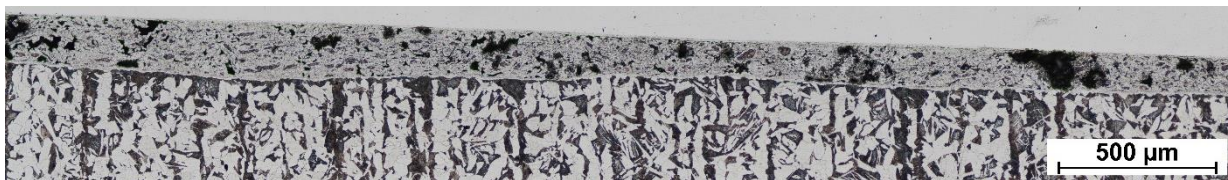
Obr. č. 36. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 24 (NP/DR/11/H/tavidlo:pilinám 1:2)



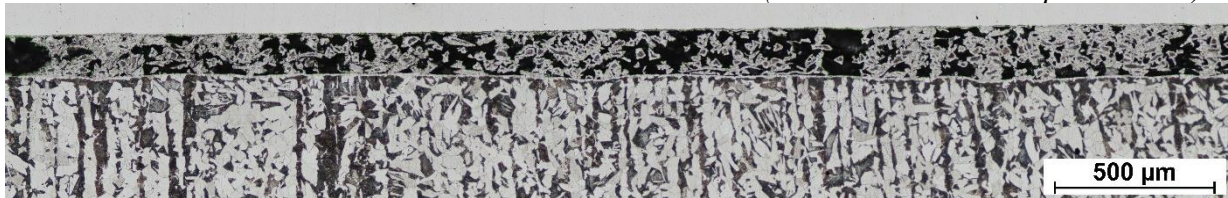
Obr. č. 37. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 5 (NP/HL/12/H/ tavidlo:pilinám 1:1)



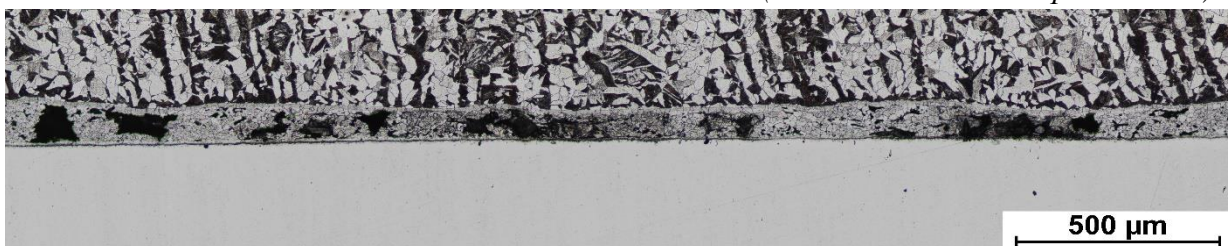
Obr. č. 38. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 11 (NP/HL/11/H/ tavidlo:pilinám 1:1)



Obr. č. 39. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 2 (NP/HL/12/J/ tavidlo:pilinám 1:1)

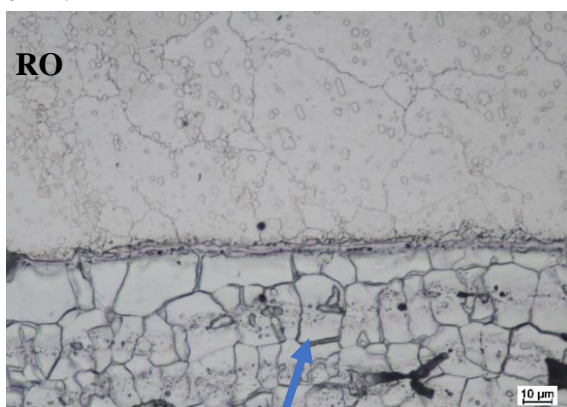


Obr. č. 40. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 8 (NP/HL/12/H/ tavidlo:pilinám 1:1)

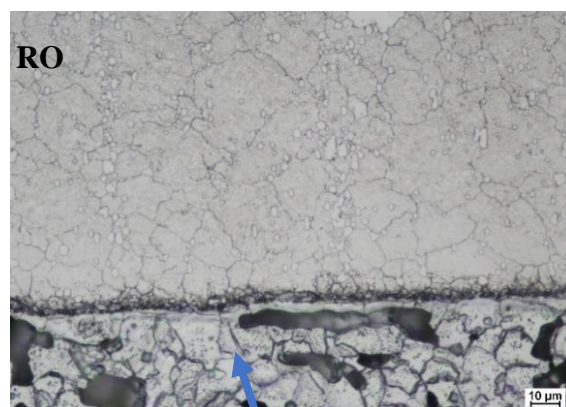


Obr. č. 41. Mikrostruktura kovářského svaru vzorku č. 19 (NP/DR/11/J/ tavidlo:pilinám 2:1)

Pro vyhodnocení propojení materiálů byly pořízeny fotky mikrostruktury, které je možné vidět na Obr. č. 42 až Obr. č. 45. Na těchto snímcích je vidět, že nedošlo k úplnému propojení rychlořezné oceli s materiálem svaru. Vznikla zde přechodová vrstva, ve které pravděpodobně nedošlo k úplnému difuznímu propojení materiálů. To mohlo být zapříčiněno nízkou teplotou předehřevu vzorků v peci. V mikrostruktuře rychlořezných ocelí na uvedených fotografiích dochází k rozpadu základní struktury a tento materiál je v žíhaném stavu a připravený pro další tepelné zpracování. V případě výroby finálních produktů s kovářskými svary by k tepelnému zpracování bylo přikročeno bezprostředně po vytvoření kovářského svaru, tedy bez vychlazení systému na pokojovou teplotu. Při tvorbě testovacích kovářských svarů byla celá sestava po vytvoření svaru pomalu ochlazená na vzduchu, aby bylo patrné, že v bezprostředním okolí svaru nedochází k degradaci mikrostruktury rychlořezné oceli a ta může být kalena pro získání požadovaných funkčních vlastností. Dále je patrné, že jako nejlepší možnost se jeví využít pro vyhotovení kovářského svaru poměr tavidla a pilin 1:2 za využití nových hrubých pilin z materiálu 11 378, což koresponduje s výsledky stříhových zkoušek. Na Obr. č. 46 a Obr. č. 47 je možné vidět difuzní propojení svaru s uhlíkovou ocelí, ke kterému došlo u všech zkoumaných vzorků.

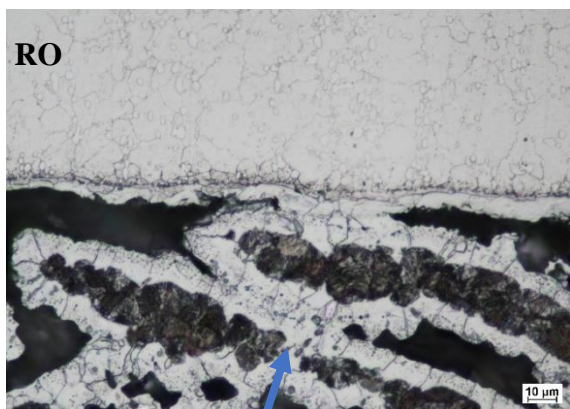


Svarový spoj



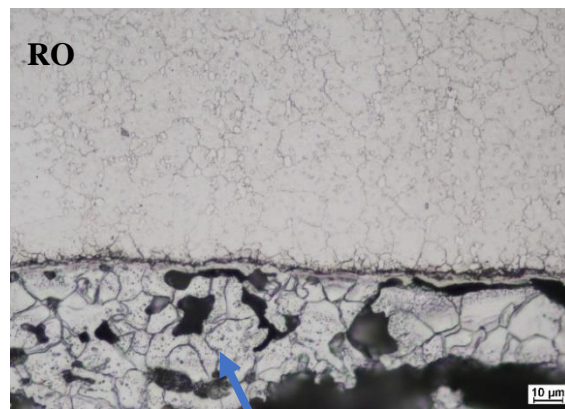
Svarový spoj

Obr. č. 42. Mikrostruktura svaru vzorku č. 24 Obr. č. 43. Mikrostruktura svaru vzorku č. 19



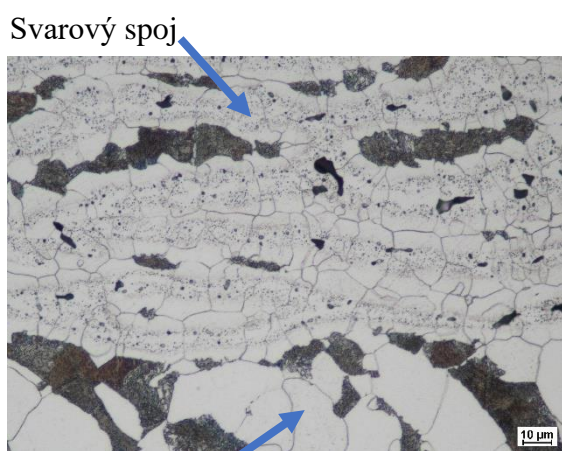
Svarový spoj

Obr. č. 44. Mikrostruktura svaru vzorku č. 5



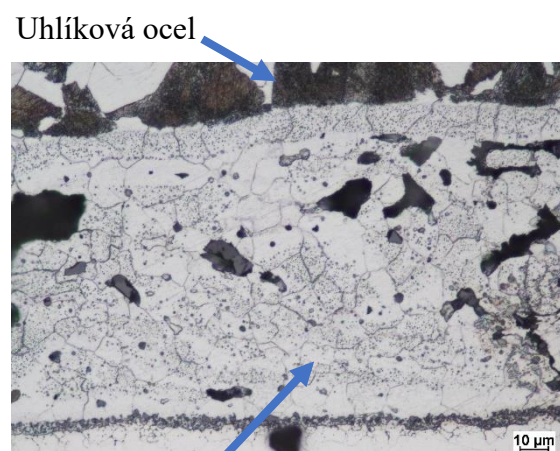
Svarový spoj

Obr. č. 45. Mikrostruktura svaru vzorku č. 8



Uhlíková ocel

Obr. č. 46. Difuzní spoj u vzorku č. 24



Svarový spoj

Obr. č. 47. Difuzní spoj u vzorku č. 19

Z rychlořezné oceli se vyrábí břitová destička obráběcího nože. Tuto část lze nazvat jako pracovní a vyžadují se od ní dobré mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu byla v rychlořezné oceli měřena tvrdost. Tvrdost byla měřena pomocí Rockwella (HRC), kdy diamantový kužel vniká do zkoušeného tělesa s celkovým zatížením 1471 N [35]. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6508-1 na zkušebním zařízení ZZ53-015 Amsler-Testor HT2003, kde byla využita tvrdoměrná destička PE53-025 a měření bylo provedeno za teploty 22 °C. Toto měření bylo provedeno externě ve firmě VZÚ Plzeň na oddělení mechanické zkušebny. Naměřené hodnoty tvrdostí rychlořezné oceli u zkoumaných vzorků jsou zaznamenány v níže uvedené Tab. č. 15.

Tab. č. 15. Výsledky měření tvrdostí RO na zkoumaných vzorcích

Číslo vzorku	Průměrná hodnota HRC	HRC		
		1.	2.	3.
24	56,3	54,6	56,9	57,4
5	44,8	42,6	46,9	44,9
11	49,7	49,8	50,7	48,6
2	55,3	56,4	53,0	56,6
8	52,1	52,3	51,3	52,6
19	48,0	48,1	49,7	46,1

Tvrdosti u obráběcích nástrojů se obvykle pohybují v rozmezí HRC 62 až 64. Z Tab. č. 15 je zřejmé, že naměřené tvrdosti jsou nižší než běžné tvrdosti obráběcích nástrojů, což odpovídá skutečnosti, že tyto vzorky se nachází ve stavu před tepelným zpracováním.

10.4 Vyhodnocení experimentu č. 2 metodou DOE

V tomto experimentu byly vyhotoveny vzorky, které bylo možné testovat v plném rozsahu. Pouze v jednom případě došlo k nevhodnému rozpadu vzorku u stříhové zkoušky, a to konkrétně u vzorku č. 15. Významnost faktorů byla propočtena a vyhodnocena paní Ing. Věrou Markovou z Regionálního technologického institutu ZČU.

Pro rozhodnutí o významnosti a nevýznamnosti jednotlivých faktorů, dokládajících proměnnou pevnost ve stříhu, byla využita metoda ANOVA. Jedná se o analýzu rozptylu, kterou lze vyhodnotit statisticky významný vliv faktorů na měřené proměnné, jako je například pevnost ve stříhu. Výběr významných proměnných v konečném modelu byl vyhotoven krokovou regresí. Výsledky jsou interpretovány pomocí p – hodnot testu uvedeným níže (Tab. č. 16). Důležitost faktoru je dána p – hodnotou. Pokud je p – hodnota nižší než 0,05 faktor statisticky významně ovlivňuje hodnoty měřené proměnné (pevnost ve stříhu). Když je p – hodnota vyšší než 0,05 není tento faktor statisticky významný.

Tab. č. 16. Výsledné hodnoty ANOVA modelu při zahrnutí všech měřených faktorů

Zdroj	P-hodnota
Spojovací materiál	0,103
Povrch	0,330
Druh pilin	0,056
Hrubost pilin	0,002
Poměr tavidla a pilin	0,803

Z Tab. č. 16 vyplývá, že statisticky významným faktorem je hrubost pilin, jejíž hodnota je menší než 5 % a případně i druh pilin, kde je p – hodnota blízká zmiňovaným 5 %.

Dalším krokem bylo provedení krokové regrese, která odebírá nebo přidává jednotlivé faktory z modelu. Smyslem tohoto postupu je, aby v modelu byly zahrnuty pouze nejdůležitější konečné prvky. Výsledky z krokové regrese jsou zaznamenány v Tab. č. 17. Krokovou regresí byly přidány pouze tři faktory z pěti, které jsou pro model významné, a to spojovací materiál, druh a hrubost pilin. Tímto postupem došlo ke zpřesnění modelu a snížení směrodatné odchylky výsledků z 4,934 na 4,793.

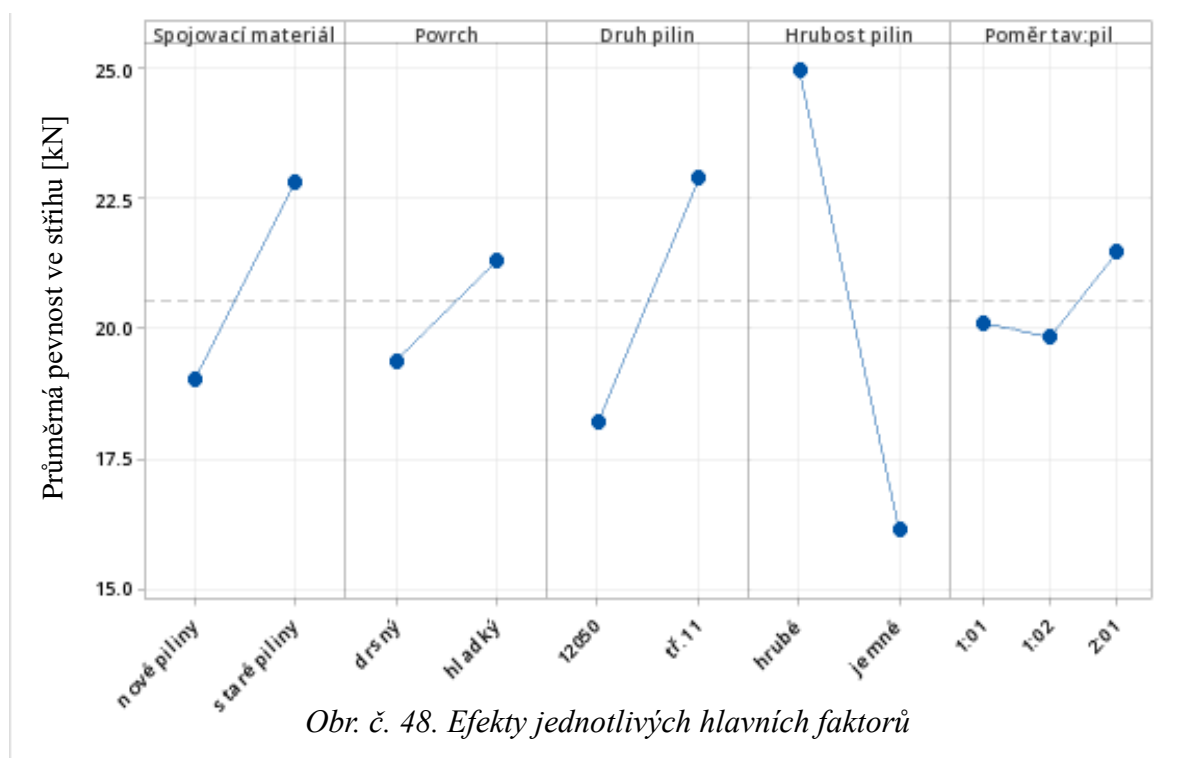
Tab. č. 17. Výsledné hodnoty ANOVA modelu po krokové regresi

Zdroj	P-hodnota
Spojovací materiál	0,100
Druh pilin	0,044
Hrúbost pilin	0,001

10.4.1 Efekty hlavních faktorů

V níže uvedeném Obr. č. 48 jsou zaznamenány průměrné efekty jednotlivých faktorů, při obměně jejich hodnoty. Z grafu vyplývá, že spojovací materiál (staré a nové kovové piliny) má velký vliv na pevnost ve stříhu, zejména při využití starých kovových pilin. Dalším významným faktorem je druh pilin, kde při využití pilin třídy 11 pevnost ve stříhu značně stoupá. Nejvýznamnějším faktorem, který značně ovlivňuje pevnost ve stříhu, je hrúbost pilin, která při využití hrubých pilin stoupá. Faktory s nižším významem jsou povrch pilin a poměr tavidla ku pilinám. V grafu jsou řazeny za důležité faktory. Poslední dva zmiňované faktory nemají tak významný vliv na pevnost, ale v interakci s jinými hlavními faktory mohou mít velký význam pro dosažení zvýšené pevnosti.

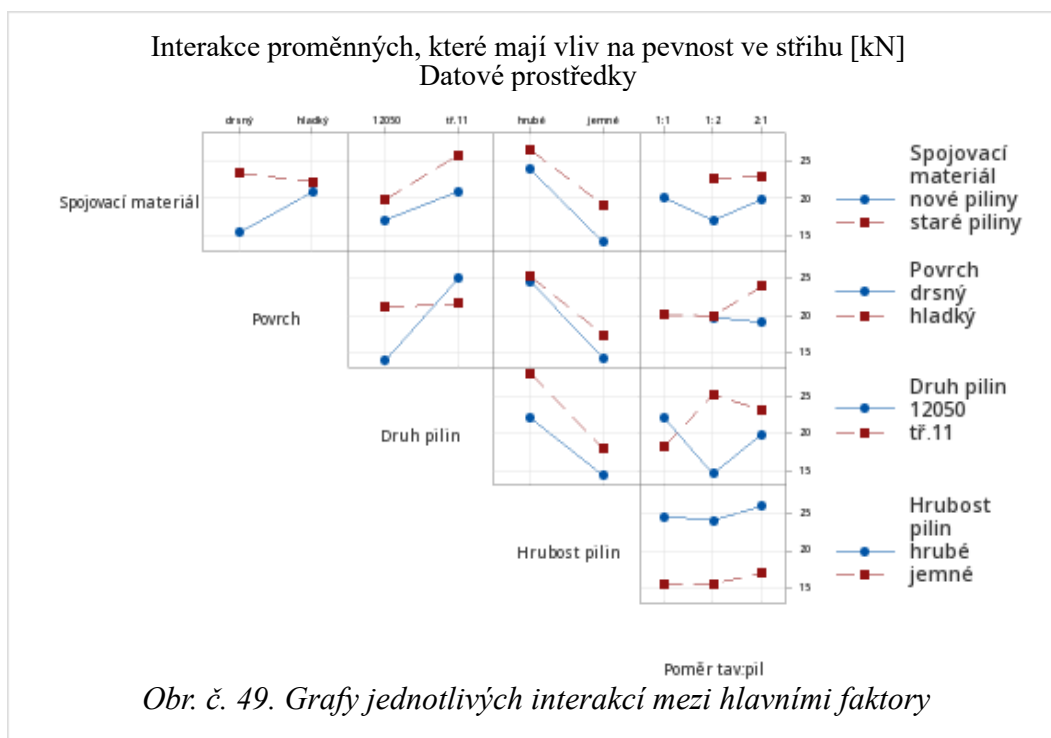
Hlavní efekty proměnných, které mají vliv na pevnost ve stříhu [kN]
Datové prostředky



Obr. č. 48. Efekty jednotlivých hlavních faktorů

10.4.2 Efekty interakcí hlavních faktorů

Efekty interakcí se nepodařilo přímo zakomponovat do modelu z důvodů malého počtu kombinací a hodnot z jejich měření. Analýza interakcí mezi hlavními faktory je znázorněna za pomoci grafů interakcí, kde jsou shrnuty možné, v našem případě dvojité, interakce mezi analyzovanými faktory. V Obr. č. 49 jsou zaznamenány grafy interakcí, které jsou velice zajímavé z hlediska vlivu na pevnost svarového spoje ve stříhu a návrhu dalšího výzkumu.



Dalšími vhodnými interakcemi tedy jsou:

- Spojovací materiál a povrch
- Povrch a druh pilin
- Povrch a poměr tavidla a pilin
- Druh pilin a poměr tavidla a pilin

Při interakci mezi spojovacím materiálem (nové a staré piliny) a povrchem (hladký a drsný). Při současném využití nových pilin a zároveň drsného povrchu se nedosahuje takové pevnosti ve stříhu, jako při využití starých pilin a drsného povrchu. Interakce starých pilin s drsným povrchem je v tomto případě tím nejlepším řešením.

Z interakce mezi povrchem (hladký a drsný) a druhem pilin (12 050 a 11 378) vyplývá, že nejlepšího výsledku se dosahuje při kombinaci drsného povrchu a pilin 11 378. Naopak nejhoršího výsledku se docílíme při kombinaci drsného povrchu a pilinami z 12 050. Naopak při využití hladkého povrchu v kombinaci s oběma druhy pilin nemá tato kombinace významný vliv na pevnost ve stříhu.

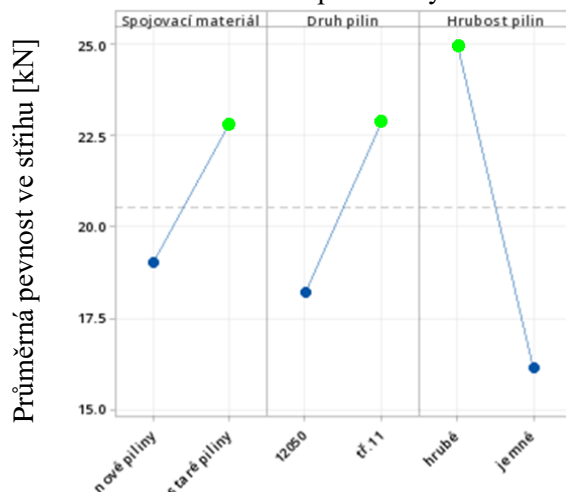
Následující interakce je mezi povrchem (drsný a hladký) a poměrem tavidla a pilin (1:1, 1:2 a 2:1). Zde je možné hodnotit pouze dvě kombinace, jelikož u třetí kombinace nedisponujeme naměřenými daty. Významný vliv na pevnost ve stříhu má kombinace hladkého povrchu s poměrem 2:1 (tav:pil). V případě hladkého povrchu je vliv na pevnost vždy vyšší než v případě drsného povrchu.

V Obr. č. 49 je vidět interakce mezi druhem pili (12 050 a 11 378) a poměrem tavidla a pilin (1:1, 1:2 a 2:1). Tuto interakci lze považovat za nejvýznamnější vzhledem k výsledkům při interakcích na různých úrovních. Při využití pilin z materiálu 12 050 se dosahuje nejvyšší pevnosti při kombinaci s poměrem 1:1 (tav:pil). Naopak při využití pilin z materiálu 11 378 se nejvyšší pevnosti dosahuje při kombinaci s poměrem 1:2 (tav:pil). Nejmenší odchylka v pevnosti se nachází u poměru 2:1, kde výrazně nezáleží na druhu použitých pilin.

10.4.3 Shrnutí výsledků z metody DOE

Pro vytvoření modelu, s obsahem pouze hlavních faktorů bylo měřeno 20 kombinací. Tento model je možné vidět výše na Obr. č. 48. Pro lepší přehlednost byly ponechány v grafu jen ty faktory, který mají největší vliv. Provedená selekce je znázorněna na Obr. č. 50. Významnost hlavních faktorů poznáme na základě výrazných bodů, kdy je dosahováno vysoké pevnosti podle osy Y. Významné faktory jsou zakresleny zelenou barvou a jedná se o spojovací materiál ve formě starých pilin. Na základě získaných výsledků byly vybrány hrubé kovové piliny z materiálu ČSN 11 378.

Hlavní efekty, které mají vliv na pevnost ve stříhu [kN]
Datové prostředky



Obr. č. 50. Graf výsledných faktorů s nejvyšším vlivem

Výsledky lze interpretovat prostřednictvím Tab. č. 18, která vychází z hodnot zakreslených na Obr. č. 50. Nejvýznamnější hlavní faktory s nejvyšší pevností ve stříhu jsou označeny zelenou barvou.

Tab. č. 18. Shrnutí nejvýznamnějších hlavních faktorů

Hlavní faktory	Druhy	Pevnost ve stříhu [kN]
Spojovací materiál	Nové piliny	18,4
	Staré piliny	22,8
Druh pilin	12 050	17,9
	11 378	23
Hrubost pilin	Hrubé	25
	Jemné	15,6

Dále je nutné zmínit i nejvýznamnější interakce. Jednotlivé faktory by samy o sobě neměly velký vliv na pevnost ve stříhu, ale pokud se utvoří správná interakce, může vzniknout další významný vliv na pevnosti ve stříhu. Hodnoty interakcí jsou shrnuty do Tab. č. 19 se zeleným označením nejvýznamnějších interakcí.

Tab. č. 19. Shrnutí výsledků interakcí

Interakce	1.Faktor	2.Faktor	Pevnost ve stříhu [kN]
Spojovací materiál a povrch	Nové piliny	Drsný povrch	15,2
		Hladký povrch	20,9
	Staré piliny	Drsný povrch	23,3
		Hladký povrch	22,2
Druh pilin a povrch	12 050	Drsný povrch	14,4
		Hladký povrch	20,9
	11 378	Drsný povrch	24,9
		Hladký povrch	21,3
Poměr tav:pil a povrch	1:1	Hladký povrch	20,1
	1:2	Drsný povrch	19,7
		Hladký povrch	19,9
	2:1	Drsný povrch	19,1
Hladký povrch		23,9	
Druh pilin a poměr tav:pil	1:1	12 050	22,1
		11 378	18,4
	1:2	12 050	14,8
		11 378	25
	2:1	12 050	19,9
		11 378	23,3

V Tab. č. 19 jsou vyznačeny tři interakce s nevyšší pevností ve stříhu. Vzhledem k tomu, že se jednalo o zmenšený design experimentu, bylo možné zjistit pouze existence dvojitých interakcí. Pro ověření a potvrzení těchto interakcí by bylo nutné provést plný experiment s všemi 48 měřeními, kde by byly zahrnuty kombinace faktorů ve větším množství. Takovéto výsledky by byly pak průkaznější.

11 Experiment č. 3 - Ověření kvality kovářsky svařeného spoje

Experiment číslo 3 se již zabývá testováním životnosti destiček při obrábění, ale také testování pevnosti kovářského svaru. K dispozici je vyhotovený obráběcí nůž dle výsledků z experimentu číslo 2 za použití rezné destičky z materiálu 19 830 od firmy Lentus. Parametry pro výrobu zkušební nože byly vybrány na základě úspěšnosti vzorku číslo 42 ve zkoušce stříhem viz Tab. č. 13. Volba byla provedena ještě před úplným dokončením pevnostní zkoušky ve stříhu. Označení tohoto nože v tomto experimentu bylo Nůž – 42B. Pro možnost porovnání byl k dispozici nůž od firmy Škoda, který byl vyhotoven taktéž kovářským svařováním. Nůž Škoda již působil v praxi, ale pro CNC soustruh, kterým disponuje ZČU v Plzni, byl moc velký. Proto byl z nože Škoda elektro-erozivním obráběním vyříznut nůž menší, který bylo možné upnout do CNC soustruhu, na kterém byla prováděna zkouška. Jeho označení pro tento experiment bylo Nůž-Š. Limitní hodnota pro vyřazení nože byla 0,5 mm opotřeby špičky nože.

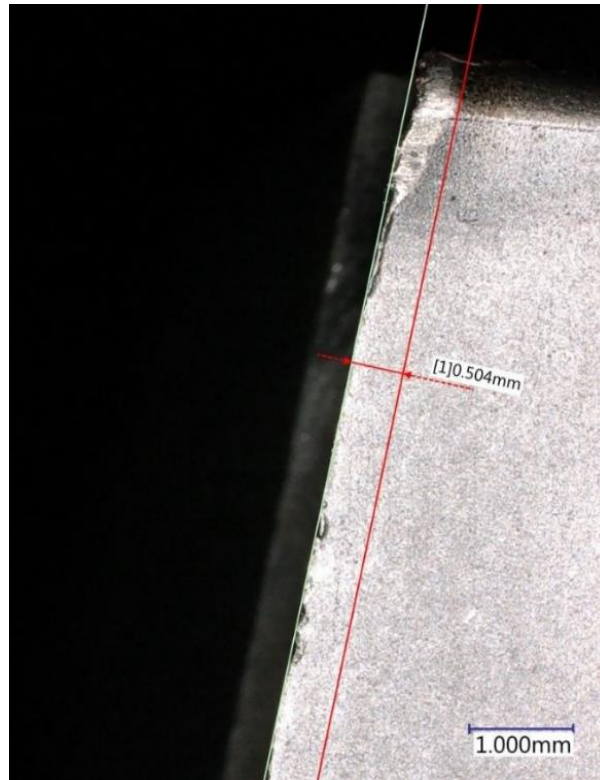
Experiment byl proveden na válcové tyči s počátečním průměrem 73 mm a dvěma vyfrézovanými drážkami po její celé délce po 180°. Tyč byla obráběna postupně jednotlivými noži s hloubkou řezu $a_p = 1$ mm, posuvem $f = 0,25$ mm, řeznou rychlostí $v_c = 20$ m/min a kontrolní délkou obráběné plochy $l_{\text{kontrolní}} = 95$ mm. Kontrolní délkou chápeme přímou délku na obrobku, kterou nůž obrobí. Po obrobení byla provedena kontrola opotřebení nože.

V níže uvedené Tab. č. 20 jsou zaznamenány jednotlivé úběry a vzhled obrobeného povrchu.

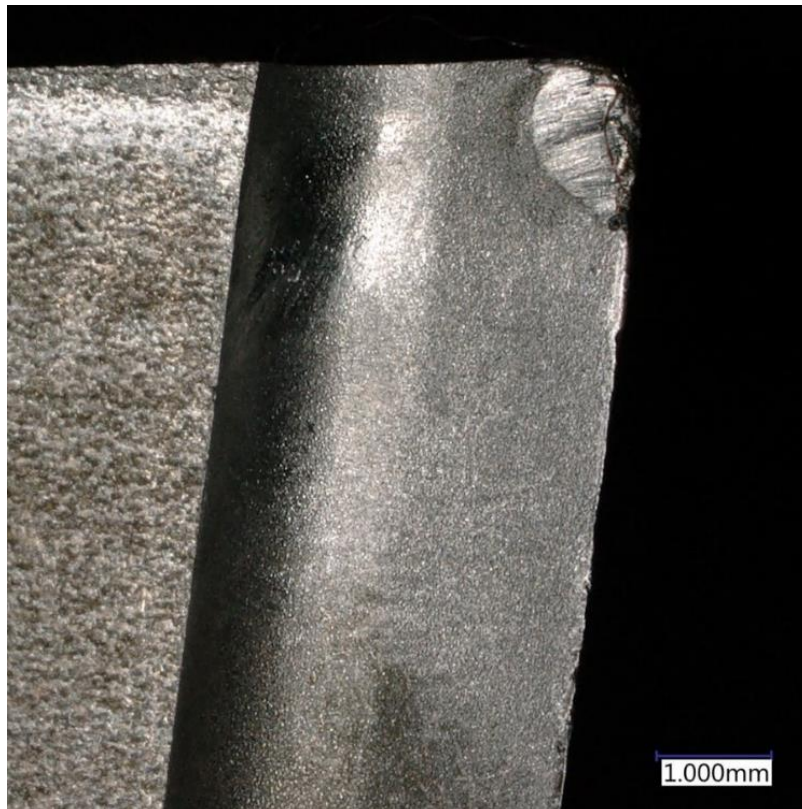
Tab. č. 20. Opotřebení destiček při obráběcí zkoušce a vizuální hodnocení kovářského svaru

Úběr [mm]	Nůž	Opotřebení [mm]	Celková obrobené délka [mm]	Vyřazení	Viditelné poškození v místě svaru
Z Ø 73 na Ø 71	Nůž-42B	0,170	95	-	Žádné
		>0,200	190	-	Žádné
		0,342	285	-	Žádné
Z Ø 71 na Ø 69		0,360	380	-	Žádné
		0,504	475	Vyřadit	Žádné
Z Ø 69 na Ø 67		Nůž-Š	0,250	95	-
	0,288		190	-	-
	0,380		285	-	-
	0,391		380	-	-
	0,450		475	-	-
	0,517		570	Vyřadit	-

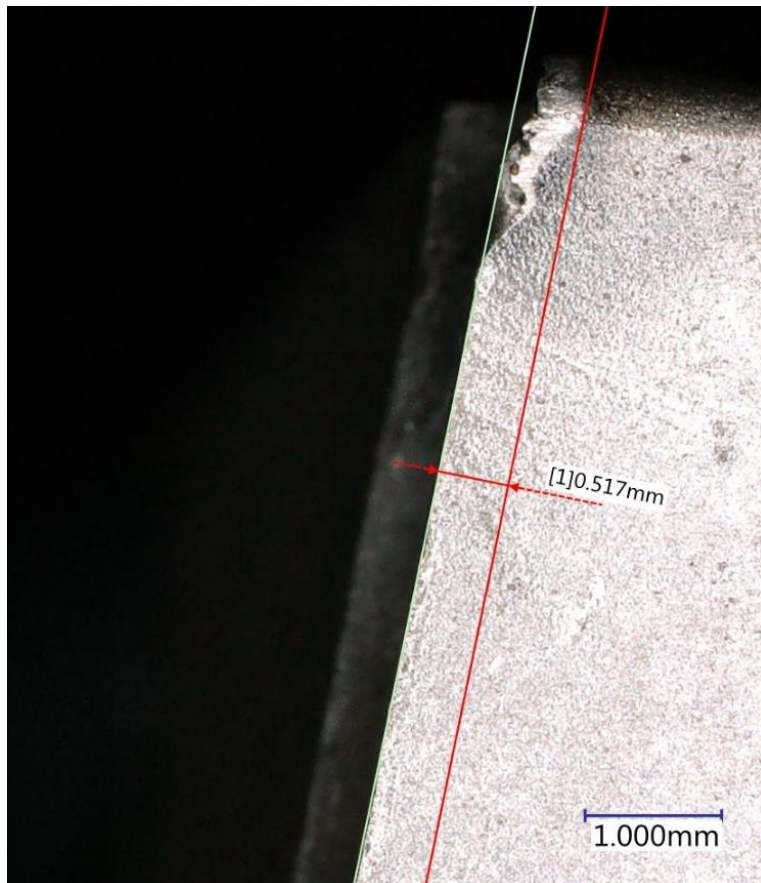
V Tab. č. 20 je zřejmé, že nůž vyrobený prostřednictvím experimentů si vedl obstojně v porovnání s nožem Škoda. V průběhu obrábění jednotlivých kontrolních délek byla mezi jednotlivými délkami prováděna kontrola opotřebení včetně její fotodokumentace. Níže na Obr. č. 51 a Obr. č. 52 je zaznamenáno limitní opotřebení 0,5 mm nože 42 B. Na Obr. č. 53 a Obr. č. 54 je znázorněno limitní opotřebení nože Škoda. Při posouzení vzhledu opotřebení s přihlédnutím, že nůž škoda vykonal o jednu kontrolní délku více, je opticky možné určit jistou podobnost opotřebení a kvality kovářského spoje. Důležitým aspektem hodnocení bylo, zda kovářský spoj u nože 42B bude bez poškození a tomu tak po celou dobu bylo. Na základě fotodokumentace a zaznamenávání opotřebení, lze prohlásit experiment za úspěšný, jelikož i nůž 42B vedl velice podobně jako vzorový nůž Škoda a nedošlo k poškození kovářského svaru ani ke vzniku viditelných vad na kovářském svaru.



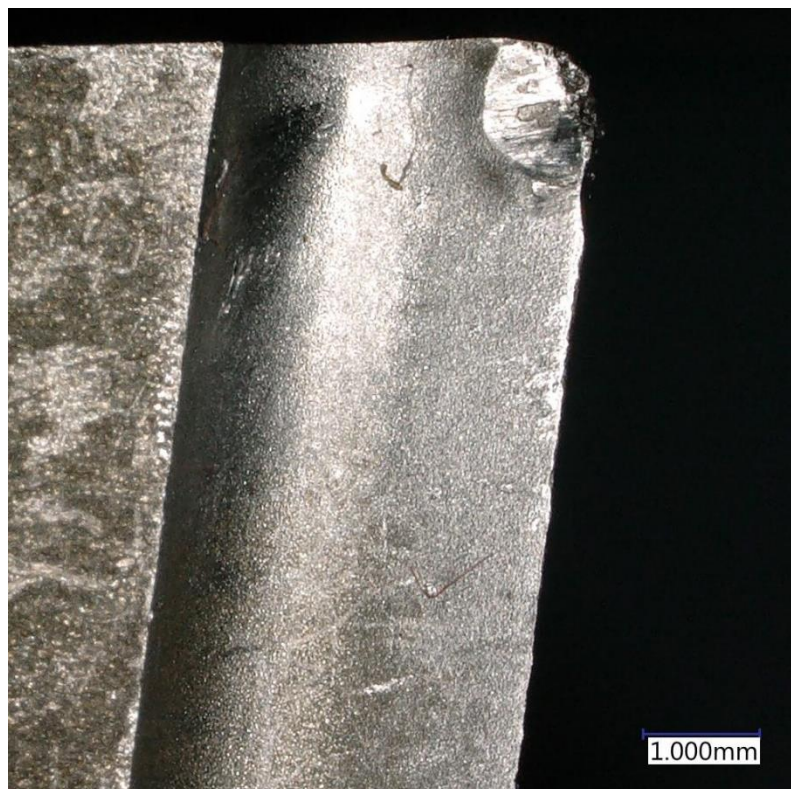
Obr. č. 51. Čelo nože 42B po obrobení kontrolní délky 475 mm



Obr. č. 52. Hřbet nože 42B po obrobení kontrolní délky 475 mm



Obr. č. 53. Čelo nože Škoda po obrobení kontrolní délky 570 mm



Obr. č. 54. Hřbet nože Škoda po obrobení kontrolní délky 570 mm

12 Diskuse výsledků

Cílem tohoto experimentálního výzkumu bylo ověřit technologii kovářského svařování při výrobě ubíracího nože. Konkrétně se bylo zaměřeno na ověření parametrů svařování, jako jsou doba ohřevu materiálů, teplota ohřevu, úběr lisu, poměr tavidla ke kovovým pilinám a velikost kovových pilin. Tyto parametry jsou klíčové pro dosažení maximální pevnosti spoje. Dalším cílem našeho výzkumu bylo odhalení hlavních faktorů, které zásadně ovlivňují pevnost kovářského svaru.

Výsledky pevnostní zkoušky prvního experimentu ukázaly, že teplota 1100 °C není dostačující pro vytvoření kovářského svaru. Druhá použitá teplota, 1200 °C, se prokázala jako dostačující pro vznik kovářského svarového spoje. Na základě výsledků pevnostní zkoušky bylo dále vyhodnoceno, že kovová vlna není vhodným spojovacím materiálem. Kvůli velkému množství vzorků, které se v průběhu pevnostní zkoušky rozpadly, nebylo možné provést analýzu DOE.

Druhý experiment byl modifikací prvního experimentu. V tomto experimentu byla zjištěna doba ohřevu vzorku v peci pomocí termočlánku. Doba ohřevu vzorku v peci trvala 15 minut. Pro stlačení vzorků byl využit lis s úběrem 6 mm a rychlostí 1 m/s. Tyto parametry použité pro stlačení vzorků byly vhodné pro vytvoření kovářského spoje. Na základě pevnostní zkoušky byly pak zkoumány barevně odlišné oblasti (10.2.1 Vyhodnocení svařované plochy vzorků) v místě kovářského spoje, u kterých bylo zjištěno, že nemají žádný vliv na pevnost ve stříhu. Současně byl zkoumán vliv průměrné délky přídavných pilin. Pro materiál pilin 11 378 byla délka hrubých pilin 0,246 mm a jemných 0,045 mm. Délka hrubých pilin u materiálu 12 050 dosahovala 1,302 mm a jemných 0,784 mm. Měření délky pilin ukázalo, že hrubé piliny u oceli 11 378 byly jemnější než jemné piliny u materiálu 12 050. Více do hloubky nebyla délka pilin zkoumána. Před samotným provedením DOE analýzy byla provedena v druhém experimentu pevnostní zkouška na stříhu vyhotovených vzorků. Tato pevnostní zkouška ukázala, že jako nejlepší vyhotovený vzorek s průměrnou pevností ve stříhu 29,158 kN se jeví vzorek číslo 24 (nové hrubé piliny z materiálu 11 378, povrch drsný a poměr tav:pil - 1:2). Z provedené DOE analýzy bylo zjištěno, které faktory jsou hlavní a mají největší vliv na kvalitu spoje v závislosti na pevnosti ve stříhu. Z výsledků této analýzy byly získány tři hlavní faktory, kterými jsou spojovací materiál, druh pilin a hrubost pilin. Konkrétně pro vytvoření kovářského spoje o vysoké pevnosti je vhodné využít hrubých starých pilin z materiálu 11 378. Vytvořené spoje, které obsahovaly staré piliny, dosahovaly pevnosti ve stříhu až 22,8 kN. Spoje, na které byly použity piliny z materiálu 11 378, dosahovaly pevnosti ve stříhu až 23 kN a spoje, u kterých se vyskytovaly použité hrubé piliny, dosahovaly pevnosti ve stříhu až 25 kN. Při porovnání výsledků z pevnostní zkoušky ve stříhu s výsledky z analýzy DOE je zřejmé, že výsledky z analýzy DOE nekorespondují s výsledky z provedené pevnostní stříhové zkoušky pouze ve stáří využitých kovových pilin. Dále bylo zjištěno, že vedlejší faktory při interakci s jinými vedlejšími faktory mohou také výrazně ovlivňovat kvalitu kovářského spoje.

Provedená mikroskopická analýza potvrdila výsledky z pevnostní zkoušky stříhem a DOE analýzy. Nejlepší variantou pro tvorbu kovářského svaru je využít nových, hrubých pilin z materiálu 11 378. Po optickém zhodnocení mikrostrukturních snímků kovářského svaru se vzorek č. 24 jevil jako nejlepší. Díky využití drsných pilin byla svarová plocha zaplněna v největším rozsahu oproti ostatním vzorkům a obsahuje minimum pórů ve struktuře svaru po optickém zhodnocení. K difuznímu propojení došlo mezi svarovým spojem a uhlíkovou ocelí 11 523. Z pohledu propojení rychlořezné oceli se svarovým spojem nedošlo k úplnému difuznímu propojení. Toto nejspíše bylo zapříčiněno krátkou výdrží na teplotě 1200 °C při ohřívání vzorků před jejich skováním.

Experiment číslo tři ukázal, že nůž vytvořený podle parametrů experimentu číslo dva je schopný obrábět přerušovaným řezem. Nůž byl vyroben podle vzorku číslo 42 z druhého experimentu. Během zkoušky obrábění nedošlo ke vzniku viditelných vad v místě svarového spoje jednotlivých komponent nože. Optické opotřebení nože bylo podobné jako u porovnávacího nože, což mohlo být způsobeno určitými odchylkami v geometrii nože. Tento experiment ukázal, že i neoptimální varianta obráběcího nože je schopna obrábět přerušovaným řezem bez vzniku vad ve svarovém spoji, stejně jako nůž Škoda.

13 Závěr

V této bakalářské práci bylo zpracováno téma „*Technologie kovářského navařování a pevnost kovářského spoje rychlořezné a nelegované konstrukční oceli*“. Teoretická část se zabírala blízkými tématy, které souvisí s řešenou problematikou. Byly zde představeny rychlořezné oceli, jejich výroba a tepelné zpracování. V následující části byla popsána technologie svařování a pájení s představením konkrétních typů svařování s přímou souvislostí s prováděným experimentem. Byla představena technologie obrábění se zobrazením a popisem typů upevnění řezných destiček u řezných nástrojů. Dalším z témat byly mechanické zkoušky a v poslední řadě zde bylo pojednáno o metodě, která byla využívána pro plánování experimentů.

Výsledkem této práce je využít pro tvorbu pevného kovářského spoje starých kovových pilin z materiálu 11 378 s vyšším poměrem kovových pilin k tavidlu.

Z celkového pohledu lze tuto práci považovat za úspěšnou, jelikož byl ověřen zvolený technologický postup kovářského svařování a dosaženo uspokojivých výsledků v podobě pevnosti spoje. Tím byl splněn cíl této práce. Tato práce může být v praxi užitečným návodem pro vytvoření pevných a kvalitních kovářských svarů ubíracích nožů, které jsou využívány v energetickém průmyslu.

Do budoucna se nabízí provedení experimentu s hlubším probádáním vlivu interakcí mezi jednotlivými faktory na pevnost kovářského spoje ve stříhu. Dále by bylo vhodné více prozkoumat, jaký vliv by měla delší výdrž na teplotě 1200 °C při ohřevu vzorků na provedení difuzního spoje mezi rychlořeznou ocelí a svarovým spojem. Nabízí se i prozkoumání automatizace procesu kovářského svařování pomocí indukčního ohřevu přímo na hydraulickém lisu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] FREMUNT, Přemysl. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994.
- [2] PLUHAŘ, Jaroslav. *Strojírenské materiály*; 3. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1982.
- [3] ČSN EN ISO 4957. *Nástrojové oceli*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020, 36 s. Třídící znak 42 0949.
- [4] IRON BOARD LABS. *Tool steel* [online]. 2009 [cit. 14-11-2021]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/>.
- [5] ČSN ISO 11054. *Řezné nástroje – Označení skupin rychlořezných ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 8 s. Třídící znak 220050.
- [6] BOLZANO, Bohdan. *Rychlořezné nástrojové oceli* [online]. In: 14-01-2020, 5 s. [cit. 15-11-2021]. Dostupné z: <https://bolzano.cz/technicka-podpora/technicka-podpora-nastrojovych-oceli/>.
- [7] HORÁČEK, Jaroslav. *Nauka o materiálu*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2000. ISBN 80-213-0397-2.
- [8] SOBOTKOVÁ, Jana. *Perspektivní nástrojové oceli* [online]. In: 27-11-2016, 35 s. [cit. 03-03-2023]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2016-24-Sobotova.pdf>.
- [9] JURČI, Peter. *Nástrojové oceli ledeburitického typu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04439-1.
- [10] BOHLER. *Nástrojové a rychlořezné oceli dodavatelský program* [online]. In: 02-11-2018 [cit. 16-11-2021]. Dostupné z: https://www.bohler.cz/app/uploads/sites/109/2019/08/katalog_bohler_vyroba.pdf.
- [11] BOLZANO, Bohdan. *Zpracování nástrojových ocelí; Tváření a tepelné zpracování* [online]. In: 02-07-2021, 5 s. [cit. 06-03-2023]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technickaprirucka/>.
- [12] Autorský kolektiv Poldi Kladno. *Nástrojové oceli a jejich použití I. Díl*. Praha: SNTL, 1986.
- [13] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [14] KOVAŘÍK, Rudolf; ČERNÝ František. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 978-80-7082-697-3.
- [15] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II – část svařování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [16] AIR PRODUCTS. *Příručka svářeče* [online]. In: 26-05-2014, 52 s. [cit. 28-11-2021]. Dostupné z: <https://adoc.pub/download/piruka-svaee-pro-svaovani-v-ochranne-atmosfee-a-tepelne-dlen.html>.
- [17] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II – část svařování díl 2*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [18] ONE INDUSTRY. *Svařování* [online]. 20-06-2019 [cit. 28-11-2021]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/svarovani/>.
- [19] UROBOS KOVÁŘSTVÍ. *Kovářské svařování* [online]. [cit. 28-11-2021]. Dostupné z: <https://www.kovarstviuroboros.eu/studovna/kovarskesvarovani/>.

- [20] BARTOVSKÁ, Lidmila. *Chemická kinetika*. Praha: Vysoká škola chemicko – technologická v Praze, 2008. ISBN 978-80-7080-670-8.
- [21] AMBROŽ, Oldřich. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [22] ONE INDUSTRY. *Pájení* [online]. 08-07-2019 [cit. 28-11-2021]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/pajeni/>.
- [23] DOUŠKA, Michal. *Technologie I. – pájení* [online]. In: 25.05.2010 [cit. 30-11-2021]. Dostupné z: https://docplayer.cz/storage/27/12326127/1678815766/7npq3qMT3m_IwR0Wv5tr2w/12326127.pdf.
- [24] KURČÍK, Jan. *Pájení* [online]. In: 2012 [cit. 30-11-2021]. Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/T/T09.pdf>.
- [25] HUMÁR, Anton. *Technologie I – technologie obrábění – I. část, studijní opory pro magisterskou formu studia*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2003
- [26] BOTHE, Otakar. *Strojírenská technologie IV*. Praha: SNTL, 1989.
- [27] HUDEC, Roman. *Jak naprogramovat N-céčko*. Brno: Code Creator, s.r.o.; publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-62-5.
- [28] ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2003. ISBN 80-214-2336-6.
- [29] ONE INDUSTRY. *Soustružnický nůž* [online]. 01-07-2019 [cit. 20-11-2021]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/soustruznicky-nuz/>.
- [30] SLAVÍK, Petr. *Konstrukce řezné části nástrojů* [online]. In: 13-03-2013 [cit. 22-11-2021]. Dostupné z: <https://adoc.pub/download/konstrukce-ezne-asti-nastroj.html>.
- [31] BOUKAL. *Soustružnické a obráběcí nože* [online]. [cit. 25-11-2021]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/soustruznicke-noze-hss-optimum-8-mm-sada-8-ks/70659/produkt>.
- [32] BOUKAL. *Soustružnické a obráběcí nože* [online]. [cit. 25-11-2021]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/soustruznicke-noze-proma-sk-8-x-8-v-sade/12743/produkt>.
- [33] SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant s.r.o., 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [34] BOUKAL. *Soustružnické a obráběcí nože* [online]. [cit. 25-11-2021]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/soustruznicke-noze-optimum-hm-8-mm-v-sade/5448/produkt>.
- [35] SKÁLOVÁ, Jana. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [36] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- [37] POKORNÝ, Karel. *Mechanické zkoušky* [online]. In: 11.04.2013 [cit. 28.02.2022]. Dostupné z: <https://adoc.pub/download/ovmt-mechanicke-zkouky5dd3e728552c3119c52b2acfa03ecf1358823.html>.
- [38] TOŠENOVSKÝ, Josef. *Plánování experimentů*. Ostrava: VŠT – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2592-2.

- [39] DOE (*Design of Experiments*) [online]. In: ManagementMania.com Wilmington (DE) 2011-2023, 24.07.2015 [cit. 07.03.2022]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/design-of-experiments> .
- [40] MISÁK, Petr. *Design of Experiment (DOE)* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017 [cit.07-03-2022]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/108810754-Design-of-experiment-doe-petr-misak-brno-2017.html>.
- [41] PAVELKA, František; KLÍMEK, Petr. *Aplikovaná statistika*. Zlín: Vysoké učení technické v Brně, 2000. ISBN 80-214-1545-2.
- [42] HINDLS, Richard a kol. *Metody statistické analýzy pro ekonomy*. Praha: MANAGEMENT PRESS, 1997. ISBN 80-85943-44-1.
- [43] IMSL by Perforce. *What Is a Regression Model?* [online]. 16-06-2021 [cit.13-03-2023]. Dostupné z: <https://www.imsl.com/blog/what-is-regression-model>.
- [44] KUHN, Max; JOHNSON, Kjell. *Applied Predictive Modeling* [online]. In: 21-11-2014 [cit. 14-03-2023]. New York: Springer Science+Business Media, 2013. ISBN 978-1-4614-6848-6. Dostupné z: https://vuquangnguyen2016.files.wordpress.com/2018/03/applied-predictive-modeling-max-kuhn-kjell-johnson_1518.pdf.
- [45] JAMES, Gareth et al. *An Introduction to Statistical Learning* [online], In: 05-08-2021 [cit. 14-03-2023]. Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature, 2021. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-0716-1418-1>.
- [46] STATSOFT STATISTICA. *Úvod do regresní analýzy* [online]. In: Statsoft CR s.r.o., 25-03-2014 [cit. 15-03-2023]. Dostupné z: http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014_26_03_StatSoft_Uvod_do_regresni_analyzy.pdf.
- [47] MATHWORKS. *What Is Residual Analysis* [online]. The MathWorks, Inc. 1994-2023, 2022 [cit. 15-03-2023]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/what-is-residual-analysis.html>.
- [48] HOLČÍK, Jiří; KOMENDA, Martin a kol. *Matematická biologie: e-learningová učebnice*, 1. vydání [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2015. ISBN 978-80-210-8095-9. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/>.
- [49] LEINVEBER, Jan a kol. *Strojnické tabulky*, 3. dopl. vyd. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-164-6.
- [50] ČSN 41 1523. *Ocel 11 523*. Praha: Český normalizační institut, 1994, 20 s. Třídící znak: 411523.
- [51] ČSN 41 9830. *Ocel 19 830 rychlořezná*. Praha: Český normalizační institut, 1966, 8 s. Třídící znak: 419830.
- [52] BOLZANO, Bohdan. *Konstrukční oceli – porovnání podle ČSN s ocelmi podle norem EN* [online]. In: 18-12-2019, 1 s. [cit. 12-01-2023]. Dostupné z: https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2019/12/bolzano_web_listy_konstrukcni_oceli_porovnan%C3%AD_csn_en.pdf.
- [53] ČSN 41 1378. *Ocel 11 378*. Praha: Český normalizační institut, 1993, 12 s. Třídící znak: 411378.
- [54] ČSN 41 2050. *Ocel 12 050*. Praha: Český normalizační institut, 1976, 16 s. Třídící znak: 412050.

- [55] FERRO-STEEL. *ČSN 11 378 – konstrukční ocel*. In: 23-03-2011 [cit. 25-01-2023]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/profily1-11378.pdf>.
- [56] FERRO-STEEL. *ČSN 11 523 – konstrukční ocel*. In: 22-03-2011 [cit. 25-01-2023]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky1-11523.pdf>.
- [57] FERRO-STEEL. *ČSN 12 050 – ocel k zušlechťování*. In: 28-03-2011 [cit. 25-01-2023]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12050.pdf>.
- [58] ŠVEC, Petr. *Tetraboritan sodný dekahydrát* [online]. In: PENTA s.r.o., 01-06-2022 [cit. 12-01-2023]. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/bezpecnostni-listy/tetraboritan_sodny_dekahydrat.pdf.
- [59] VOESTALPINE HIGH PERFORMANCE METALS CZ. *Leštění* [online]. [cit. 08-03-2023]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/sluzeb/povlakovani/lesteni/>.
- [60] VYŠATA, Jiří. *Metody obrábění – frézování* [Online]. In: 08-02-2012 [Cit.: 08.03.2023]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=64141>.